

Магнитострикция интерметаллидов SmMn_2Ge_2 и GdMn_2Ge_2

© Го Гуанхуа, Р.З. Левитин, В.В. Снегирев, Д.А. Филиппов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

E-mail: levitin@plms.phys.msu.su

(Поступила в Редакцию 14 августа 2000 г.)

В импульсных магнитных полях до 250 кОе измерены продольная и поперечная магнитострикции поликристаллических образцов интерметаллических соединений RMn_2Ge_2 ($R = \text{Sm}, \text{Gd}$). Обнаружено, что в той области температур, где магнитное поле вызывает изменение магнитного состояния марганцевой магнитной подсистемы, в поле возникают линейные магнитострикционные деформации порядка 10^{-3} . Полученные результаты описываются в модели двухподрешеточного ферромагнетика с отрицательным обменным взаимодействием в марганцевой подсистеме с учетом сильной зависимости этого обмена от межатомных расстояний.

Работа поддержана грантами РФФИ № 99-02-17358, № 00-15-96695 и Миннауки РФ № 97-0-7.3-157.

Магнетизм интерметаллидов RMn_2Ge_2 (R — редкие земли и иттрий) (слоистая тетрагональная кристаллическая структура типа ThCr_2Si_2 , пространственная группа $I4/mmm$) определяется двумя магнитными подсистемами, образованными магнитными моментами марганца и редкой земли соответственно. В них осуществляется следующая иерархия обменных взаимодействий: наибольшим является положительный обмен Mn-Mn в слое, на порядок меньше обменные взаимодействия между соседними слоями марганца, а также между редкоземельным атомом и атомом марганца, еще на порядок слабее обменное $R-R$ -взаимодействие (см. обзор [1], там же ссылки на более ранние оригинальные работы). Важной особенностью является то, что параметр межслойного обменного взаимодействия Mn-Mn сильно зависит от межатомных расстояний (главным образом от расстояний в слое) и меняет знак с положительного на отрицательный при возрастании параметра решетки a до некоторого критического значения $a_{cr} \approx 4.045 \text{ \AA}$ [1,2]

$$\lambda = \rho(a - a_{cr}). \quad (1)$$

При комнатной температуре параметр решетки $a > a_{cr}$ для интерметаллидов с легкими редкоземельными атомами La, Nd, Pr, Sm, поэтому в них собственное магнитное упорядочение марганцевой подсистемы является ферромагнитным. В SmMn_2Ge_2 знак обменного межслойного Mn-Mn -взаимодействия меняется при понижении температуры до 150 К из-за того, что при этой температуре тепловое расширение приводит к уменьшению параметра решетки a до значения a_{cr} и марганцевая подсистема переходит в антиферромагнитное состояние [1, 3–5]. В интерметаллидах с тяжелыми редкоземельными атомами (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) собственное магнитное упорядочение марганцевой подсистемы является антиферромагнитным, так как для этих соединений $a < a_{cr}$. При понижении температуры в некоторых интерметаллидах с отрицательным обменным межслойным Mn-Mn -взаимодействием (Sm, Gd, Tb, Dy) наблюдается переход марганцевой подсистемы в ферромагнитное

состояние, индуцированный магнитным упорядочением редкоземельной подсистемы [1]. В Sm- и Gd-интерметаллидах этот переход происходит при температуре примерно 100 К [4–6]. Отметим, что магнитные переходы, связанные с изменением магнитного состояния марганцевой подсистемы, сопровождаются значительными магнитоупругими деформациями: относительные изменения параметра кристаллической решетки a имеют порядок 10^{-3} , на что указывают измерения теплового расширения [4,5,7]. Эта деформация обусловлена отмеченной выше зависимостью межслойного обмена Mn-Mn от межатомных расстояний. Согласно [8], обменная магнитострикция зависит от угла θ между направлениями магнитных моментов марганца M в соседних плоскостях

$$\Delta a/a = -2\rho M^2 a \cos \theta / N \quad (2)$$

(M — магнитный момент марганца, N — соответствующий модуль упругости).

Если межплоскостное обменное взаимодействие Mn-Mn является отрицательным, то внешнее магнитное поле может также изменять состояние марганцевой подсистемы. Индуцированные полем магнитные фазовые переходы наблюдались в SmMn_2Ge_2 [2,4] и в GdMn_2Ge_2 [9,10].

В данной работе ставилась задача исследовать магнитоупругие деформации, возникающие при индуцированных полем магнитных фазовых переходах в интерметаллидах с Sm и Gd.

Поликристаллические образцы интерметаллидов SmMn_2Ge_2 и GdMn_2Ge_2 выплавлялась из исходных компонентов в индукционной печи в атмосфере аргона в условиях квазилевитации. Гомогенизация образцов осуществлялась отжигом при 750°C в динамическом вакууме в течение недели. Однофазность образцов контролировалась рентгенографически.

Продольная и поперечная магнитострикция измерялись в интервале температур 10–300 К методом кварцевых пьезодатчиков, наклеенных на образец [11], в импульсных магнитных полях до 250 кОе. Для определения

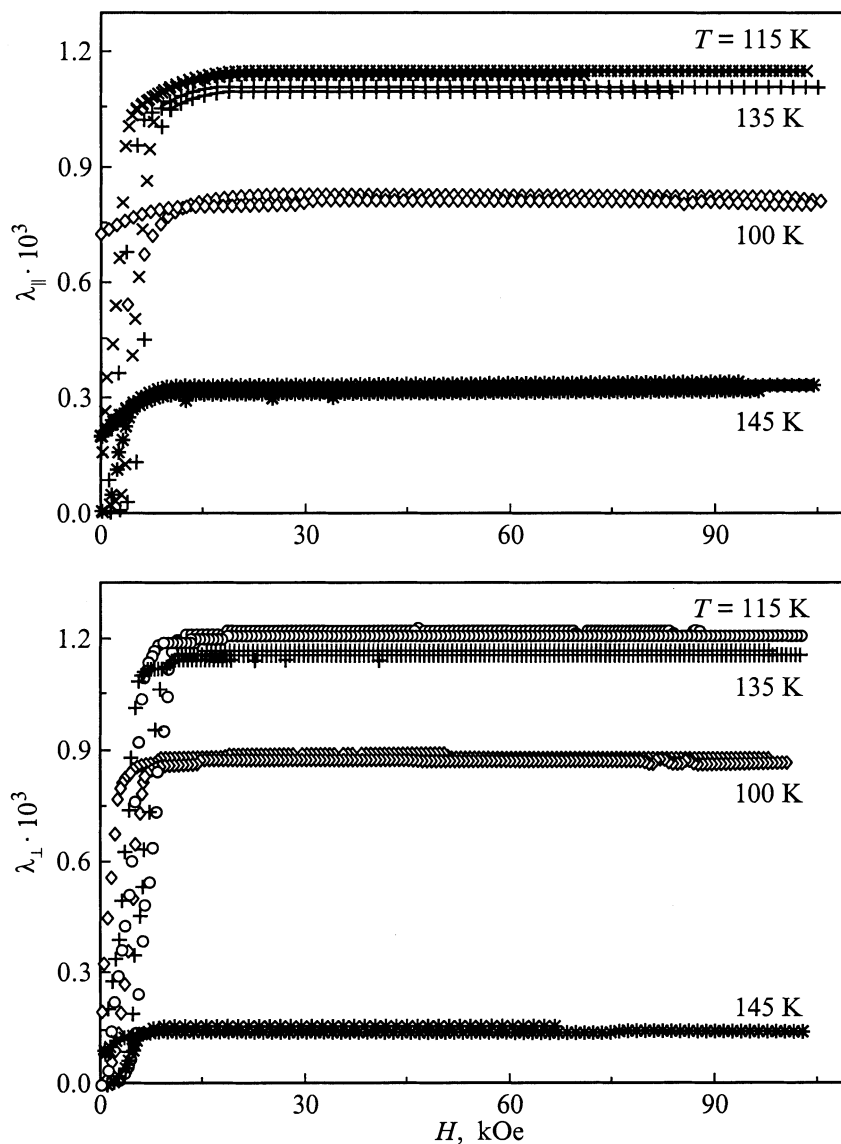


Рис. 1. Полевые зависимости продольной и поперечной магнитоэлектрических SmMn_2Ge_2 при различных температурах.

температур спонтанных магнитных фазовых переходов измерялась магнитная восприимчивость в переменных магнитных полях порядка нескольких эрстед.

SmMn_2Ge_2 . В этом интерметаллиде марганцевая подсистема упорядочена при комнатной температуре ферромагнитно, а самариевая находится в парамагнитном состоянии. При охлаждении происходит фазовый переход первого рода марганцевой подсистемы в антиферромагнитное состояние, обусловленный изменением знака обменного межслойного Mn–Mn-взаимодействия из-за теплового расширения; при этом самариевая подсистема остается парамагнитной. В исследованном нами образце температура этого перехода, как следует из измерений магнитной восприимчивости и теплового расширения [7], равна $T_1 = 150$ K, что хорошо согласуется с результатами других работ [4,5]. При дальнейшем понижении температуры происходит реэнтрантный переход

первого рода марганцевой подсистемы в ферромагнитное состояние, обусловленный ферромагнитным упорядочением самариевой подсистемы. Температура реэнтрантного перехода, определенная нами, составляет $T_2 = 100$ K, что находится в согласии с данными [4,5,7]. Поскольку в интерметаллидах с легкими редкоземельными атомами обменное взаимодействие редкая земля–марганец положительно, при низких температурах магнитные моменты самариевой и марганцевой подсистем ориентированы параллельно друг другу.

На рис. 1 приведены полевые зависимости продольной и поперечной магнитоэлектрических SmMn_2Ge_2 при различных температурах. Видно, что в интервале температур $T_2 < T < T_1$, где марганцевая система упорядочена антиферромагнитно, магнитоэлектрическая значительно больше, чем вне этого интервала. Данный факт обусловлен тем, что в этой области температур поле, как показано в рабо-

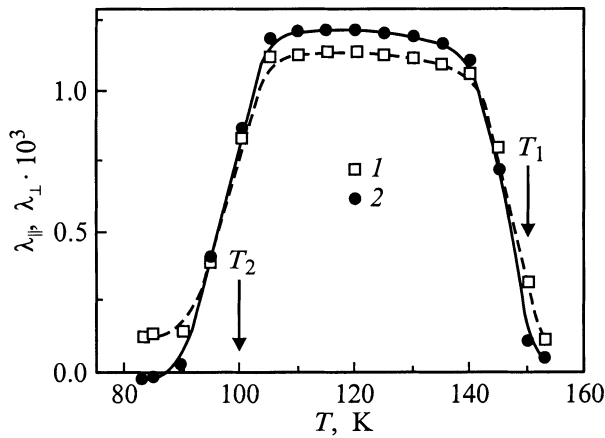


Рис. 2. Температурные зависимости продольной (1) и поперечной (2) магнитострикций насыщения SmMn_2Ge_2 . Стрелками показаны температуры фазовых переходов T_1 и T_2 .

тах [3,5], индуцирует переход марганцевой подсистемы в ферромагнитное состояние и магнитострикция обусловлена магнитоупругими деформациями, возникающими при таком переходе. Как видно из рис. 1, магнитострикция, обусловленная переходом антиферромагнетизм–ферромагнетизм в марганцевой подсистеме, положительна и почти изотропна ($\lambda_{\parallel} \approx \lambda_{\perp}$). Величины продольной и поперечной магнитострикций насыщения показаны на рис. 2. Как следует из работ [4,5,7], спонтанный переход марганцевой подсистемы из ферромагнитного в антиферромагнитное состояние при температуре T_1 сопровождается уменьшением, а обратный переход в ферромагнитное состояние при температуре T_2 — увеличением параметра кристаллической решетки a . Естественно предположить, что магнитострикционные деформации, возникающие при переходе марганцевой подсистемы в поле из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние, также обусловлены магнитоупругими деформациями параметра a . Поскольку анизотропия в данном температурном интервале сравнительно невелика, переход из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние в исследованном нами интервале полей происходит при всех ориентациях магнитного поля относительно кристаллических осей [3]. В этом случае продольная магнитострикция поликристаллического образца должна равняться поперечной и составлять

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{\perp} \approx 2\Delta a/3a, \quad (3)$$

где Δa — изменение величины параметра решетки a при спонтанном переходе из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние. Сравнение значения магнитострикций λ_{\parallel} и λ_{\perp} с величиной $\Delta a/a$ из работы [7] показывает, что это соотношение выполняется достаточно удовлетворительно. Некоторое различие продольной и поперечной магнитострикций можно объяснить тем, что поликристаллический образец не является абсолютно изотропным, а обладает некоторой текстурой. Влияние

кристаллической текстуры на магнитные свойства интерметаллидов RMn_2Ge_2 наблюдалось также в работе [12].

GdMn_2Ge_2 . Как показали измерения теплового расширения [7] и магнитной восприимчивости, в исследованных нами образцах переход марганцевой подсистемы из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние с одновременным ферромагнитным упорядочением гадолиниевой подсистемы происходит при охлаждении ниже $T_2 = 97$ К. При этом, так как обменное взаимодействие гадолиний–марганец отрицательно, интерметаллид является при $T < T_2$ ферримагнетиком. В ферримагнитной области (ниже 97 К), как следует из результатов работ [9,10], в изученном нами интервале магнитных полей магнитное поле, перпендикулярное тетрагональной оси кристалла, вызывает магнитный фазовый переход первого рода из ферримагнитной фазы с ориентацией магнитных моментов гадолиниевой и марганцевой подсистем параллельно тетрагональной оси в треугольную фазу, в которой магнитный момент гадолиниевой подсистемы параллелен магнитному полю, а магнитные моменты двух соседних марганцевых плоскостей отклонены от этого направления в разные стороны и образуют между собой некоторый угол θ . Выше 97 К, когда марганцевая подсистема антиферромагнитна, а гадолиниевая находится в парамагнитном состоянии, магнитное поле, ориентированное вдоль тетрагональной оси, индуцирует переход первого рода марганцевой подсистемы в ферромагнитное состояние [9].

На рис. 3 показаны полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикций одного из исследованных нами образцов GdMn_2Ge_2 . Видно, что как выше, так и ниже температуры T_2 магнитострикция носит метамагнитный характер: она возрастает по абсолютной величине при достижении определенного критического поля. При этом как продольная, так и поперечная магнитострикции ниже температуры T_2 отрицательны, а выше этой температуры — положительны. Такой характер магнитострикции естественно объясняется в предположении, что наблюдаемые магнитоупругие деформации обусловлены обсуждавшимися выше индуцированными полем метамагнитными переходами, связанными с изменением в поле магнитного состояния марганцевой подсистемы. Разные знаки магнитострикции выше и ниже $T_2 = 97$ К объясняются тем, что при низких температурах поле разрушает ферромагнитное упорядочение в марганцевой подсистеме, а выше этой температуры марганцевая подсистема в поле переходит в ферромагнитное состояние.¹ Одинаковые знаки и примерно равные величины продольной и поперечной магнитострикций GdMn_2Ge_2 свидетельствуют о том, что магнитострикция является преимущественно объемной. Температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикций насыщения GdMn_2Ge_2 показаны на рис. 4. Величина

¹ Отметим, что в интервале $T_2 = 97 < T < 240$ К нам не удалось измерить магнитострикцию насыщения, так как поле метамагнитного перехода в этом интервале температур превышает достижимые в наших экспериментах поля 250 кОе.

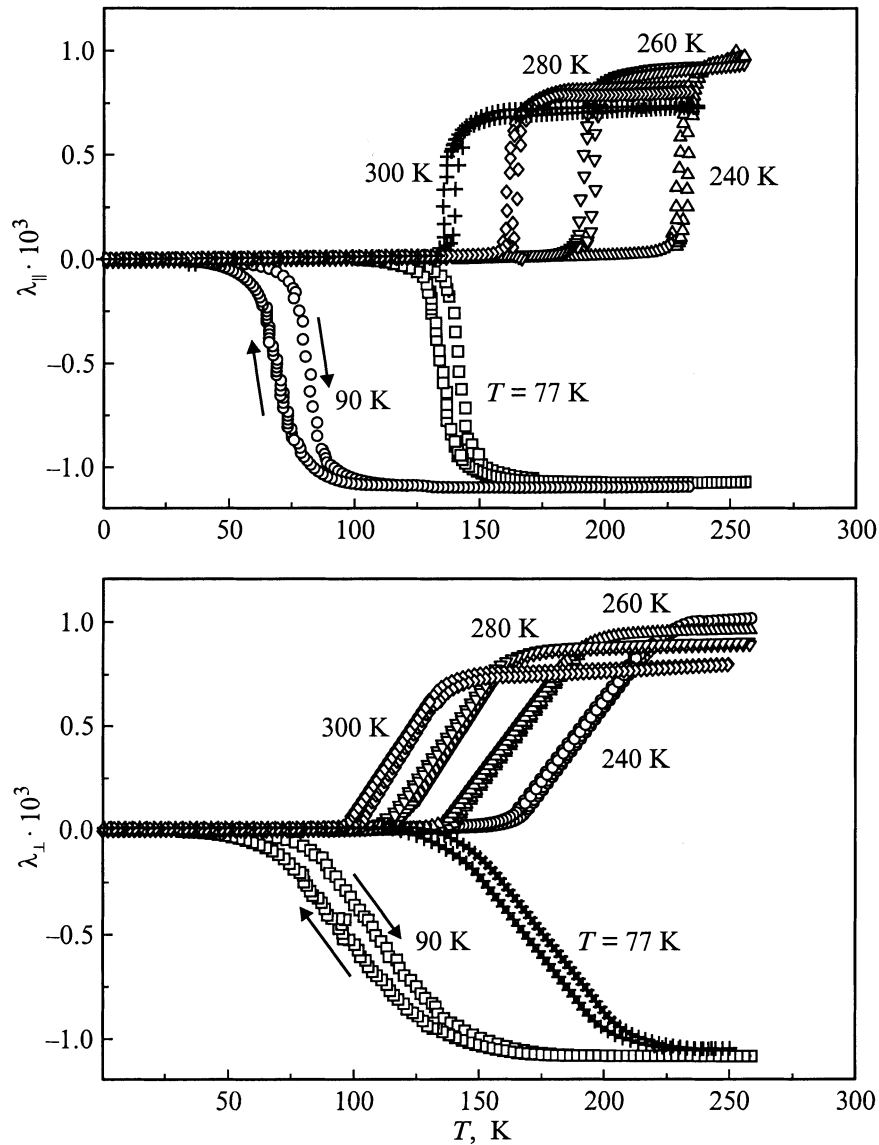


Рис. 3. Полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикций GdMn_2Ge_2 при различных температурах.

магнитострикции по порядку величины согласуется с данными, полученными из измерений теплового расширения GdMn_2Ge_2 [7].

Однако необходимо отметить, что полевые зависимости магнитострикции, измеренные на разных образцах, хотя и имеют одинаковый характер, но существенно отличаются в деталях, главным образом размытостью метамгнитного перехода. Это хорошо видно из сравнения полевых зависимостей λ_{\parallel} и λ_{\perp} , приведенных на рис. 4 (в этих опытах величины λ_{\parallel} и λ_{\perp} измерялись вдоль одного и того же направления, а поле при измерениях продольной и поперечной магнитострикций ориентировалось соответственно параллельно и перпендикулярно направлению измерения магнитострикции). Несколько отличаются также значения магнитострикции насыщения. Это обусловлено, по-видимому, как уже

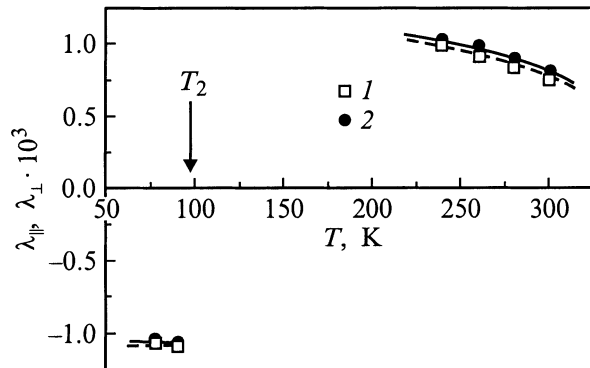


Рис. 4. Температурные зависимости продольной (1) и поперечной (2) магнитострикций насыщения GdMn_2Ge_2 . Стрелкой показана температура фазового перехода T_2 .

отмечалось, наличием в образцах кристаллографической текстуры. Сравнение величины магнитострикции для шести различных образцов GdMn_2Ge_2 показало, что средний разброс абсолютных величин магнитострикции достигает 30%, поэтому к приведенным на рис. 3 и 4 значениям следует относиться как к оценочным.

Таким образом, измерения показали, что в интерметаллидах SmMn_2Ge_2 и GdMn_2Ge_2 наблюдается гигантская магнитострикция, обусловленная изменением в поле типа магнитного упорядочения в марганцевой подсистеме. Большая величина магнитоупругих эффектов в изученных интерметаллидах подтверждает вывод о сильной зависимости обменного взаимодействия Mn–Mn от межатомных расстояний.

Список литературы

- [1] A. Szytula, J. Leciejewicz. In: Handbook Phys. Chem. Rare Earths. Vol. 12 / Ed. by K.A. Gschneidner, jr., L. Eyring. North Holland, Amsterdam (1989). P. 133.
- [2] H. Fujii, T. Okamoto, N. Shigeoka, N. Ivata. Solid Stat. Commun. **53**, 715 (1985).
- [3] G. Venturiny, B. Malaman, E. Ressouche. J. Alloys and Compounds **241**, 135 (1996).
- [4] E.M. Gyorgy, B. Batlogg, J.P. Remeika, R.B. van Dover, R.M. Fleming, H.E. Bair, G.P. Espinosa, A.S. Cooper, R.G. Maines. J. Appl. Phys. **61**, 4237 (1987).
- [5] M. Duraj, R. Duraj, A. Szytula, Z. Tomkowich. J. Magn. Magn. Mater. **73**, 240 (1988).
- [6] T. Shigeoka, H. Fujii, H. Fujiwara, K. Yagasaki, T. Okamoto. J. Magn. Magn. Mater. **31–34**, 209 (1983).
- [7] И.Ю. Гайдукова, Го Хуанхуа, С.А. Грановский, И.С. Дубенко, Р.З. Левитин, А.С. Маркосян, В.Е. Родимин. ФТТ **41**, 2053 (1999).
- [8] C. Kittel. Phys. Rev. **120**, 335 (1960).
- [9] H. Kobayashi, H. Omodera, H. Yamamoto. J. Magn. Magn. Mater. **79**, 76 (1989).
- [10] А.Ю. Соколов, Го Хуанхуа, С.А. Грановский, Р.З. Левитин, Х. Вада, М. Шига, Т. Гото. ЖЭТФ **116**, 1346 (1999).
- [11] R.Z. Levitin, V.N. Milov, Yu.F. Popov, V.V. Snegirev. Physica **B59**, 177 (1992).
- [12] T. Ono, H. Onodera, M. Ohashi, H. Yamauchi, Y. Yamaguchi. J. Magn. Magn. Mater. **123**, 133 (1993).