

# Индукцированные полем магнитные фазовые переходы в модели Яфета–Киттеля

© Н.П. Колмакова, С.А. Колоногий, Р.З. Левитин\*, М.Ю. Некрасова

Брянский государственный технический университет,  
241035 Брянск, Россия

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

E-mail: npk@physics.bitmcnit.bryansk.su

(Поступила в Редакцию 18 декабря 1998 г.)

Модель Яфета–Киттеля для двухподрешеточного ферримагнетика с антиферромагнитным обменным взаимодействием в одной из подрешеток развита для описания индуцированных магнитным полем фазовых переходов в изотропном и изинговском случаях. В зависимости от соотношения обменных параметров внутри- и междодрешеточного взаимодействия в изотропном случае возможны два вида магнитных фазовых диаграмм с двумя типами переходов второго рода: в неколлинеарную и спин-флип фазы, в изинговском случае — три вида магнитных фазовых диаграмм с фазовыми переходами первого рода.

**1.** В двухподрешеточном ферримагнетике со стабильными подрешетками внешнее магнитное поле индуцирует переход из ферримагнитного состояния с антипараллельным расположением магнитных моментов подрешеток в ферромагнитное состояние с параллельными магнитными моментами путем двух фазовых переходов второго рода через неколлинеарную фазу или, при наличии достаточно большой одноосной магнитной анизотропии, одного перехода первого рода. Если внутри одной из подрешеток ферримагнетика существует антиферромагнитное обменное взаимодействие, благодаря которому она может распадаться на две эквивалентные подрешетки, магнитные фазовые диаграммы и кривые намагничивания существенно усложняются. Первой попыткой описания магнитных систем такого типа стала модель Яфета–Киттеля [1] (см. также [2]), в которой рассматривался двухподрешеточный ферримагнетик с антиферромагнитным обменным взаимодействием в каждой подрешетке. В приближении молекулярного поля были рассчитаны возможные магнитные состояния такой системы в отсутствие внешнего магнитного поля в обменном приближении. Было введено представление о треугольном упорядочении, которому соответствует ориентация магнитных моментов всех подрешеток под определенными углами друг к другу, и показано, что наличие его влечет за собой возможность увеличения намагниченности насыщения под действием внешнего магнитного поля даже при  $T \rightarrow 0$  К.

Теория Яфета–Киттеля была разработана для ферритов со структурой шпинели. Оставаясь по-прежнему актуальной для этих соединений, эта теория в случае ее развития от спонтанных переходов к индуцированным внешним магнитным полем может быть применена для описания магнитных свойств многих других соединений, в том числе интерметаллических с редкими землями, например тройных типа  $R\text{Mn}_2\text{X}_2$ , где  $X = \text{Si}$  или  $\text{Ge}$ . Такому развитию теории Яфета–Киттеля и посвящена данная работа.

**2.** Рассмотрим двухподрешеточный ферримагнетик с антиферромагнитным обменным взаимодействием внутри одной из подрешеток, благодаря которому она может распадаться на две эквивалентные с магнитными моментами  $\mathbf{m}_1$  и  $\mathbf{m}_2$ , причем  $m_1 = m_2 = m$ . Рассчитаем магнитные фазовые диаграммы и кривые намагничивания такого ферримагнетика в приближении молекулярного поля, в котором в состоянии термодинамического равновесия магнитные моменты считаются направленными вдоль действующих на них эффективных полей. Будем анализировать знаки и величины этих эффективных полей и выбирать состояния, соответствующие минимальным значениям термодинамического потенциала при заданном значении внешнего магнитного поля.

В обменном приближении (в отсутствие магнитной анизотропии) термодинамический потенциал может быть записан в виде

$$\Phi = J_1 \mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2 / 2 + J_2 \mathbf{M} \mathbf{m}_1 / 2 + J_2 \mathbf{M} \mathbf{m}_2 / 2 - \mathbf{H}(\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2 + \mathbf{M}). \quad (1)$$

Здесь  $J_1$  и  $J_2$  — параметры антиферромагнитного ( $J_1, J_2 > 0$ ) обменного взаимодействия внутри нестабильной подрешетки и между подрешетками соответственно;  $\mathbf{M}$  — магнитный момент стабильной подрешетки.

Перечислим фазы, реализующиеся в данном ферримагнетике. Их четыре. Три из них характеризуются параллельной ориентацией  $\mathbf{m}_1$  и  $\mathbf{m}_2$ , которые образуют таким образом единую подрешетку и подобны фазам обычного ферримагнетика: ферримагнитная фаза с антипараллельной ориентацией  $\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2$  и  $\mathbf{M}$  (фаза  $A$ ), ферромагнитная фаза ( $F$ ) и неколлинеарная ( $N$ ). Еще одной фазой, четвертой, является треугольная, мы обозначим ее  $C$  (canted), в ней  $\mathbf{m}_1$  и  $\mathbf{m}_2$  образуют угол  $\theta$  с направлением поля, который определяется выражением

$$\cos \theta = \frac{2H \mp J_2 M}{2J_1 m}. \quad (2)$$

Эта фаза является исходным состоянием ферромагнетика при условии  $M/2m < J_1/J_2$ ; в числителе знак минус, если  $J_1 > J_2$ , в противном случае — плюс. При обратном условии  $M/2m > J_1/J_2$  исходной является фаза А. Все фазовые переходы являются фазовыми переходами второго рода, критические поля определяются следующими формулами:

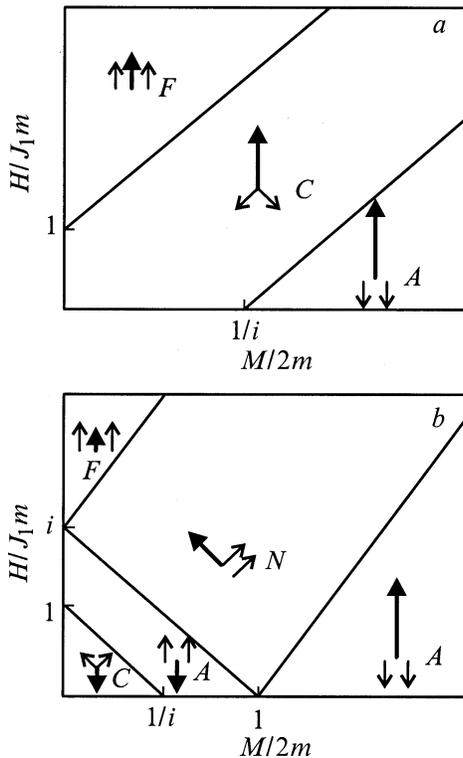
$$H_{C \leftrightarrow A} = \begin{cases} J_1 m - J_2 M/2 & \text{при } J_1 < J_2, \\ -J_1 m + J_2 M/2 & \text{при } J_1 > J_2; \end{cases}$$

$$H_{C \leftrightarrow F} = J_1 m + J_2 M/2;$$

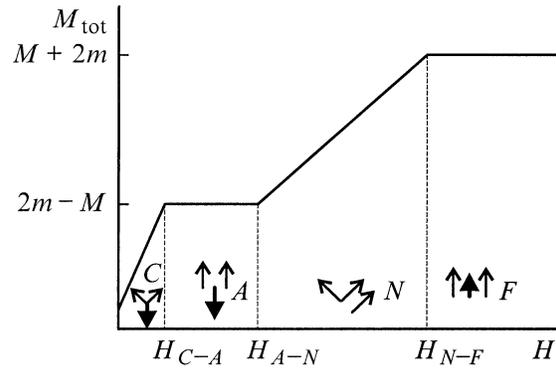
$$H_{A \leftrightarrow N} = J_2 |M - 2m|/2;$$

$$H_{N \leftrightarrow F} = J_2 (M + 2m)/2. \quad (3)$$

Магнитные фазовые диаграммы приведены на рис. 1. На рис. 2 изображена самая интересная кривая намагничивания с тремя фазовыми переходами второго рода, которая реализуется при  $J_1 < J_2$  и  $M/2m < J_1/J_2$ . При значениях параметров, не удовлетворяющих этим соотношениям, кривые намагничивания содержат либо один переход  $C \rightarrow F$ , либо два перехода  $A \rightarrow C \rightarrow F$  или  $F \rightarrow N \rightarrow F$ .



**Рис. 1.** Магнитные фазовые диаграммы ферромагнетика с антиферромагнитным обменным взаимодействием в одной из подрешеток (изотропный случай): для  $J_1 > J_2$  (a) и для  $J_1 < J_2$ ,  $i = J_2/J_1$  (b). Сплошными линиями показаны фазовые переходы второго рода.



**Рис. 2.** Схематическая кривая намагничивания в случае фазовой диаграммы рис. 1, b при  $M/2m < J_1/J_2 = 1/i$ .

3. Выход за пределы обменного приближения и учет конечной анизотропии для обеих подрешеток является весьма актуальной и интересной задачей. Результаты для этой ситуации вынесены нами в отдельную статью, а в данной работе рассмотрен предельный случай бесконечно большой анизотропии (изинговский случай). Для этого случая в термодинамическом потенциале (1) скалярные произведения векторов магнитных моментов должны быть заменены на произведения проекций магнитных моментов на изинговскую ось, поскольку остальные проекции равны нулю. При этом неколлинеарная и треугольная фазы реализоваться не могут, а к ферромагнитной (A) и ферромагнитной (F) фазам добавится еще одна коллинеарная фаза, в которой  $\mathbf{m}_1$  и  $\mathbf{m}_2$  упорядочены антиферромагнитно, обозначим ее AF. В этом случае реализуются три типа фазовых диаграмм, которые для разных соотношений обменных параметров  $J_1$  и  $J_2$  приведены на рис. 3. Все фазовые переходы являются фазовыми переходами первого рода. Кривые намагничивания характеризуются одним или двумя скачками, которые происходят в критических полях

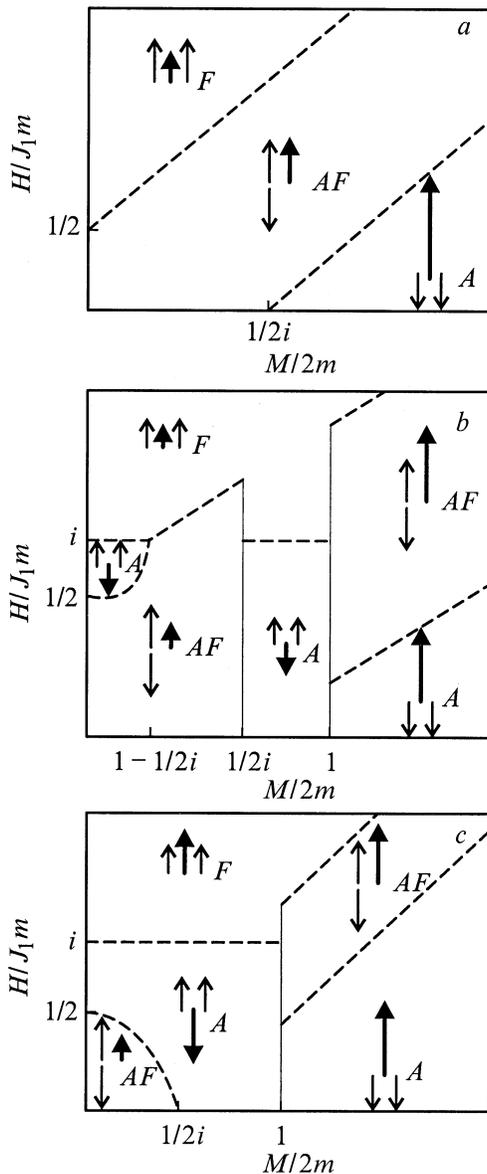
$$H_{A \leftrightarrow AF} = (J_2 M - J_1 m)/2;$$

$$H_{AF \leftrightarrow A} = \frac{(J_1 m - J_2 M)m}{2(m - M)};$$

$$H_{AF \leftrightarrow F} = (J_2 M + J_1 m)/2;$$

$$H_{\leftrightarrow F} = J_2 m. \quad (4)$$

Обратим внимание, что поле перехода между фазами A и AF зависит от того, какая из фаз является исходной; в формулах (4) выражения для  $H_{A \leftrightarrow AF}$  и  $H_{AF \leftrightarrow A}$  разные. В случае, когда исходной является фаза AF, критическое поле является нелинейной функцией M и m, это видно также на фазовых диаграммах рис. 3, b, c. Все остальные критические поля являются линейными функциями намагниченностей подрешеток. Особенностью фазового перехода  $AF \rightarrow A$  является то, что при нем изменяет ориентацию не один, как при всех остальных фазовых



**Рис. 3.** То же, что на рис. 1 для изинговского случая при различных соотношениях обменных параметров:  $J_1 > 2J_2$  (a);  $J_2 < J_1 < 2J_2$  (b);  $J_1 < J_2$ ,  $i = J_2/J_1$  (c). Штриховыми линиями показаны фазовые переходы первого рода.

переходах, а два магнитных момента, суммарная намагниченность изменяется при этом от  $M$  до  $2m - M$ .

4. Таким образом, в данной работе в модели эффективного поля рассчитаны магнитные фазовые диаграммы ферримагнетиков с антиферромагнитным обменным взаимодействием в одной из подрешеток для изотропного и изинговского случаев. Рассмотрение этих предельных по магнитной анизотропии случаев является необходимым этапом в решении задачи для ферримагнетика такого типа при произвольной анизотропии. К ферримагнетикам рассматриваемого типа следует отнести тройные интерметаллические соединения с редкой землей и марганцем  $RMn_2X_2$ , которые для некоторых чистых и разбавленных

редких земель в определенных интервалах температур характеризуются антиферромагнитным обменным взаимодействием как внутри марганцевой подсистемы, так и между редкой землей и марганцем. Редкоземельная подсистема в этих соединениях должна быть изотропной для  $R = Gd$ , поскольку  $Gd^{3+}$  является  $S$ -ионом, и изинговской, например для  $R = Dy$ , поскольку такова одноионная природа анизотропии иона  $Dy^{3+}$ . Имеющиеся экспериментальные данные для магнитных свойств соединений  $RMn_2X_2$  [3–5] свидетельствуют о необходимости рассмотрения треугольного упорядочения для магнитных моментов редкой земли и марганца, а следовательно, об актуальности развития модели Яфета–Киттеля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект № 96-02-16373) и INTAS–РФФИ (проект № 95-641).

### Список литературы

- [1] Y. Yafel, C. Kittel. Phys. Rev. **87**, 290 (1952).
- [2] С. Крупичка. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов, т. 1. Мир, М. (1976). 353 с.
- [3] N. Iwata, K. Hattori, T. Shigeoka. J. Magn. Magn. Mater. **53**, 318 (1986).
- [4] H. Kobayashi, H. Onodera, H. Yamamoto. J. Magn. Magn. Mater. **79**, 76 (1989).
- [5] H. Kobayashi, H. Onodera, Y. Yamaguchi, H. Yamamoto. Phys. Rev. **B43**, 1, 728 (1991).