

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА В ЗОННОМ ПАРАМАГНЕТИКЕ LuCo_2 ПРИ ЗАМЕЩЕНИИ КОБАЛЬТА АЛЮМИНИЕМ

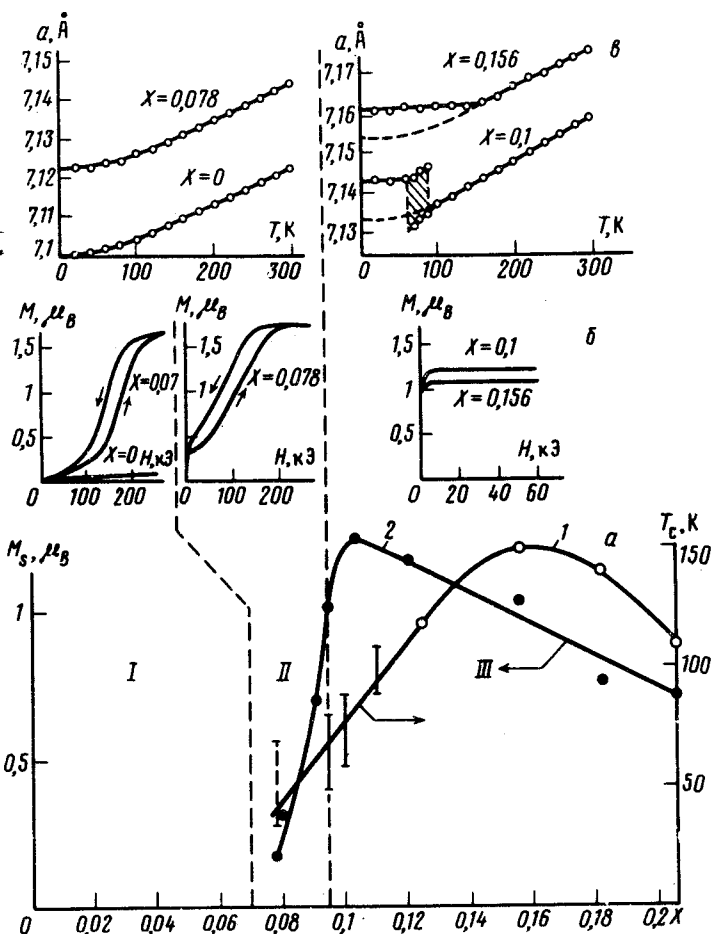
И.Л.Габелко, Р.З.Левитин, А.С.Маркосян, В.В.Снегирев

Экспериментально показано, что в системе $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ при возрастании содержания алюминия происходит переход зонный парамагнетизм – слабый ферромагнетизм – сильный ферромагнетизм. Эволюция магнитных свойств этой системы качественно объясняется в зонной модели увеличением плотности состояний на уровне Ферми при возрастании x .

Магнитные свойства d -магнетиков зависят от особенностей энергетической зонной структуры, главным образом от формы кривой зависимости плотности электронных состояний от энергии $N(\epsilon)$ и степени заполнения зоны электронами (положения уровня Ферми ϵ_F)¹. Эти характеристики очень чувствительны к различным внешним воздействиям, особенно в случае резкой энергетической зависимости $N(\epsilon)$ вблизи ϵ_F . В частности, возможна ситуация, когда частичное замещение "магнитного" переходного d -металла непременным переведет зонный парамагнетик в ферромагнитное состояние. Именно такая ситуация может, в принципе, иметь место в смешанных интерметаллических соединениях на основе кубических фаз Лавеса LuCo_2 . В интерметаллиде LuCo_2 d -зона образована гибридами $3d$ -электронами кобальта и $5d$ -электронами лютетия, и уровень Ферми d -зоны лежит на спадающем участке зависимости $N(\epsilon)$, т.е. $dN(\epsilon)/d\epsilon|_{\epsilon_F} < 0$. В чистом LuCo_2 критерий зонного ферромагнетизма Стонера $N(\epsilon_F)I \geq 1$ (I – обменный интеграл) не выполняется, и это соединение является обменноусиленным парамагнетиком^{2,3}. Если опорожнять d -зону в LuCo_2 , замещая кобальт элементом с пустой d -зоной, например, алюминием, электронная конфигурация которого $3s^2 3p^1$, то уровень Ферми ϵ_F будет смещаться в сторону меньших энергий, и плотность состояний $N(\epsilon_F)$ увеличится (так как $dN(\epsilon)/d\epsilon|_{\epsilon_F} < 0$). В том случае, когда возрастает

гание $N(\epsilon_F)$ превалирует над уменьшением обменного взаимодействия из-за уменьшения числа d -электронов, фактор обменного усиления $N(\epsilon_F)I$ при замещении будет увеличиваться и, возможно, в некотором интервале концентраций начнет выполняться критерий Стонера – соединения станут ферромагнитными. Таким образом, в смешанных соединениях $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ возможна внешне парадоксальная ситуация: замещение "магнитного" кобальта "немагнитным" алюминием приведет к усилению магнетизма и к переходу из парамагнитного в ферромагнитное состояние.

Для проверки высказанных выше предположений мы провели измерения намагниченности в импульсных полях до 320 кЭ, а также параметра кристаллической решетки рентгеновским методом в интервале температур 4,2 – 300 К системы $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$. Поликристаллические образцы выплавлялись индукционным методом в режиме квазилевитации с последующим гомогенизирующим отжигом. Рентгеновские и металлографические исследования показали, что составы с $x \leq 0,208$ однофазны и имеют кубическую кристаллическую структуру типа C15 (образцы с более высоким содержанием алюминия имеют гексагональную структуру C14).



Магнитные характеристики интерметаллидов $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ ($x \leq 0,208$). *a* – Магнитная фазовая $x - T$ -диаграмма: I – парамагнитные составы, II – слабоферромагнитные составы, III – сильноферромагнитные составы. 1 – Концентрационная зависимость температуры магнитного упорядочения: \circ – переходы второго рода, сплошные вертикальные линии показывают область сосуществования различных магнитных фаз при переходах первого рода, пунктирная вертикальная линия – область исчезновения магнитного порядка; 2 – концентрационная зависимость спонтанной намагниченности при 4,2 К (\bullet); б – Кривые намагничивания типичных составов при 4,2 К. в – Температурные зависимости параметра элементарной ячейки типичных составов. Пунктир – дебаевская зависимость

Измерения показали, что замещение кобальта на алюминий в системе $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ приводит к возрастанию парамагнитной восприимчивости, а при $x \geq 0,078$ возникает ферромагнитное упорядочение. На рисунке изображена фазовая $x - T$ диаграмма системы $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$, а также показаны экспериментальные полевые зависимости намагниченности при 4,2 К и температурные зависимости параметра кристаллической решетки для некоторых типичных составов. По характеру магнитного поведения концентрационную область $0 \leq x \leq 0,208$ можно разделить на три участка.

1) Составы с $0 \leq x \leq 0,07$. Эти составы парамагнитны. Температурные зависимости параметра решетки описываются дебаевской зависимостью. При возрастании содержания алюминия восприимчивость возрастает и в составах с $x = 0,06$ и $x = 0,07$ обнаружены метамагнитные переходы во внешнем поле в ферромагнитное состояние, причем с ростом x поле перехода уменьшается.

2) В составах с $0,078 \leq x \leq 0,09$ возникает ферромагнитное упорядочение. Магнитный момент составляет $0,2 - 0,7 \mu_B$ на ф. ед. и растет с увеличением содержания алюминия. Фазовый переход ферромагнетизм – парамагнетизм размыт и точное определение температуры магнитного упорядочения является затруднительным. Отметим, что спонтанная намагниченность этих составов зависит от их магнитной предыстории. Отклонения температурных зависимостей от дебаевских малы (меньше чувствительности рентгеновского метода). Во внешнем поле наблюдается метамагнитный переход в состояние с большим магнитным моментом.

3) Соединения с $0,095 \leq x \leq 0,208$ также ферромагнитны, но их магнитный момент существенно больше $0,7 - 1,2 \mu_B$ на ф. ед. Переход из парамагнитного в ферромагнитное состояние сопровождается магнитообъемной аномалией (отклонение $a(T)$ от дебаевской зависимости). В составах с $0,095 \leq x \leq 0,11$ этот переход является фазовым переходом первого рода, что хорошо заметно на кривых $a(T)$. В температурной области $\sim 20 - 30$ К вблизи температуры магнитного упорядочения T_c парамагнитная и ферромагнитная фазы сосуществуют друг с другом, и при изменении температуры меняется относительная доля этих фаз в объеме образца.

Полученные результаты свидетельствуют о правильности предположения, что уровень Ферми в LuCo_2 расположен на крутом спадающем участке $N(\epsilon)$. Мы обращаем внимание на то, что в парамагнитной и слабоферромагнитной фазах внешнее магнитное поле индуцирует сильноферромагнитное состояние. Такое поведение зонной системы, впервые рассмотренное теоретически в ⁶, свидетельствует о том, что зависимость $N(\epsilon)$ вблизи ϵ_F обладает положительной кривизной ($d^2N(\epsilon)/d\epsilon^2|_{\epsilon_F} > 0$).

Отметим, что в области малых концентраций алюминия поведение системы $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ качественно аналогично поведению $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ ⁴, где d -зона образована гибридизацией $3d$ -электронов кобальта и $4d$ -электронов иттрия. Вместе с тем, хотя в обеих системах при увеличении концентрации алюминия наблюдается явление метамагнетизма d -электронов, в $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ сильноферромагнитной фазы не образуется вплоть до предельной концентрации $x_{\text{пр}} = 0,2$. Исходя из имеющихся сведений об энергетической структуре YCo_2 и LuCo_2 ^{3, 5} эти различия не удастся объяснить в рамках модели жесткой зоны. По-видимому, в составах с большими замещениями существенными становятся эффекты, обусловленные влиянием на зонную структуру изменения межатомных расстояний.

Литература

1. Cyrot M., Lavagna M. J. Phys., 1979, 40, 763.
2. Burzo E., Lazar D.P. Sol. St. Comm., 1976, 18, 381.
3. Ymada H., Inoue J., Shimizu M. J. Phys. F: Met. Phys., 1962, 7, 1817.
4. Александрян В.В., Лагутин А.С., Левитин П.З., Маркосян А.С., Снегурев В.В. ЖЭТФ, 1985, 89, 271.
5. Ymada H., Inoue J., Terao K., Handa S., Shimizu M. J. Phys. F: Met. Phys., 1984, 14, 1943.
6. Wohlfarth E.P., Rhodes P. Phil. Mag., 1962, 7, 1817.

Московский

государственный университет им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию

3 марта 1987 г.