

УДК 537.622

©1994

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Mn_{2-x}Zn_xSb$ ($0 \leq x \leq 1.0$)

В.П.Дымонт, Г.И.Маковецкий, В.М.Рыжковский

Проведено комплексное исследование системы твердых растворов $Mn_{2-x}Zn_xSb$ ($0 \leq x \leq 1.0$). Результаты обобщены в виде магнитной фазовой диаграммы. Показано, что в области концентрации цинка $0.03 \leq x \leq 0.3$ при низких температурах реализуются различные типы магнитных структур. Предложены модели магнитного упорядочения сплавов $Mn_{1.5}Zn_{0.5}Sb$ и $MnZnSb$, непротиворечиво объясняющие наблюдаемые физические свойства.

Материалы с тетрагональной кристаллической структурой типа Cu_2Sb ($C38$, пространственная группа $P4/nmm$), к которым принадлежит соединение Mn_2Sb , отличаются большим разнообразием магнитных свойств. Это в значительной мере связано с особенностями самой структуры, имеющей слоевой характер с двумя структурно-неэквивалентными позициями $2a$ (I) и $2c$ (II), занимаемыми атомами металла (рис. 1,а). Обменные взаимодействия магнитоактивных атомов в такой структуре имеют конкурирующий характер и сильно зависят от межатомных расстояний, углов связей и других структурных параметров.

При образовании твердых растворов замещения на основе соединений этого структурного типа изменяются структурные характеристики материала за счет химического сжатия или расширения решетки, действуют дополнительные факторы, связанные с природой замещающего элемента и занимаемой им структурной позицией, что в результате приводит к изменению его магнитных свойств. Поэтому исследование указанных твердых растворов, с одной стороны, представляется важным как источник ценной дополнительной информации о природе магнитного состояния материалов с такой структурой, а с другой — служит практическим целям, связанным с поиском новых магнитных материалов.

Исходное соединение Mn_2Sb является ферримагнетиком во всем температурном интервале магнитного упорядочения ($T_k = 550$ K). Твердые растворы замещения на основе Mn_2Sb по своим магнитным характеристикам как количественно, так и качественно существенно отличаются от исходной матрицы. В частности, в некоторых из них в определенном температурном интервале меняется характер магнитного упорядочения — происходит фазовый переход ферримагнетик-антиферромагнетик ($F_i \rightleftharpoons AF$) [1].

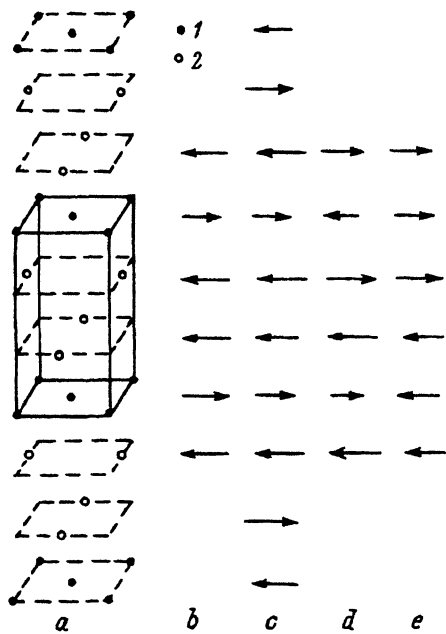


Рис. 1. Кристаллическая структура соединения Mn_2Sb (a) и схематическое изображение магнитных структур: ферромагнитной F ; (b), слабоферромагнитной I_f (c), антиферромагнитной AFI (d), антиферромагнитной $AFII$ (e). 1,2 — Mn в структурном положении Mn I и Mn II соответственно. Атомы Sb для простоты не показаны.

В ряду твердых растворов замещения на основе Mn_2Sb сплавы системы $Mn_{2-x}Zn_xSb$ представляют повышенный интерес прежде всего как очень удобные модельные объекты для исследования, что обусловлено двумя основными причинами.

1) В системе образуется широкий ряд изоструктурных твердых растворов (вплоть до эквиатомного состава $MnZnSb$) и соответственно в широких пределах изменяются структурные параметры [2,3].

2) Немагнитный цинк замещает марганец в подрешетке II [4], «разбавляя» ее, чем вносит существенные изменения в характер обменных взаимодействий в системе.

Используя комплексный метод исследования (магнитометрия, нейтронография, рентгеновский анализ, электрические измерения, термический анализ), мы провели изучение кристаллохимических и магнитных свойств твердых растворов системы $Mn_{2-x}Zn_xSb$ ($0 \leq x \leq 1.0$) в интервале температур от 4.2 до 650 К. В настоящей работе систематизированы и дополнены новыми результаты выполненных ранее исследований [5-8], что позволило обобщить их в виде фазовой диаграммы магнитного состояния системы в координатах «состав-температура».

1. Методика и результаты эксперимента

а) Получение образцов. Рентгенографический и термический анализы. Сплавы системы были получены методом прямого сплавления порошков исходных компонентов в вакуумированных кварцевых ампулах с использованием алундовых тиглей. Ампулы помещались в печь, температура которой медленно повышалась до 1220 К с промежуточной выдержкой в течение 15 h при 950 К.

При 1220 К ампулы выдерживались в течение 2–3 h для завершения реакции образования твердых растворов, а затем охлаждались вместе с печью. Полученные слитки растирались в порошок, прессовались и подвергались гомогенизирующему отжигу при температуре 800 К в течение 50–70 h.

Рентгенографический анализ образцов проведен на аппарате ДРОН-3 при использовании $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Из данных рентгенографического анализа при $T = 293 \text{ K}$ следует, что в системе $\text{Mn}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$ образуется протяженный ряд твердых растворов до эквиатомного состава MnZnSb с тетрагональной кристаллической структурой типа Cu_2Sb в соответствии с более ранними результатами [2,3]. Отличительной чертой исследуемой системы является уменьшение параметра кристаллической решетки c от 0.6521 до 0.6254 nm и увеличение параметра a от 0.4083 до 0.4165 nm при возрастании концентрации цинка в сплаве. При этом объем элементарной ячейки остается практически неизменным.

Для сплава эквиатомного состава исследована температурная зависимость параметров c и a . В ходе зависимостей $c(T)$ и $a(T)$ наблюдаются аномалии в области температур 320 и 550 К. Эти аномалии связаны с магнитными превращениями в сплаве, о чем будет идти речь ниже.

Методом дифференциального термического анализа установлено, что температура плавления сплавов монотонно уменьшается от 1218 К для Mn_2Sb до 934 К для MnZnSb .

б) Магнитные и электрические измерения. Намагниченность σ и магнитная восприимчивость χ образцов измерялись по методу Фарадея в постоянном поле 357 kA/m при температурах от 80 до 600 К. Измерения зависимости намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля выполнены в полях до 1.27 MA/m. При измерении магнитной проницаемости μ использовался индукционный метод. Электросопротивление образцов измерялось двухзондовым методом на постоянном токе при $T = 4.2 \div 250 \text{ K}$.

Из магнитных измерений следует, что с увеличением концентрации цинка в сплавах до $x = 0.5$ удельная намагниченность σ уменьшается, а затем начинает возрастать. Зависимость среднего магнитного момента на молекулу от содержания цинка в сплаве при $T = 140 \text{ K}$ представлена на рис. 2. Ход зависимости подтверждает полученный из нейтронографических измерений результат [4], свидетельствующий о том, что в сплавах системы марганец и цинк в основном упорядоченно располагаются в структурных положениях I и II соответственно. При содержании цинка $0 < x \leq 0.3$ в температурной области ниже 120 К наблюдается резкое уменьшение удельной намагниченности, связанное с магнитным фазовым переходом типа порядок–порядок из ферримагнитного состояния в антиферромагнитное.

В твердых растворах на основе Mn_2Sb фазовый переход $F_i \rightleftharpoons AF$ сопровождается аномальным поведением температурной зависимости электросопротивления материала [9], что позволяет использовать электрические измерения для идентификации этого магнитного превращения. Из температурных зависимостей электросопротивления для сплавов с $x \leq 0.3$, где были обнаружены характерные аномалии, определены температуры фазового перехода $F_i \rightleftharpoons AF$, которые хоро-

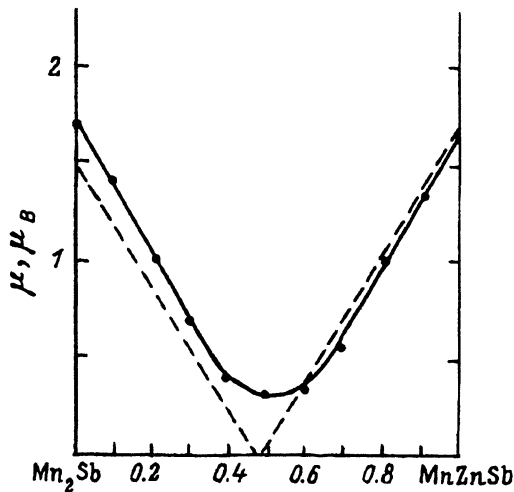


Рис. 2. Зависимость среднего магнитного момента на молекулу от содержания цинка. Штриховая линия — расчет.

по согласуются с соответствующими температурами, полученными из магнитных измерений.

В ряде сплавов системы ($x < 0.3$) по аналогии с исходным соединением Mn_2Sb при понижении температуры наблюдается спин-переориентационный переход $F_i^+ \rightarrow F_i^-$, связанный с разворотом атомных магнитных моментов из направления, параллельного тетрагональной оси c , в базисную плоскость. Этот переход очень четко фиксируется по аномалиям на температурных кривых магнитной проницаемости μ [10], что было использовано в настоящей работе для определения температур спиновой переориентации в образцах различных составов.

Для сплава $MnZnSb$ и близких ему по составу спонтанная намагниченность σ исчезает при 320–340 К. При этом температурная зависимость σ характеризуется резким отклонением ее от теоретической (бриллюэновской) кривой — в сравнительно узком интервале температур (290–320 К) уменьшается на 75–80% по отношению к σ_0 . Измерения магнитной восприимчивости показывают, что в области температур 320–550 К проявляется аномальный ее ход, существенно зависящий от времени выдержки при температуре измерения.

Так как атом Zn не имеет магнитного момента, магнитные свойства $MnZnSb$ определяются магнитоактивными атомами марганца, находящимися в структурном положении I. Исходя из этого, можно считать, что сплав $MnZnSb$ является ферромагнетиком. Однако ряд экспериментальных фактов не находит объяснения в рамках модели простого ферромагнетика. Кроме отмеченных выше результатов, нехарактерной является и зависимость намагниченности σ от внешнего магнитного поля. Начиная с некоторой величины напряженности магнитного поля, наблюдается значительный рост намагниченности — при увеличении поля от 397 до 1.27 МА/м намагниченность возрастает от 38 до 58 А · м²/кг при температуре 280 К [11].

с) Нейтроннографический анализ. Нейтроннографические измерения выполнены на нейтронном дифрактометре Института физики металлов Уральского отделения РАН в диапазоне

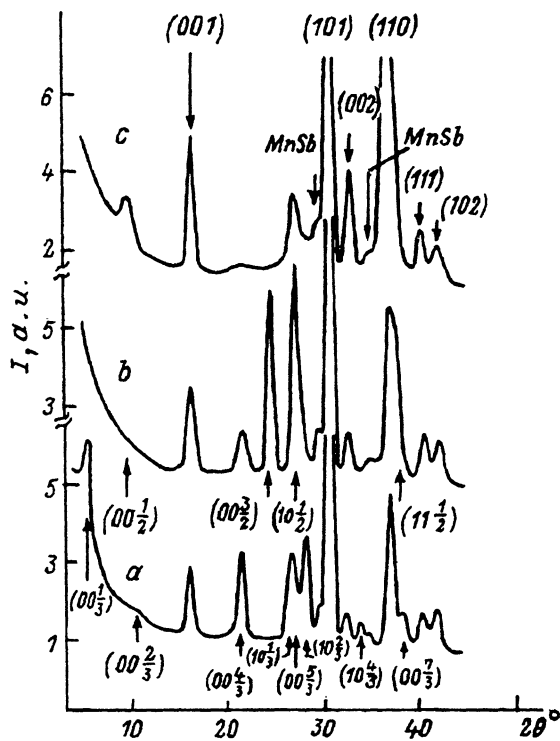


Рис. 3. Нейтронограммы сплавов системы $Mn_{2-x}Zn_xSb$. $x = 0.05$ (a), 0.1 (b), 0.3 (c).

температур 4.2–400 К на поликристаллических образцах. Длина волны монохроматизированных нейтронов $\lambda = 0.181$ нм.

Подтверждена антиферромагнитная природа магнитного упорядочения при низких температурах в сплавах $Mn_{2-x}Zn_xSb$ ($0 < x \leq 0.3$), испытывающих магнитное фазовое превращение типа порядок–порядок. На рис. 3 представлены нейтронограммы образцов с различным содержанием цинка, полученные при $T = 4.2$ К, т. е. в области, где, по данным магнитных и электрических измерений, образцы находятся в антиферромагнитном состоянии. На всех нейтронограммах, кроме ядерных, присутствуют дополнительные магнитные рефлексы, обусловленные антиферромагнитным упорядочением магнитных моментов атомов с ячейкой, не совпадающей по размерам с кристаллической. Однако при этом дифракционные картины существенно различаются для образцов разных составов, что свидетельствует о различии их магнитных структур. Расчет и сопоставление с экспериментом угловых положений магнитных рефлексов и величин структурных амплитуд магнитного рассеяния для наиболее вероятных моделей магнитных структур позволили сделать следующие заключения.

В сплаве $Mn_{1.95}Zn_{0.05}Sb$ при низких температурах реализуется слабоферромагнитная структура I_f с утроенной вдоль оси с магнитной ячейкой по сравнению с кристаллической (рис. 1, c), аналогичная наблюдавшейся ранее в системе $Mn_{2-x}Cr_xSb$ при $x = 0.03$ [12]. Магнитные моменты лежат в базисной плоскости решетки.

Магнитные рефлексы на нейтронограмме $Mn_{1.9}Zn_{0.1}Sb$ индицируются на основе антиферромагнитной структуры AFI с удвоенной по оси с

решеткой (рис. 1, *d*). При этом, кроме рефлексов, соответствующих структуре AFI , присутствуют рефлексы, по угловому положению соответствующие утроенной структуре I_f . Характерно, что состояние I_f не является промежуточным между антиферромагнитным AFI и ферримагнитным F_i , как в случае $Mn_2(Cr)Sb$, а существует одновременно с AFI в интервале температур от 4.2 К до температуры перехода в ферримагнитное состояние.

Для сплава с содержанием цинка $x = 0.3$ магнитная часть нейтронограммы качественно отличается от нейтронограмм сплавов $Mn_{1.9}Zn_{0.1}Sb$ и $Mn_{1.8}Zn_{0.2}Sb$. Анализ показывает, что в этом сплаве при низких температурах реализуется антиферромагнитная структура с магнитной ячейкой, удвоенной по оси c по отношению к кристаллической, но отличающаяся от AFI взаимной ориентацией магнитных моментов атомов марганца в плоскостях, параллельных базисной плоскости. Эта антиферромагнитная структура аналогична структуре соединения Fe_2As ($AFII$) — рис. 1, *e*.

Чтобы получить количественное соответствие между интенсивностями магнитных рефлексов, рассчитанными исходя из указанных моделей и экспериментально наблюдаемыми (фактор расходимости 7–8%), следует предположить, что с увеличением содержания цинка магнитные моменты марганца разворачиваются из базисной плоскости к оси c . Для образцов состава $Mn_{1.9}Zn_{0.1}Sb$ угол магнитного момента с осью c составляет 50° , для состава $Mn_{1.7}Zn_{0.3}Sb$ этот угол равен 10° . Кстати, это обстоятельство объясняет, почему, по данным магнитных измерений, спин-переориентационный переход в сплаве $Mn_{1.7}Zn_{0.3}Sb$ не наблюдается.

Таким образом, нейтронографические измерения подтвердили, что в твердых растворах $Mn_{2-x}Zn_xSb$ при $x \leq 0.3$ в области низких температур ($T < 110$ К) происходит фазовый переход из ферримагнитного состояния в антиферромагнитное ($F_i \rightleftharpoons AF$), при этом в антиферромагнитной области имеют место концентрационные фазовые переходы, связанные с перестройкой магнитной структуры при сохранении антиферромагнитного упорядочения.

По данным магнитных и электрических измерений, фазовый переход $F_i \rightleftharpoons AF$ при $x > 0.3$ не наблюдается. Однако на нейтронограмме сплава $Mn_{1.5}Zn_{0.5}Sb$, имеющего минимальную величину намагниченности, отмечены сравнительно слабые сверхструктурные рефлексы, соответствующие антиферромагнитной структуре типа Fe_2As ($AFII$). Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод о реализации в сплаве $Mn_{1.5}Zn_{0.5}Sb$ неколлинеарной магнитной структуры с антиферромагнитной составляющей. Ее схематическое изображение представлено на рис. 4.

Магнитная ячейка сплава эквиатомного состава $MnZnSb$ совпадает по размерам с кристаллической, на что указывает отсутствие сверхструктурных рефлексов на нейтронограммах в диапазоне температур 4.2–320 К. Анализ температурной зависимости интенсивностей ряда рефлексов позволяет сделать вывод, что магнитные моменты в сплаве $MnZnSb$ направлены вдоль тетрагональной оси кристалла во всем исследованном интервале температур. Выше температуры исчезновения спонтанной намагниченности (320 К) дальнейший магнитный порядок в сплаве обнаружить не удалось.

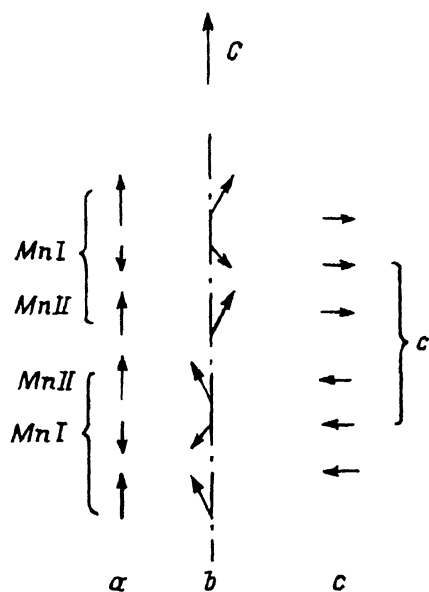


Рис. 4. Схематическое изображение магнитной структуры сплава $Mn_{1.5}Zn_{0.5}Sb$.

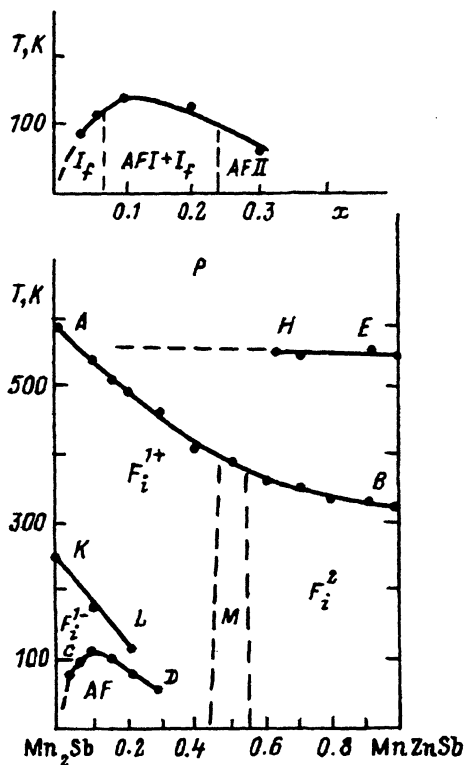


Рис. 5. Магнитная фазовая диаграмма системы твердых растворов $Mn_{2-x}Zn_xSb$.

2. Обсуждение результатов

На рис. 5 представлена магнитная фазовая диаграмма системы твердых растворов $Mn_{2-x}Zn_xSb$ ($0 \leq x \leq 1.0$), построенная по результатам выполненных исследований. В обобщенном виде ее можно охарактеризовать следующим образом. F_i^1 и F_i^2 — области ферримагнитного упорядочения, в которых результирующая намагниченность определяется атомами $MnII$ и MnI соответственно. Линия KL соответствует температурам спин-переориентационного перехода в ферримагнитном состоянии F_i^1 (F_i^{1+} — моменты направлены вдоль оси c , F_i^{1-} — моменты лежат в базисной плоскости решетки). Ниже линии CD в сплавах с $x \leq 0.3$ реализуются магнитоупорядоченные состояния с различными в зависимости от концентрации цинка магнитными ячейками, не совпадающими по размерам с кристаллической. Вблизи состава с $x = 0.5$ в сплавах существует неколлинеарная магнитная структура (область M). AB — линия исчезновения спонтанной намагниченности, выше которой до перехода в разупорядоченное парамагнитное состояние (линия EH) существуют магнитоупорядоченные кластеры, определяющие наблюдаемые особенности магнитного состояния.

Характерной особенностью исследованной системы является то, что в ней при увеличении содержания цинка в сплавах от $x = 0.05$

до $x = 0.3$ в низкотемпературной области происходят концентрационные магнитные фазовые переходы от слабоферромагнитной I_f к антиферромагнитной структуре типа AFI , а затем к антиферромагнитной структуре $AFII$. Такой ряд концентрационных магнитных переходов не имеет аналогов в других твердых растворах на основе Mn_2Sb .

При обсуждении механизма магнитных переходов порядок-порядок в твердых растворах на основе Mn_2Sb обычно принято выделять в структуре трехслойные блоки $MnII$ - MnI - $MnII$ (рис. 4,а) и рассматривать обменные связи между ними, предполагая, что они определяют характер реализующейся магнитной структуры. Впервые это сделал Киттель [13] в своей известной обменно-инверсной теории фазовых переходов $F_i \rightleftharpoons AF$. Такой подход в ряде случаев оправдан, особенно при качественных оценках, так как внутриблочные обменные взаимодействия в Mn_2Sb по величине в несколько раз превосходят межблочные, существенно различаются и межатомные расстояния. Переход $F_i \rightleftharpoons AF$ проявляется в изменении взаимной ориентации результирующих магнитных моментов блоков. Обменные взаимодействия внутри блоков считаются неизменными, а роль замещающего элемента сводится к уменьшению параметра решетки c для достижения критического значения c_{cr} , при котором обменное взаимодействие изменяет знак. Однако в сплавах $Mn_2(Zn)Sb$ происходит замещение магнитоактивных атомов $MnII$ немагнитными атомами цинка, что приводит к изменению эффективных магнитных параметров внутри блоков и через них оказывает влияние на магнитную подсистему в целом. В частности, этим, как мы полагаем, объясняется переход при увеличении концентрации цинка от структуры AFI к структуре $AFII$, отличающихся именно внутриблочным магнитным упорядочением. В подтверждение сказанному отметим работу [14], в которой показано, что учет зависимости эффективных параметров обменного взаимодействия от расстояния вдоль оси c не только между указанными трехслойными блоками марганца, но и внутри их дает неодинаковый вклад в термодинамический потенциал для различных магнитных фаз.

Принимая во внимание изменение как межблочных, так и внутриблочных обменных взаимодействий, можно объяснить и немонотонную зависимость температуры перехода $F_i \rightleftharpoons AF$ от состава при практически линейном уменьшении параметра c в сплавах $Mn_2(Zn)Sb$. Наблюдаемая экспериментальная зависимость $T_i(x)$ описывается многочленом вида $T_i = 99.8 + 140x - 580x^2$. Ее можно интерпретировать как суперпозицию двух составляющих, первая из которых пропорциональна концентрации цинка x и определяется зависимостью межблочного обменного взаимодействия от параметра решетки c ; вторая составляющая пропорциональна $(-x^2)$ и является результатом изменения обменных взаимодействий в системе вследствие замещения марганца цинком в структурном положении $MnII$.

В концентрационной области вблизи $x = 0.5$ реализуется неколлинеарная магнитная структура (рис. 4). Так как цинк замещает марганец в структурном положении II , а магнитный момент $MnII$ по величине приблизительно в два раза больше магнитного момента MnI [15], то вблизи концентрации цинка $x = 0.5$ результирующие магнитные моменты трехслойных блоков близки к нулю, т.е. в этом случае мы должны иметь своеобразный антиферромагнетик с магнитной ячейкой, совпа-

дающей по размерам с кристаллической. Однако теоретически показано, что при наличии больших отрицательных внутрислоедреточных взаимодействий в антиферромагнетике каждая из подрешеток может разбиваться на две, намагниченности которых не антипараллельны. В нашем случае это приводит к появлению нескомпенсированного магнитного момента у трехслойного блока с реализацией неколлинеарной магнитной структуры. При этом проекции магнитных моментов MnI и MnII на базисную плоскость образуют магнитную структуру, аналогичную магнитной структуре Fe₂As (AFII).

Особенности в поведении магнитных свойств сплавов эквиатомного состава и близких к нему обусловлены существованием в основной матрице магнитоупорядоченных кластеров, что связано с «разбавлением» подрешетки II немагнитным цинком. Цинк, замещая марганец в узлах II, приводит к ослаблению и фрустрации некоторых связей в структуре, создавая условия для образования отдельных магнитоупорядоченных кластеров MnI и MnII.

В самом сплаве эквиатомного состава MnZnSb имеются локальные неоднородности в распределении атомов по подрешеткам и структурные вакансии [2], что также способствует появлению отдельных магнитоупорядоченных кластеров MnI–MnII с достаточно сильными обменными внутрикластерными связями. Предполагается, что магнитное упорядочение внутри кластеров аналогично существующему в Mn₂Sb. В районе 320 К дальний магнитный порядок, определяемый основной трехмерной магнитной структурой (магнитное упорядочение ферромагнитных слоев MnI), разрушается. Однако при этом остаются магнитоупорядоченные кластеры MnI–MnII, которые существуют как отдельные образования в матрице из неупорядоченных спинов остальных атомов марганца. Они и определяют небольшой результирующий момент при $T > 320$ К. При дальнейшем повышении температуры (вблизи $T = 550$ К) происходит полный переход магнитной системы в парамагнитное состояние. Наблюдаемая зависимость магнитных характеристик от времени измерения свидетельствует о медленно протекающих процессах установления равновесия в рассматриваемой температурной области, что характерно для кластерных магнитных систем.

С этих же позиций находит объяснение и зависимость намагниченности MnZnSb от напряженности магнитного поля. Под влиянием ферромагнитно упорядоченной матрицы результирующий момент кластера, определяемый MnII, ориентируется параллельно ее намагниченности. Это приводит к нарушению ферромагнитных связей в слое MnI на границе матрицы с кластером и образованию переходной области,

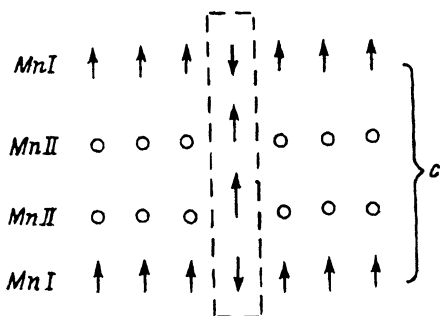


Рис. 6. Модель магнитной структуры сплава эквиатомного состава MnZnSb.

подобной доменной стенке в ферромагнетиках. Под действием внешнего магнитного поля происходит переориентация магнитных моментов MnI в переходной области, в результате чего намагниченность сплава возрастает. Схематично такой характер упорядочения — ферромагнитная матрица с ферримагнитными кластерами — изображены на рис. 6.

Таким образом, замещение марганца в матрице Mn_2Sb немагнитным цинком в широком концентрационном интервале вносит существенные изменения в характер обменных взаимодействий в системе твердых растворов $Mn_{2-x}Zn_xSb$, что приводит к появлению ряда новых особенностей их магнитного состояния.

В заключение авторы благодарят З.Л. Ерофеевко за участие в проведении некоторых измерений, а также А.З. Меньшикова и Ю.А. Дорофеева за помощь в организации и проведении нейтронографического эксперимента.

Список литературы

- [1] Bither T.A., Walter P.H.L., Cloud W.H. et al. // J. Appl. Phys. 1962. Suppl. 33. N 3. P. 1346–1347.
- [2] Johnson V., Jeitschenko W. // J. Solid State Chem. 1977. V. 22. N 1. P. 71–75.
- [3] Маковецкий Г.И., Рыжковский В.М., Дымонт В.П., Ерофеевко З.Л. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1981. № 4. С. 98–100.
- [4] Dymont V.P., Makovetskii G.I., Ryzhkovskii V.M. // Phys. Stat. Sol. (a). 1988. V. 107. P. K89–K91.
- [5] Маковецкий Г.И., Рыжковский В.М., Дымонт В.П., Ерофеевко З.Л. // ДАН БССР. 1988. Т. 32. № 6. С. 508–510.
- [6] Маковецкий Г.И., Рыжковский В.М., Дымонт В.П., Ерофеевко З.Л. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 12. С. 3703–3705.
- [7] Маковецкий Г.И., Рыжковский В.М., Дымонт В.П., Дорофеев Ю.А. // ДАН БССР. 1989. Т. 33. № 9. С. 795–798.
- [8] Дымонт В.П., Маковецкий Г.И., Рыжковский В.М. // ДАН РБ. 1993. Т. 37. № 2. С. 140–142.
- [9] Bierstedt P.E. // Phys. Rev. 1969. V. 132. N 2. P. 669–673.
- [10] Kanomata T., Ito T., Hasebe Y. et al. // J. Magn. and Magn. Mater. 1990. V. 90, 91. P. 719–720.
- [11] Dymont V.P., Makovetskii G.I., Ryzhkovskii V.M. // 4th International Conferens of Phys. of the Magnetic Materials. Poland, September, 1988. P. 146.
- [12] Cloud W.H., Jarret H.S., Austin A.E., Adelson E. // Phys. Rev. 1960. V. 120. N 6. P. 1969–1970.
- [13] Kittel C. // Phys. Rev. 1960. V. 120. N 2. P. 335–342.
- [14] Вальков В.И., Завадский Э.А., Кирбитов В.М. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 5. С. 1513–1517.
- [15] Сирота Н.Н., Рыжковский В.М. // ФТТ. 1974. Т. 16. № 9. С. 2643–2647.

Институт физики твердого тела
и полупроводников АН Беларуси
Минск

Поступило в Редакцию
7 февраля 1994 г.