

УДК 537.3:56.28'56'661

© 1992

## МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА В КРИСТАЛЛАХ С ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТЬЮ ЦЕРИЯ

### $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$

*Е. М. Левин, А. В. Пустовит, В. Г. Синюшко, О. И. Бодак, И. Н. Стець*

Впервые синтезированы сплавы  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$ , в которых производится взаимное замещение  $\text{Mn} \rightleftharpoons \text{Si}$ . Исследованы удельная намагниченность ( $77 < T < 500$  К), удельное сопротивление, дифференциальная термоэдс ( $4.2 < T < 450$  К), параметры кристаллической решетки и рентгеновские  $L_{III}$ -абсорбционные спектры церия ( $T = 300$  К). Экспериментальные результаты и расчет параметров электронной структуры, проведенный с использованием модели локальной Ферми-жидкости, показали, что при замещении  $\text{Mn} \rightarrow \text{Si}$  происходит изменение величины эффективной валентности Ce, энергетического зазора между  $f$ -резонансом и уровнем Ферми, а также появление слабого ферромагнетизма в антиферромагнитной подрешетке Mn.

Проблема состояний переменной валентности (ПВ) и концентрированной Кondo-системы (ККС) редкоземельных элементов, в частности церия, в интерметаллических соединениях исследуется уже достаточно давно [1,2], однако продолжает привлекать к себе внимание вследствие оригинальности проявляемых физических эффектов и отсутствия достаточной ясности механизмов управления их характеристиками.

Одним из интересных направлений проводимых в настоящее время исследований является использование сложных редкоземельных соединений, в которых возможны вариации различных параметров кристалла и создание условий сочетания в кристалле новых физических свойств, например состояний ПВ (или ККС) и магнитного порядка [3,4].

К числу наиболее интересных сложных кристаллов с редкими землями можно отнести тернарные соединения церия типа  $\text{CeMn}_2\text{X}_2$  ( $\text{X} = \text{Si}, \text{Ge}$ ), а также твердые растворы на их основе, в которых наряду с магнитным упорядочением марганца могут существовать состояния ПВ и ККС церия [5,6].

В ряду изоструктурных соединений  $\text{RMn}_2\text{Si}_2$  при уменьшении периодов  $a$  и  $c$  тетрагональной решетки соединений вследствие лантаноидного сжатия происходит смена типа магнитного упорядочения с ферромагнитного при  $R = \text{La}$  на антиферромагнитный при  $R = \text{Ce}, \text{Pr}, \dots$  [5], т. е. сжатие решетки соединений  $\text{RMn}_2\text{Si}_2$  при замене редкоземельных элементов, начиная с церия, приводит к смене знака обменного интеграла взаимодействия между локализованными магнитными моментами (ЛММ) ионов Mn. В соединении  $\text{CeMn}_2\text{Si}_2$  температура Нееля для подрешетки Mn составляет  $T_N = 380$  К [6]. Для ионов Ce с помощью рентгеновской  $L_{III}$ -спектроскопии установлено существование состояния ПВ с эффективной валентностью  $\nu_{\text{эфф}} = 3.13 \pm 0.03$  ( $T = 300$  К) [7], что также подтверждено данными работ [8,9].

С целью выяснения возможности взаимного замещения  $\text{Mn} \rightleftharpoons \text{Si}$  и его влияния на параметры состояния ПВ церия и магнитных характеристик подрешетки Mn синтезированы сплавы переменного состава  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$ , в которых церия со-

держалось 20 ат. %, а содержание Mn и Si изменялось таким образом, что суммарно оно составляло 80 ат. %. Чистота использованных компонентов: церия — 99.85 %, марганца — 99.80 %, кремния — 99.99 % основного элемента.

Измерения дифференциальной термоэдс, удельного сопротивления (диапазон температур  $4.2 < T < 450$  К) и удельной намагниченности ( $77 < T < 500$  К) проведены с помощью автоматизированного комплекса, созданного на базе ДВК-3М/2, крейта КАМАК и вибромагнетометра. Параметры решетки определялись с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2.0 с точностью  $\pm 10^{-4}$  нм, эффективная валентность церия определялась с помощью рентгеновской  $L_{III}$ -абсорбционной спектроскопии.

Установлено, что параметры тетрагональной решетки  $a$  и  $c$  синтезированных сплавов  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  при изменении состава практически не изменяются (рис. 1), что может быть объяснено близостью атомных радиусов Mn и Si (0.1304 и 0.1319 нм соответственно [10]). В то же время электронные транспортные и магнитные свойства сплавов существенно зависят от степени взаимного замещения  $Mn \rightleftharpoons Si$ .

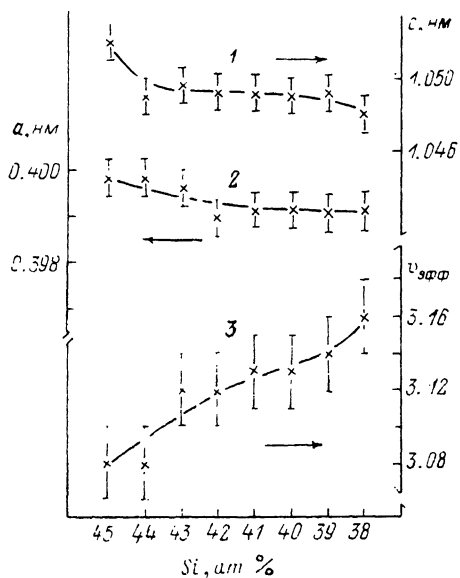


Рис. 1. Зависимости параметров решетки  $c$  (1),  $a$  (2) и эффективной валентности  $v_{эфф}$  (3) ионов церия в сплавах  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  от содержания Si.

При уменьшении содержания Si происходит смещение положительного пика дифференциальной термоэдс  $T_{a_{max}}$ , обусловленного нахождением Ce в состоянии переменной валентности [2], в область более высоких температур: от 190 К при содержании Si 45 ат. % до 230 К при 38 ат. % (рис. 2). Неожиданным является появление низкотемпературного отрицательного пика термоэдс  $\alpha_{min}$  при  $T_{a_{min}} = 45$  К, аналогичного пику термоэдс в ККС  $CeCu_2Si_2$  [2], в образцах, содержащих менее 40 ат. % Si, и его рост (по абсолютной величине) до значения  $\alpha_{min} = -30$  мкВ/К. В рамках принятого в [11] подхода ( $T_{a_{max}} \sim \Gamma_f$ ,  $\Gamma_f$  — ширина  $f$ -резонанса) наблюдаемое увеличение  $T_{a_{max}}$  при замещении  $Si \rightarrow Mn$  означает уширение  $f$ -резонанса: от 16 до 20 мэВ при указанном выше изменении состава (табл. 1).

Результаты определения эффективной валентности  $v_{эфф}$  церия с помощью рентгеновской  $L_{III}$ -абсорбционной спектроскопии показали, что  $v_{эфф}$  изменяется от

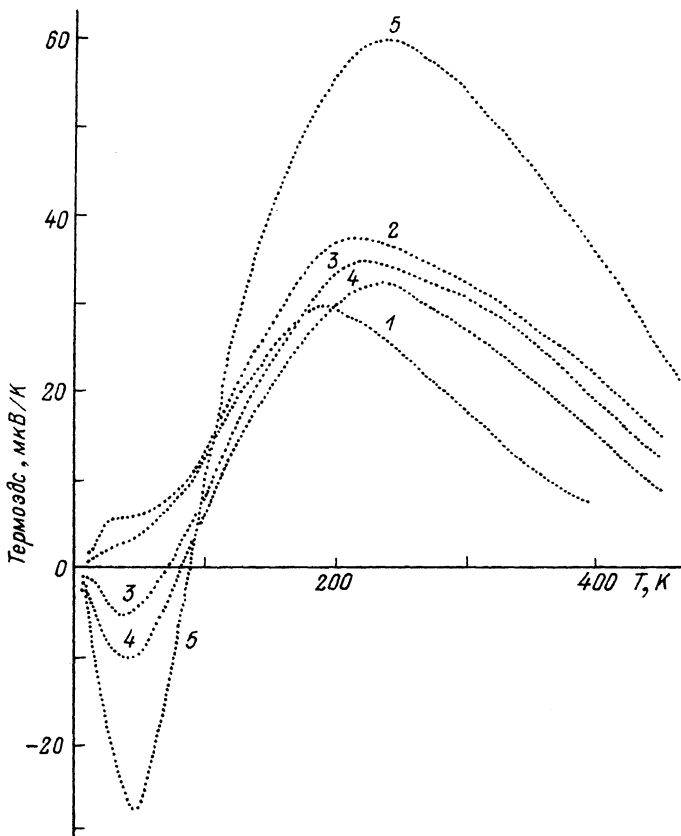


Рис. 2. Температурные зависимости дифференциальной термоэдс в сплавах  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$ :  
 1 — 45, 2 — 43, 3 — 40, 4 — 39, 5 — 38 ат. % Si.

3.08 при содержании 45 ат. % Si до 3.16 при содержании 38 ат. % Si (рис. 1). С учетом известных соотношений между  $\nu_{\text{эфф}}$  и шириной  $f$ -уровня [1] можно сделать вывод, что действительно при замещении  $\text{Mn} \rightarrow \text{Si}$  происходит уменьшение ширины  $f$ -резонанса, т. е. наблюдается хорошая корреляция зонных и ионных характеристик в отношении оценки тенденции изменения параметров состояния ПВ церия.

Для проведения расчетов основных параметров электронной структуры металлов, содержащих редкоземельные ионы в состоянии ПВ, может быть использован ряд моделей, среди которых можно выделить как наиболее простую и эффективную модель локальной Ферми-жидкости (МЛФЖ), предложенную Ньюнсом и Хьюсоном [12].

В рамках данной модели с использованием полученных экспериментальных данных и некоторых упрощений [13] проведены расчеты величины энергетического зазора  $|\epsilon_F - \epsilon_f|$  ( $\epsilon_F, \epsilon_f$  — энергии уровня Ферми и  $f$ -уровня соответственно), а также плотности электронных состояний  $N_f(\epsilon_F)$ , задаваемых  $f$ -состояниями церия на уровне Ферми. При замещении  $\text{Si} \rightarrow \text{Mn}$  происходит удаление  $f$ -резонанса от уровня Ферми ( $f$ -резонанс находится выше  $\epsilon_F$  [12]) и уменьшение величины  $N_f(\epsilon_F)$  от 19 до 14 сост./эВ ат. Ce (табл. 1).

Следует отметить, что при проведении расчетов наличие температурной зависимости эффективной валентности церия не учитывалось, однако в этом случае рассчитанная для стехиометрического состава  $\text{CeMn}_2\text{Si}_2$  величина коэффициента электронной теплоемкости ( $\gamma_{\text{эл}} = 36$  мДж/К<sup>2</sup>·моль удовлетворитель-

Экспериментальные значения эффективной валентности церия, параметров термоэдс и рассчитанные характеристики электронной структуры сплавов  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$

Состав	$v_{\text{эфф}} \pm 0.03$	$T_{\text{амак}}, \text{K}$	$\Gamma_f, \text{мэВ}$	$ \epsilon_F - \epsilon_f , \text{мэВ}$	$(2J+1)N_f(\epsilon_F)$ , сост./эВ ат. Ce
$\text{CeMn}_{1.75}\text{Si}_{2.25}$	3.08	190	16	37	19
$\text{CeMn}_{1.80}\text{Si}_{2.20}$	3.08	195	17	38	18
$\text{CeMn}_{1.85}\text{Si}_{2.15}$	3.12	205	18	41	17
$\text{CeMn}_{1.90}\text{Si}_{2.10}$	3.12	210	18	42	16
$\text{CeMn}_{1.95}\text{Si}_{2.05}$	3.13	220	19	44	15
$\text{CeMn}_{2.00}\text{Si}_{2.00}$	3.13	220	19	44	15
$\text{CeMn}_{2.05}\text{Si}_{1.95}$	3.14	230	20	47	15
$\text{CeMn}_{2.10}\text{Si}_{1.90}$	3.16	235	20	49	14

нее согласуется с экспериментальной ( $47 \text{ мДж/К}^2 \cdot \text{моль} [^4]$ ), чем при учете этой зависимости и выборе величины  $v_{\text{эфф}} = 3.23$  ( $T = 4.2 \text{ K}$ ) [ $^8$ ] ( $30 \text{ мДж/К}^2 \cdot \text{моль}$ ).

Характер удельного сопротивления в сплавах  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  также чувствителен к составу. При содержании Si от 40 до 45 ат. % кривые  $\rho(T)$  характеризуются резким ростом сопротивления при повышении температуры от 4.2 до 70 K (рис. 3), причем выполнение закона  $\rho = \rho_0 + BT^2$  для большинства образцов (на вставке к рис. 3 приведена зависимость  $\rho \sim f(T^2)$  для образца, содержащего 45 ат. % Si) указывает на существование ферми-жидкостного поведения сопротивления вследствие сильного электрон-электронного рассеяния. Максимальная величина удельного сопротивления  $\rho_{300 \text{ K}} = 1000 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$  значительно превышает  $\rho_{300 \text{ K}}$  в ККС  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  ( $\approx 400 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ ) [ $^2$ ], что является характерной особенностью тернарных соединений церия, марганца и кремния [ $^3, ^4$ ].

Исследование зависимостей удельной намагниченности насыщения  $\sigma_{\text{нас}}$  от величины прикладываемого магнитного поля и температуры указывает на то, что при уменьшении содержания Si до 40 ат. % происходит смена кривых  $\sigma(T)$ , типичных для кристаллов с ферромагнитным (ФМ) упорядочением, на кривые, типичные для кристаллов с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением.

Температурные зависимости намагниченности для образцов с ферро- и антиферромагнитным упорядочением приведены на рис. 4. Выше температур магнитного перехода магнитная восприимчивость для всех сплавов  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  изменяется по обычному закону Кюри—Вейсса с величиной эффективного

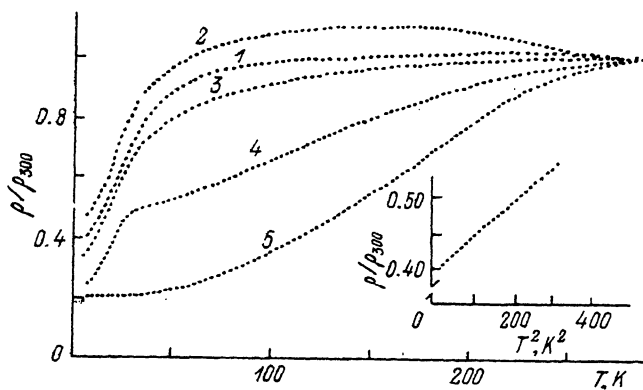


Рис. 3. Температурные зависимости электрического сопротивления (нормированного к  $\rho_{300 \text{ K}}$ ) в сплавах  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$ .

1 — 45, 2 — 42, 3 — 40, 4 — 39, 5 — 38 % Si. На вставке — зависимость  $\rho/\rho_{300 \text{ K}} \sim T^2$  для образца  $\text{CeMn}_{1.75}\text{Si}_{2.25}$ .

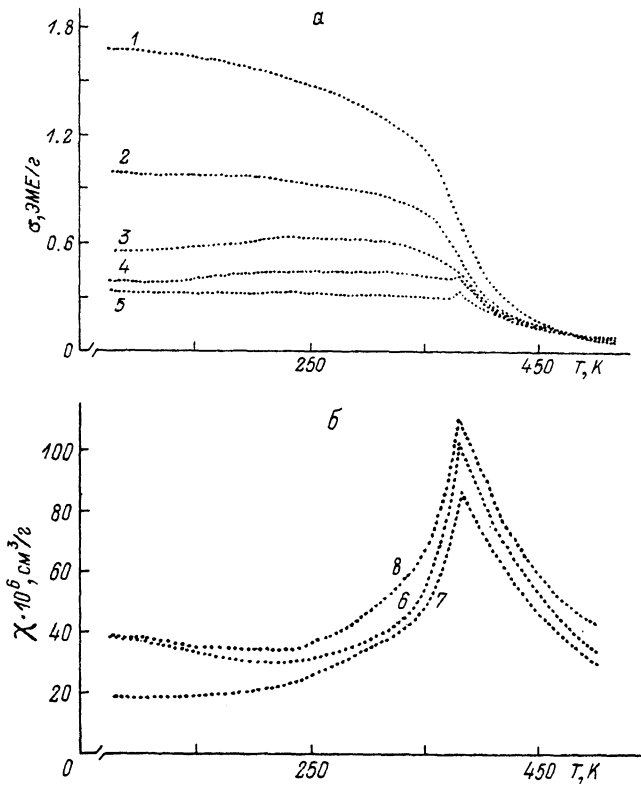


Рис. 4. Температурные зависимости намагниченности (а) и магнитной восприимчивости (б) в сплавах  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  с ферро- и антиферромагнитным поведением.  
 1—45, 2—44, 3—43, 4—42, 5—41, 6—40, 7—39, 8—38 ат. % Si.

магнитного момента на формульную единицу в пределах от  $\mu'_{\text{эфф}} = 3.6$  до  $4.4 \mu_{\text{Б}}$ , т. е. от  $2.5$  до  $3.1 \mu_{\text{Б}}$  на атом Mn. Парамагнитная температура Кюри  $\theta_{\text{пм}}$  с ростом степени замещения  $\text{Si} \rightarrow \text{Mn}$  падает, что указывает на ослабление взаимодействия магнитных моментов, локализованных на атомах Mn.

В кристаллах с ФМ свойствами удельная намагниченность насыщения  $\sigma_{\text{нас}}$  линейно возрастает с ростом содержания кремния (рис. 5). Полевые зависимости намагниченности показали (измерения проведены при  $T = 77$  и  $300$  К) наличие обычных петель гистерезиса с остаточной намагниченностью в пределах от  $1.6$  (45 ат. % Si) до  $0.3$  ЭМЕ/г (41 ат. % Si); величина коэрцитивной силы находится в пределах  $500$ — $1300$  Э. При этом величина эффективного магнитного момента  $\mu''_{\text{эфф}}$ , приходящаяся на атом марганца в ферромагнитных сплавах, изменяется от  $0.9 \cdot 10^{-2}$  до  $4.4 \cdot 10^{-2} \mu_{\text{Б}}$  при изменении содержания Si от 45 до 41 ат. % соответственно (расчет проведен по величине  $\sigma_{\text{нас}}$ ), а отнесенная к числу замещенных атомов Mn  $\rightarrow$  Si величина эффективного магнитного момента практически постоянна и составляет  $\mu'''_{\text{эфф}} = 0.35 \mu_{\text{Б}}$ .

Температура Кюри  $T_c$  совпадает с температурой Нееля  $T_N = 380$  К для составов с высоким содержанием Mn (более 40 ат. %). Основные магнитные характеристики  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  приведены в табл. 2. Для сравнения приведем также наши данные по магнитным характеристикам для ферромагнетика  $\text{LaMn}_2\text{Si}_2$ :  $T_c = 314$  К, удельная намагниченность насыщения  $\sigma_{\text{нас}}$  (77 К) =  $42.4$  ЭМЕ/г,  $\theta_{\text{пм}} = 314$  К,  $\mu'_{\text{эфф}} = 4.9 \mu_{\text{Б}}$ , величина коэр-

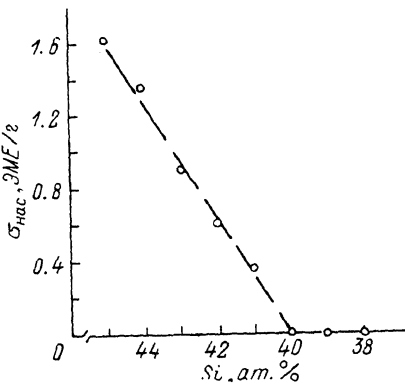


Рис. 5. Зависимость намагниченности насыщения при  $T = 77$  К для сплавов  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  от содержания кремния.

цетивной силы менее  $12 \text{ Э}$ , т. е. по отношению к сплавам  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  петля гистерезиса уже почти на три порядка.

Характер перехода АФМ  $\rightleftharpoons$  ФМ является достаточно необычным и, естественно, должен связываться с изменением результирующей намагниченности в подрешетке Mn.

Магнитная структура кристаллов данного типа (кристаллическая структура типа  $CeGa_2Al_2$ , сверхструктура к  $BaAl_4$ ) образована слоистой подрешеткой марганца. Слои атомов Mn расположены перпендикулярно оси  $z$ , расстояние между атомами Mn, находящимися в одном слое,  $\approx 0.3$  нм, в различных слоях  $\approx 0.5$  нм. Упорядочение ЛММ атомов Mn, расположенных в одном слое, всегда имеет ферромагнитный характер, а в различных слоях может

быть ферро- или антиферромагнитным в зависимости от состава кристалла [5].

Изменение результирующей намагниченности в подрешетке марганца сплавов переменного состава  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  при взаимном замещении  $Mn \rightleftharpoons Si$  может быть обусловлен различными причинами, среди которых можно выделить две.

При замещении  $Mn \rightarrow Si$  число атомов Mn в различных слоях может становиться неодинаковым, в результате чего суммарная намагниченность подрешетки Mn будет отличаться от нуля и иметь ферромагнитный характер. Однако этот вариант не объясняет АФМ типа упорядочения при обратном замещении  $Si \rightarrow Mn$ . Кроме того, в этом случае расчетная удельная намагниченность кристалла в 3 раза превышает экспериментальную.

Другое возможное объяснение может быть связано с наличием дополнительной намагниченности сплавов  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  вследствие появления неколлинеарности ЛММ части атомов Mn. На рис. 6 приведены схематическое изображение слоев атомов Mn в сплавах  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  и случай замещения одного из атомов марганца кремнием. Фрагмент решетки, состоящий из атомов Si (в позиции атома Mn) и расположенных вблизи него четырех атомов Mn, условно можно назвать кластером.

Объяснить факт появления ферромагнитной составляющей в подрешетке Mn можно только в том случае, если предположить появление неколлинеарности ЛММ части атомов Mn, расположенных именно в данном кластере. При этом

Таблица 2

Тип магнитного упорядочения, парамагнитная температура Кюри  $\theta_{пм}$ , величины эффективного магнитного момента в парамагнитной области  $\mu_{эфф}$  для всех сплавов  $CeMn_{2-x}Si_{2+x}$  на формульную единицу, а также на атом Mn  $\mu_{эфф}$  и на число замещенных атомов  $Mn \rightarrow Si$   $\mu_{эфф}'''$  для ферромагнитных сплавов

Состав	Тип магнитного упорядочения сплава	$\theta_{пм}$ , К	$\mu_{эфф}$ , $\mu_B$	$\mu_{эфф}'' \cdot 10^2$ , $\mu_B$	$\mu_{эфф}'''$ , $\mu_B$
$CeMn_{1.75}Si_{2.25}$	ФМ	374	3.70	4.4	0.35
$CeMn_{1.80}Si_{2.20}$	ФМ	356	3.63	3.9	0.39
$CeMn_{1.85}Si_{2.15}$	ФМ	349	3.64	2.4	0.33
$CeMn_{1.90}Si_{2.10}$	ФМ	347	3.62	1.6	0.33
$CeMn_{1.95}Si_{2.05}$	ФМ	335	3.75	0.9	0.38
$CeMn_{2.00}Si_{2.00}$	АФМ	326	4.02	—	—
$CeMn_{2.05}Si_{1.95}$	АФМ	318	4.10	—	—
$CeMn_{2.10}Si_{1.90}$	АФМ	316	4.41	—	—

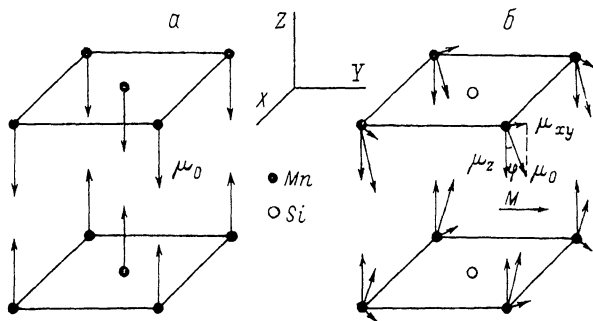


Рис. 6. Схема возможного расположения локализованных магнитных моментов атомов Mn в слоях кристаллической структуры  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  для объяснения антиферро- (а) и ферромагнитного (б) поведения результирующей намагниченности.

Возникновение слабого ферромагнетизма обусловлено составляющей намагниченности  $M$  в плоскости  $(001)$ .

взаимодействие атомов Mn, расположенных в кластерах, приводит к соответствующему направлению магнитных моментов атомов Mn, как это показано на рис. 6. В представленном варианте магнитной структуры векторы намагниченности по оси  $z$  компенсируются, а по осям  $x$  и  $y$  суммируются.

Экспериментальные данные показывают, что величина удельной намагниченности насыщения сплавов  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  прямо пропорциональна степени замещения  $\text{Mn} \rightarrow \text{Si}$ , т. е. числу таких кластеров. Величина магнитного момента, приходящегося на один кластер, составляет  $\approx 0.35 \mu_B$  (табл. 2). Оценка угла отклонения  $\varphi$  вектора намагниченности атомов Mn в кластере от оси  $z$  дает  $3-4^\circ$ .

Обсуждаемая причина появления ферромагнетизма в тройных сплавах  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  согласуется с теоретическими представлениями о возможной роли анизотропных взаимодействий (в отличие от изотропных взаимодействий, имеющих неэлектростатический характер) в изменении взаимной ориентации магнитных подрешеток в антиферромагнитных структурах [14]. Такая ситуация возможна в одноосных антиферромагнетиках, в том числе в кристаллах с тетрагональной симметрией, к которым относятся сплавы  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$ . Анизотропия взаимодействий между атомами Mn, находящимися в одном слое, может быть обусловлена изменением энергии и направления химических связей Mn—Si вблизи атома Si, занявшего позицию Mn.

Проведенные исследования сплавов  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  показали, что они характеризуются сложным электронным спектром, формируемым вблизи уровня Ферми как  $f$ -, так и  $d$ -состояниями. Сравнение величин плотности электронных состояний, задаваемых в соединениях данного типа на уровне Ферми  $f$ - и  $d$ -состояниями, показало, что для всех сплавов выполняется условие  $N_f(\epsilon) > N_d(\epsilon_F)$ , поскольку теоретические расчеты [15] дают следующие величины: для  $\text{YMn}_2\text{Ge}_2$  с АФМ упорядочением  $N_d(\epsilon_F) = 5.8$  сост./эВ элем. яч., в ферромагнетике  $\text{LaMn}_2\text{Ge}_2 - 10.3$  сост./эВ элем. яч. В сплавах  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  вследствие наличия церия в состоянии ПВ происходит увеличение электронной плотности на уровне Ферми до  $\approx 40$  сост./эВ элем. яч. Для сравнения в парамагнетике  $\text{LaCo}_2\text{Ge}_2$   $N_d(\epsilon_F) = 3$  сост./эВ элем. яч.

Таким образом, в кристаллах соединения переменного состава  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$  при замещении  $\text{Mn} \rightleftharpoons \text{Si}$  происходит не только изменение параметров состояния переменной валентности церия, но и изменение результирующей намагниченности слоистой подрешетки марганца. Подобные кристаллы представляют большой интерес для исследования взаимосвязи внутрикристаллических магнитных полей и эффектов переноса в металлических системах с резонансными электронными

состояниями вблизи уровня Ферми, возникающих при эффектах переменной валентности и Кондо-системы. Существенную роль при этом могут играть локальные корреляционные эффекты в  $d$ - и  $f$ -электронных подсистемах; поэтому большой интерес представляет выращивание и исследование монокристаллов соединения  $\text{CeMn}_{2-x}\text{Si}_{2+x}$ , в которых вследствие сильных корреляционных эффектов возможна существенная анизотропия электронных транспортных свойств.

Авторы выражают признательность А. А. Марковскому за помощь в работе.

#### Список литературы

- [1] Хомский Д. И. // УФН. 1979. Т. 129. № 3. С. 443—485.
- [2] Мошалков В. В., Брандт Н. Б. // УФН. 1986. Т. 149. № 4. С. 585—634.
- [3] Левин Е. М., Морохивский Б. С. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 1. С. 116—121.
- [4] Liang G., Perez I., DiMarzio D., Croft M., Johnston D. C., Anbalagan N., Mihalisin T. // Phys. Rev. B. 1989. V. 37. N 10. P. 5970—5973.
- [5] Leciejewich J., Szytula A. // Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa—KraKow, 1987. 99 p.
- [6] Narasimhan K. S. V. L., Rao V. U. S., Bergner R. L., Wallace W. E. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 11. P. 4957—4960.
- [7] Финкельштейн Л. Д., Самсонова Н. Д., Левин Е. М. // ФММ. 1985. Т. 59. № 5. С. 1036—1038.
- [8] Ammarguella C., Godart C., Haen P., Krill G. // Theor. and Exp. Aspects Valence Fluctuations and Heavy Fermions. Proc. 5th Int. Conf. Bangalore, 1987. P. 455—458.
- [9] Ansari P. H., Liang B. Qi. G., Perez F. Lu., Croft M. // J. Appl. Phys. 1988. V. 68. N 8. P. 3503—3505.
- [10] Пирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. М.: Мир, 1977. 419 с.
- [11] Sales B. C., Viswanathan R. // J. Low Temp. Phys. 1976. V. 23. N 3/4. P. 449—467.
- [12] Newns D. M., Hewson A. S. // J. Phys. F: Metal Phys. 1981. V. 10. N 11. P. 2429—2445.
- [13] Левин Е. М., Кужель Б. С. // УФЖ. 1990. Т. 35. № 3. С. 430—434.
- [14] Тузов Е. А. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1969.
- [15] Ishida S., Asano S., Ishida J. // J. of the Physical Society of Japan. 1986. V. 55. N 3. P. 936—945.

Львовский государственный университет  
им. И. Франко

Поступило в Редакцию  
1 октября 1991 г.