

Фазовая диаграмма сплавов Гейслера с инверсией обменного взаимодействия

В. Д. Бучельников¹⁾⁺, С. В. Таскаев⁺, М. А. Загребин⁺, П. Энтель^{2)*}

⁺Челябинский государственный университет, 454021 Челябинск, Россия

^{*}Physics Department, University of Duisburg-Essen, Campus 47048 Duisburg, Germany

Поступила в редакцию 5 апреля 2007 г.

На основе феноменологической теории фазовых переходов Ландау исследованы фазовые диаграммы магнитоупорядоченных сплавов Гейслера с инверсией обменного взаимодействия. Показано, что в таких сплавах вид фазовых диаграмм зависит от величины и знаков феноменологических параметров функционала Ландау. При определенных значениях и знаках параметров функционала Ландау на фазовых диаграммах существуют термодинамические пути, которые позволяют объяснить наблюдаемые экспериментально последовательности фазовых переходов в сплавах Гейслера.

PACS: 75.30.Kz, 75.50.-y, 75.80.+q

Интерес к исследованию свойств ферромагнитных (ФМ) сплавов Гейслера до сих пор не ослабевает вследствие того, что они обладают эффектом памяти формы в ФМ состоянии и гигантским магнитокалорическим эффектом [1, 2]. На настоящий момент наиболее изучены свойства сплавов Гейслера Ni-Mn-Ga. В данных сплавах происходят структурный (мартенситный) фазовый переход из высокотемпературной кубической (аустенитной) фазы в низкотемпературную тетрагональную (мартенситную) фазу, а также магнитный фазовый переход из парамагнитной в ФМ фазу. При этом мартенситный переход может иметь место как при температуре выше температуры Кюри, так и при температуре ниже ее. При некоторых композициях структурный и магнитный фазовые переходы совпадают [3, 4]. В этом случае указанные выше свойства сплавов Ni-Mn-Ga проявляются наиболее ярко.

Недавно было обнаружено, что в некоторых сплавах Гейслера, кроме магнитного фазового перехода из парамагнитной фазы в ФМ фазу, может иметь место структурный фазовый переход, который сопровождается переходом из ФМ фазы в антиферромагнитную (АФМ) фазу. Такая ситуация, по-видимому, наблюдается в сплаве Гейслера Ni₄₅Co₅Mn_{36.6}In_{13.4} [5].

Фазовые диаграммы сплавов Ni-Mn-Ga уже достаточно подробно изучены [4, 6]. При теоретическом исследовании фазовых переходов в сплавах Ni-Mn-Ga полагалось, что в магнитоупорядоченных фазах знак обменного взаимодействия не изменяется, то есть все

структурные фазы являются ФМ фазами. Известно, что существуют вещества, в которых магнитоупругое взаимодействие может приводить к изменению (инверсии) знака обменного взаимодействия [5, 7–9]. В таких веществах при понижении температуры происходит фазовый переход из ФМ фазы в АФМ фазу. В сплавах Гейслера этот переход сопровождается структурным фазовым переходом.

В данной работе с помощью теории фазовых переходов Ландау исследуются фазовые диаграммы сплавов Гейслера, в которых может иметь место инверсия обменного взаимодействия.

Рассмотрим двухподрешеточный АФМ кубической симметрии. Плотность свободной энергии АФМ можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 F = & \tilde{A}\mathbf{L}^2/2 + \tilde{B}\mathbf{L}^4/4 + \tilde{A}_1\mathbf{M}^2/2 + \tilde{D}(\mathbf{ML})^2/2 + \\
 & + \tilde{D}'\mathbf{M}^2\mathbf{L}^2/2 + K(L_x^2L_y^2 + L_y^2L_z^2 + L_x^2L_z^2) + \\
 & + K'(M_x^2M_y^2 + M_y^2M_z^2 + M_x^2M_z^2) - \mathbf{MH} + \\
 & + \tilde{B}_0e_1\mathbf{L}^2 + G_0e_1\mathbf{M}^2 + \\
 & + \tilde{B}_1[e_2(L_x^2 - L_y^2)/2 + e_3(3L_z^2 - \mathbf{L}^2)/\sqrt{6}] + \\
 & + G_1[e_2(M_x^2 - M_y^2)/2 + e_3(3M_z^2 - \mathbf{M}^2)/\sqrt{6}] + \\
 & + \tilde{B}_2[e_4L_xL_y + e_5L_yL_z + e_6L_xL_z] + \\
 & + G_2[e_4M_xM_y + e_5M_yM_z + e_6M_xM_z] - Ee_1 + E_0e_1^2/2 + \\
 & + a(e_2^2 + e_3^2)/2 + c_{44}(e_4^2 + e_5^2 + e_6^2) + E_1e_1(e_2^2 + e_3^2) + \\
 & + be_3(e_3^2 - 3e_2^2)/3 + c(e_2^2 + e_3^2)^2/4, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{A}_1 , \tilde{D} , \tilde{D}' ; K , K' ; \tilde{B}_i , G_i – параметры обменного взаимодействия, анизотропии и магнитострикции, $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2$, $\mathbf{L} = \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2$ – векторы ферро- и антиферромагнетизма, \mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_2 – векторы

¹⁾e-mail: buche@csu.ru

²⁾P. Entel.

намагниченности подрешеток, \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, e_i – линейные комбинации компонент тензора деформаций, $e_1 = (e_{xx} + e_{yy} + e_{zz})/\sqrt{3}$, $e_2 = (e_{xx} - e_{yy})/\sqrt{2}$, $e_3 = (2e_{zz} - e_{yy} - e_{xx})/\sqrt{6}$, $e_4 = e_{xy}$, $e_5 = e_{yz}$, $e_6 = e_{zx}$, E – коэффициент пропорциональный коэффициенту теплового расширения, $E_0 = (c_{11} + 2c_{12})/\sqrt{3}$ – модуль объемной упругости, a , b , E_1 , c – линейная комбинация упругих модулей второго, третьего и четвертого порядков, соответственно: $a = c_{11} - c_{12}$, $E_1 = (c_{111} - c_{123})/2\sqrt{3}$, $b = (c_{111} - 3c_{112} + 2c_{123})/6\sqrt{6}$, $c = (c_{1111} + 6c_{1112} - 3c_{1122} - 8c_{1123})/48$.

Рассмотрим случай, когда намагниченности подрешеток АФМ равны по модулю и постоянны: $\mathbf{M}_1^2 = \mathbf{M}_2^2 = \mathbf{M}_0^2$. При выполнении этого условия магнитную подсистему можно описывать с помощью одной переменной φ – углом между намагниченностями подрешеток АФМ. Для упрощения задачи ограничимся в данной работе изотропией в магнитной подсистеме, то есть пренебрежем в (1) магнитной анизотропией ($K = K' = 0$) и анизотропной магнитострикцией (\bar{B}_i , G_i , $i = 1, 2$). В таком приближении после минимизации энергии (1) по параметрам порядка e_1 , e_4 , e_5 , e_6 , не ответственным за рассматриваемые здесь фазовые переходы, исключения их из энергии (1) и введения угла φ , выражение для свободной энергии АФМ значительно упрощается и может быть записано в следующем виде:

$$F = A \cos \varphi + B \cos^2 \varphi + D \cos \varphi (e_2^2 + e_3^2)/2 + a(e_2^2 + e_3^2)/2 + b e_3 (e_3^2 - 3e_2^2)/3 + c(e_2^2 + e_3^2)^2/4. \quad (2)$$

Здесь параметры A , B и D , имеющие размерность плотности энергии, выражаются через безразмерные постоянные в плотности энергии (1) и квадрат модуля намагниченности насыщения M_0 . Для упрощения расчетов перейдем к безразмерным величинам. Для этого проведем следующее переопределение параметров и переменных в энергии (2):

$$\begin{aligned} \bar{F} &= c^3 F/b^4, \quad \bar{e}_{2,3} = c e_{2,3}/|b|, \quad \bar{A} = c^3 A/b^4, \\ \bar{B} &= c^3 B/b^4, \quad \bar{D} = b^2 D/c, \quad \bar{a} = c a/b^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Далее переобозначенные параметры и переменные приводятся без черточек над ними. Окончательное выражение для плотности свободной энергии примет вид

$$F = A \cos \varphi + B \cos^2 \varphi + D \cos \varphi (e_2^2 + e_3^2)/2 + a(e_2^2 + e_3^2)/2 + \text{sign } b e_3 (e_3^2 - 3e_2^2)/3 + (e_2^2 + e_3^2)^2/4. \quad (4)$$

Проведенное преобразование позволило исключить из выражения для энергии параметры c и b . Функция

$\text{sign } b$ необходима для учета знака параметра b . В дальнейшем примем, что обобщенный модуль упругости четвертого порядка $c > 0$.

Для нахождения всех равновесных состояний необходимо проминимизировать функционал (4) по оставшимся параметрам порядка $e_{2,3}$ и φ . В результате минимизации получаются 9 равновесных состояний, в которых может находиться рассматриваемая система, а именно:

1. АФМ кубическая фаза (FC)

$$\varphi = 0, \quad e_2 = e_3 = 0$$

устойчива при $A \leq -2B$, $a \geq -D$.

2. АФМ тетрагональная фаза (FT)

$$\varphi = 0, \quad e_2 = 0,$$

$$e_3 = e_T = \left(-\text{sign } b \pm \sqrt{1 - 4(a + D)} \right) / 2.$$

3. АФМ ромбическая фаза (FR)

$$\varphi = 0, \quad e_2^2 = 3e_3^2,$$

$$e_3 = e_R = \left(\text{sign } b \pm \sqrt{1 - 4(a + D)} \right) / 4.$$

Фазы FT и FR устойчивы при $A \leq -2B - (D/8) \left(1 + \sqrt{1 - 4(a + D)} \right)^2$, $a \leq 1/4 - D$.

4. АФМ кубическая фаза (AFC)

$$\varphi = \pi, \quad e_2 = e_3 = 0$$

устойчива при $A \geq 2B$, $a \geq D$.

5. АФМ тетрагональная фаза (AFT)

$$\varphi = \pi, \quad e_2 = 0,$$

$$e_3 = e_{AT} = \left(-\text{sign } b \pm \sqrt{1 - 4(a - D)} \right) / 2.$$

6. АФМ ромбическая фаза (AFR)

$$\varphi = \pi, \quad e_2^2 = 3e_3^2,$$

$$e_3 = e_{AR} = \left(\text{sign } b \pm \sqrt{1 - 4(a - D)} \right) / 4.$$

Фазы AFT и AFR устойчивы при $A \geq 2B - (D/8) \left(1 + \sqrt{1 - 4(a - D)} \right)^2$, $a \leq 1/4 + D$.

7. Угловая АФМ кубическая фаза (CAFC)

$$\cos \varphi = -A/2B, \quad e_2 = e_3 = 0$$

устойчива при $A \geq -2B$, $A \leq 2B$, $B \geq 0$, $A \leq 2Ba/D$.

8. Угловая АФМ тетрагональная фаза (CAFT)

$$\cos \varphi = -(A + De_3^2/2)/2B, \quad e_2 = 0,$$

$$e_3 = e_{CT} = (-\text{sign } b \pm \sqrt{1 - 4\tilde{a}\tilde{c}}) / 2\tilde{c}.$$

9. Угловая АФМ ромбическая фаза (CAFR)

$$\cos \varphi = - (A + D (e_2^2 + e_3^2) / 2) / 2B, \quad e_2^2 = 3e_3^2,$$

$$e_3 = e_{CR} = (\text{sign } b \pm \sqrt{1 - 4\tilde{a}\tilde{c}}) / 4\tilde{c}.$$

Фазы CAFT и CAFR устойчивы при $A \geq -2B - (D/8) (1 + \sqrt{1 - 4(a + D)})^2$, $a \leq 1/4 - D$; $A \leq 2B - (D/8) (1 + \sqrt{1 - 4(a - D)})^2$, $a \leq 1/4 + D$; $A \geq 2Ba/D - B/2\tilde{c}D$, $B \geq D^2/4$. Здесь $\tilde{a} = a - DA/2B$ и $\tilde{c} = 1 - D^2/4B$.

Из анализа областей устойчивости фаз следует, что знак параметра b определяет лишь знак тетрагональных деформаций e_3 в фазах и не влияет на вид фазовых диаграмм. При $b > 0$ деформации e_3 положительны в ромбических фазах FR, AFR, CAFR и отрицательны в тетрагональных фазах FT, AFT, CAFT. При $b < 0$ знаки деформаций e_3 в данных фазах изменяются на противоположные. Из областей устойчивости фаз также видно, что угловые АФМ фазы существуют только при положительных значениях параметра B . При отрицательных значениях параметра B в сплавах с инверсией обменного взаимодействия может существовать шесть состояний – три ФМ (FC, FT, FR) и три АФМ (AFC, AFT, AFR). Угловые фазы CAFT и CAFR существуют при значениях $B \geq D^2/4$.

Из сравнения энергий фаз можно определить линии фазовых переходов. Они имеют следующий вид:

$$1-2(3): \quad a = 2/9 - D;$$

$$1-4: \quad A = 0;$$

$$1-5(6): \quad A = (1/24) |e_{AT}|^3 (2 - 3|e_{AT}|);$$

$$1-7: \quad A = -2B;$$

$$1-8(9): \quad A = -2B \pm \sqrt{(1/3)B |e_{CT}|^3 (2 - 3\tilde{c}|e_{CT}|)},$$

$$A \leq 2Ba/D - 4B/9D\tilde{c};$$

$$2-4: \quad A = (1/24) |e_T|^3 (3|e_T| - 2);$$

$$2-5(6): \quad A = (1/24) (|e_{AT}|^3 (2 - 3|e_{AT}|) - |e_T|^3 (2 - 3|e_T|));$$

$$2-7: \quad A = \pm \sqrt{(1/3)B |e_T|^3 (3|e_T| - 2)} - 2B,$$

$$a \leq 2/9 - D;$$

$$2-8(9): \quad A = \pm ((1/3)B [|e_{CT}|^3 (2 - 3\tilde{c}|e_{CT}|) - |e_T|^3 (2 - 3|e_T|)])^{1/2} - 2B,$$

$$|e_{CT}|^3 (2 - 3\tilde{c}|e_{CT}|) - |e_T|^3 (2 - 3|e_T|) \geq 0;$$

$$4-5(6): \quad a = 2/9 + D;$$

$$4-7: \quad A = 2B;$$

$$4-8(9): \quad A = 2B \pm \sqrt{(1/3)B |e_{CT}|^3 (2 - 3\tilde{c}|e_{CT}|)},$$

$$A \leq 2Ba/D - 4B/9D\tilde{c}; \quad a \leq 2/9 + D;$$

$$5-8(9): \quad A = \pm ((1/3)B [|e_{CT}|^3 (2 - 3\tilde{c}|e_{CT}|) - |e_{AT}|^3 (2 - 3|e_{AT}|)])^{1/2} + 2B,$$

$$|e_{CT}|^3 (2 - 3\tilde{c}|e_{CT}|) - |e_{AT}|^3 (2 - 3|e_{AT}|) \geq 0;$$

$$7-8(9): \quad A = 2Ba/D - 4B/9D\tilde{c}.$$

Фазовая диаграмма в координатах $(A - a)$ в случае $B < 0$, $D > 0$ схематически представлена на рис.1a, а при $B < 0$, $D < 0$ – на рис.1b. Здесь и далее

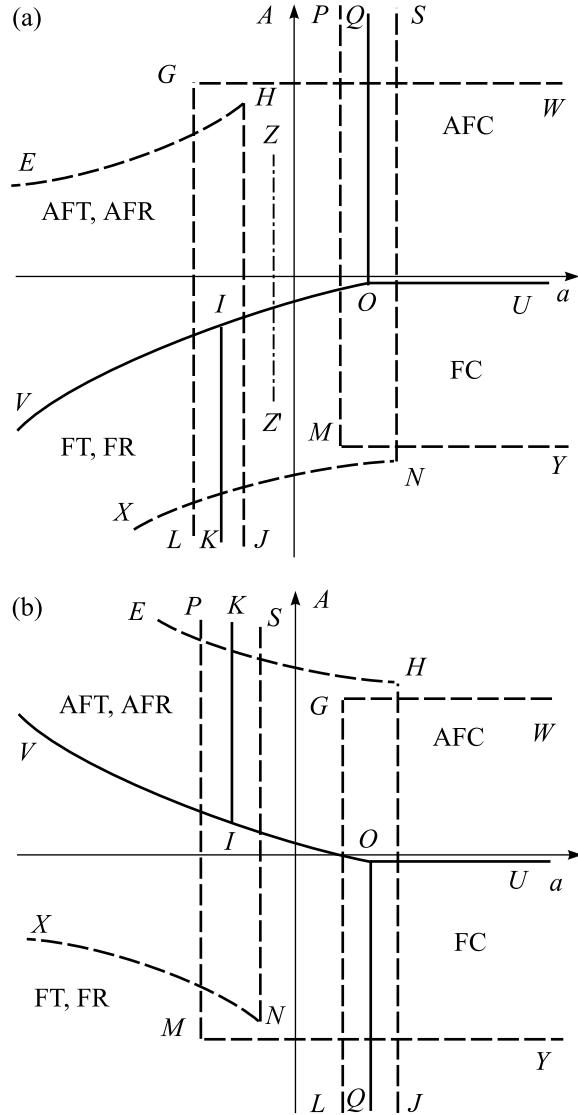


Рис.1. Схематическая фазовая диаграмма для случая $B < 0$: (a) $D > 0$, (b) $D < 0$

на фазовых диаграммах сплошными линиями обозначены линии фазовых переходов, штриховыми – границы областей устойчивости фаз. Из рис.1 видно, что при $B < 0$ в сплаве может осуществляться шесть равновесных состояний: FC, FT (FR), AFC, AFT (AFR). Фаза FC устойчива в области, ограниченной линиями LG и GW . Фаза AFC устойчива в области пра-

вее линии PM и выше линии MY . Фазы FT и FR устойчивы в области, ограниченной линиями EH и HJ . Фазы AFT и AFR устойчивы в области левее линии SN и выше линии NX . Из рис.1 следует, что на фазовой диаграмме могут происходить следующие фазовые переходы. На линии OU из ФМ кубической фазы FC в АФМ кубическую фазу AFC; на линии OI – фазовый переход из FC фазы (рис.1а) и AFC фазы (рис.1б) в фазы AFT (AFR) (рис.1а) и FT(FR) (рис.1б), соответственно; на линии IK – фазовый переход из FC фазы (рис.1а) и AFC фазы (рис.1б), в фазы FT (FR) (рис.1а) и AFT (AFR) (рис.1б), соответственно; на линии OQ – фазовый переход из AFC фазы (рис.1а) и FC фазы (рис.1б) в фазы AFT (AFR) (рис.1а) и FT(FR) (рис.1б), соответственно. Между фазами AFT (AFR) и FT (FR) вдоль линии VI также имеет место фазовый переход. Все указанные переходы являются переходами 1-го рода.

Рассмотрим путь ZZ' на рис.1а. Зависимости параметров порядка e_2 , e_3 и энергии F от величины параметра A на данном пути представлены на рис.2. Видно, что ФМ кубическая фаза FC путем фазового перехода 1-го рода на линии IO переходит в АФМ

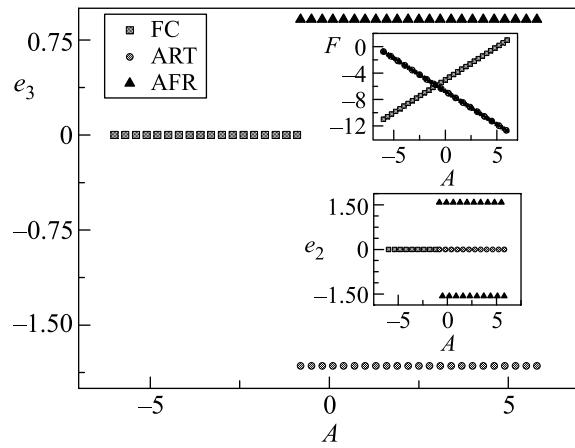


Рис.2. Зависимость деформаций e_3 , e_2 (нижняя вставка) и плотности энергии F (верхняя вставка) на термодинамическом пути ZZ' (рис.1а) при $B = -5$, $D = 1$

тетрагональную AFT или ромбическую AFR фазы. Переход сопровождается скачкообразным изменением параметра порядка e_3 (и e_2 при переходе в фазу AFR) (рис.2). Отметим, что именно такой переход наблюдался экспериментально в сплаве Ni-Co-Mn-In в работе [5]. Из результатов работы [5] следует, что намагниченность в низкотемпературной фазе практически равна нулю даже в сравнительно сильном магнитном поле 70 кЭ (см. рис.1 в [5]) и при переходе наблюдается отчетливо выраженный гистерезис. Это говорит в пользу того, что в сплаве Ni-Co-Mn-In

должен действительно иметь место фазовый переход 1-го рода из ФМ кубической фазы FC в АФМ тетрагональную (ромбическую) фазу AFT(AFR). В работе [5] отмечено, что в сплаве Ni-Co-Mn-In низкотемпературная фаза является модулированной и имеет моноклинные искажения. Мы здесь не учитываем влияния модуляции кристаллической решетки на фазовые диаграммы [1, 4], моноклинные же искажения, по-видимому, могут быть обусловлены анизотропной магнитострикцией, которой здесь пренебрегалось. Учет последней делает невозможным полное аналитическое решение задачи. Влиянию модуляции кристаллической решетки и анизотропной магнитострикции на фазовые диаграммы будет посвящено отдельное сообщение.

Фазовая диаграмма в случае $B > 0$, $D > 0$ представлена на рис.3а, а при $B > 0$, $D < 0$ – на рис.3б. Видно что при $B > 0$ в сплаве действительно могут осуществляться все девять равновесных состояний.

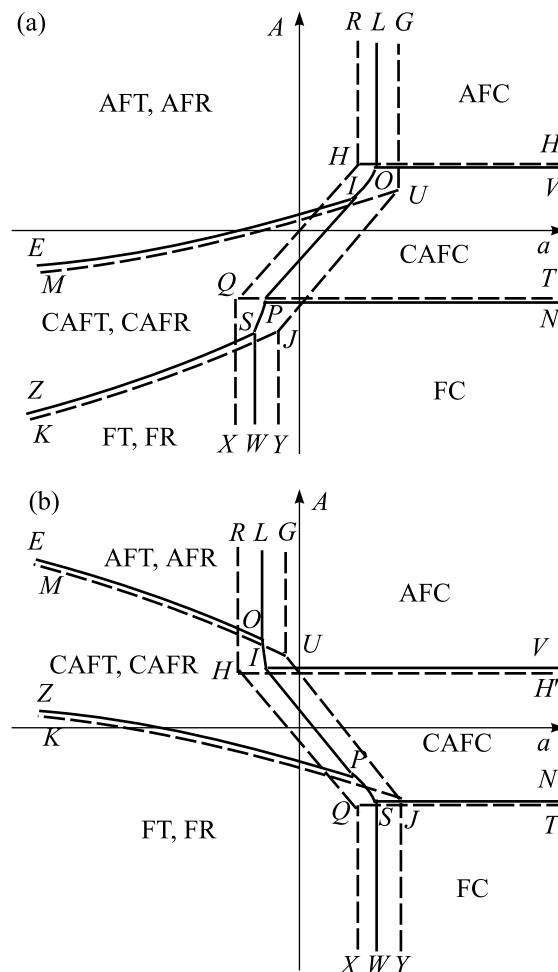


Рис.3. Схематическая фазовая диаграмма для случая $B > 0$ ($B > 4D^2$): (а) $D > 0$, (б) $D < 0$

Фаза FC устойчива в области, ограниченной линиями XQ и QT . Фаза AFC устойчива в области правее линии HR и выше линии HH' . Фазы FT и FR устойчивы в области, ограниченной линиями KJ и JY . Фазы AFT и AFR устойчивы в области левее линии GU и выше кривой MU . Угловая АФМ фаза CAFC устойчива в области правее линии HQ и между линиями HH' и QT . Наконец, угловые АФМ фазы CAFT и CAFR существуют в области левее кривой JU и между кривыми MU и KJ . Из рис.3 следует, что при $B > 0$ на фазовой диаграмме могут иметь место следующие фазовые переходы. На линии PN (рис.3а) и линии SN (рис.3б) – фазовый переход 2-го рода из кубической ФМ фазы FC в угловую АФМ кубическую фазу CAFC; на линии WS – фазовый переход 1-го рода между ФМ фазами FC и FT(FR); на линии SP – фазовый переход 1-го рода из ФМ фазы FC в угловые АФМ фазы CAFT(CAFR) (рис.3а) или из ФМ фаз FT(FR) в угловую АФМ фазу CAFC (рис.3б); по линии OV (рис.3а) и линии IV (рис.3б) – фазовый переход 2-го рода между АФМ фазами AFC и CAFC; по линии LO – фазовый переход 1-го рода из АФМ кубической фазы AFC в АФМ фазы AFT и AFR; по линии OI – фазовый переход 1-го рода из угловой фазы CAFC в фазы AFT(AFR) (рис.3а) или из фазы AFC в угловые фазы CAFT и CAFR (рис.3б); на линии IP – фазовый переход 1-го рода между угловыми АФМ фазами CAFC и CAFT(CAFR); на линии EI (рис.3а) и линии EO (рис.3б) – фазовый переход 2-го рода из АФМ фаз AFT(AFR) в АФМ фазы CAFT(CAFR); на линии ZS (рис.3а) и линии ZP (рис.3б) – фазовый переход 2-го рода между ФМ фазами FT(FR) и АФМ фазами CAFT(CAFR).

Напомним, что угловые АФМ фазы CAFT(CAFR) существуют лишь при $B \geq D^2/4$, поэтому при выполнении обратного неравенства фазовые диаграммы не содержат данных фаз. Фазовые диаграммы в последнем случае могут быть построены согласно линиям потери устойчивости фаз и линиям фазовых переходов, которые приведены выше. Из-за ограниченности данного сообщения они здесь не приводятся.

Отметим, что из рис.3а следует, что в сплавах с инверсией обменного взаимодействия возможен переход из высокотемпературной ФМ кубической фазы FC в угловую АФМ тетрагональную (ромбическую) фазу CAFT(CAFR) (линия SP на рис.3а). При таком переходе в АФМ фазе намагниченность меньше, чем намагниченность в ФМ фазе, но значительно больше, чем в АФМ фазе при переходе FC – AFT(AFR) на рис.1а (линия OI). Это обусловлено тем, что в

угловой АФМ фазе CAFT(CAFR) вектор ферромагнетизма $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2$ отличен от нуля, а в фазе AFT(AFR) он равен нулю. По-видимому, переход FC – CAFT(CAFR) наблюдается экспериментально в сплавах Ni-Mn-Sn, Ni-Mn-In и Ni-Mn-Sb [10–12], в которых в низкотемпературной фазе намагниченность в слабом поле не равна нулю, но остается существенно меньше, чем в высокотемпературной ФМ фазе в сравнительно больших полях.

Таким образом, в данной работе с помощью феноменологической теории фазовых переходов Ландау теоретически исследованы фазовые диаграммы сплавов Гейслера, в которых может иметь место инверсия обменного взаимодействия. Показано, что в таких сплавах вид фазовых диаграмм зависит от величины и знаков параметров функционала Ландау. При определенных значениях и знаках параметров функционала Ландау на полученных фазовых диаграммах существуют термодинамические пути, которые позволяют объяснить наблюдавшиеся экспериментально фазовые переходы в сплавах Гейслера Ni-Co-Mn-In, Ni-Mn-In, Ni-Mn-Sn и Ni-Mn-Sb [5, 10–12].

Работа поддержана грантами РФ и CRDF # Y2-P-05-19, Российского фонда фундаментальных исследований # 05-08-50341, # 06-02-16266, # 07-02-96029-р-ural, # 06-02-39030-ГФЕН, Президента РФ # МК-5658.2006.2 и Фонда “Научный потенциал”.

1. P. Entel, V. D. Buchelnikov, V. V. Khovailo et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 865 (2006).
2. В. Д. Бучельников, А. Н. Васильев, В. В. Коледов и др., УФН **176**, 900 (2005).
3. A. N. Vasil'ev, A. D. Bozhko, V. V. Khovailo et al., *Phys. Rev. B* **59**, 1113 (1999).
4. А. Н. Васильев, В. Д. Бучельников, Т. Такаги и др., УФН **173**, 577 (2003).
5. R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito et al., *Nature* **439**, 957 (2006).
6. V. V. Khovaylo, V. D. Buchelnikov, R. Kainuma et al., *Phys. Rev. B* **72**, 224408 (2005).
7. C. Kittel, *Phys. Rev.* **120**, 335 (1960).
8. H. S. Jarrett, *Phys. Rev.* **134**, A942 (1964).
9. W. A. Doerner and R. B. Flippin, *Phys. Rev.* **137**, A926 (1965).
10. Y. Sutou, Y. Imano, N. Koeda et al., *Appl. Phys. Lett.* **85**, 4358 (2004).
11. T. Krenke, M. Acet, E. F. Wassermann et al., *Phys. Rev. B* **72**, 014412 (2005).
12. P. J. Brown, A. P. Gandy, K. Ishida et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **18**, 2249 (2006).