

## МАГНИТНАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$

© 2011 Т. Г. Аминов, Г. Г. Шабунина, Д. И. Кирдянкин, Е. В. Бушева, В. М. Новоторцев

Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Ленинский пр. 31, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию: 14.02.2011 г.

**Аннотация.** Изучена магнитная фазовая диаграмма твердых растворов, образованных ферри-магнетиком  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  ( $T_C = 347$  К) и антиферромагнетиком  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  ( $T_N = 35$  К), которые кристаллизуются в структуре  $F\bar{4}3m$  ( $T_d^2$ ). С этой целью в широком интервале полей (0,05—40 кЭ) и температур (5—300 К) измерены магнитные свойства образцов этих твердых растворов  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$ , где:  $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,42; 0,45; 0,46; 0,48; 0,5$ .

**Ключевые слова:** спиновое стекло, магнитный полупроводник.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе изучена магнитная фазовая диаграмма системы  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$ , представляющей собой твердые растворы двух полупроводниковых соединений: ферримагнетика  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  и антиферромагнетика  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ . Оба этих магнитных полупроводника принадлежат к широкому классу шпинельных соединений типа  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ), где тетраэдрические А-узлы заняты равными количествами одно- и трехвалентных катионов.

А-узлы в шпинельной структуре образуют две эквивалентные гранцентрированные решетки Браве, где каждый узел одной решетки окружен четырьмя узлами другой такой же решетки [1—2]. Для разновалентных ионов  $\text{A}^{1+}$  и  $\text{A}^{3+}$  в соединениях  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  это обуславливает возможность упорядочения в тетраэдрической подрешетке по типу 1 : 1.

Свойства соединений  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  ( $\text{A}^{1+} = \text{Li}^{1+}, \text{Cu}^{1+}, \text{Ag}^{1+}; \text{A}^{3+} = \text{Al}^{3+}, \text{Ga}^{3+}, \text{In}^{3+}$ ) исследованы в работах [3—12]. Наиболее подробно изучен крайний состав обсуждаемой нами системы  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$ , а именно  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , который согласно данным нейтронной дифракции является антиферромагнетиком ( $T_N = 35$  К [5]) с четырьмя магнитными подрешетками, намагниченности которых направлены вдоль пространственных диагоналей куба из ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . Магнитная структура соединения соизмерима с его кристаллической структурой, при этом магнитные моменты ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в четырех В-узлах одного октанта  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  принадлежат разным магнитным подрешеткам.

Вследствие разницы в значениях радиусов  $r_{\text{Cu}^{1+}}$  и  $r_{\text{In}^{3+}}$  (а также электроотрицательностей) анионные тетраэдры в  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  с центрами из катионов  $\text{Cu}^{1+}$  и  $\text{In}^{3+}$ , не являются эквивалентными. Для описания положения анионов в решетке следует брать в расчет два параметра — расстояния  $\text{Cu}^{1+}\text{-S}$  и  $\text{In}^{3+}\text{-S}$ , различающиеся между собой. В итоге симметрия точечной группы октаэдрических узлов в  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  будет не  $3\bar{m}$  (как для шпинели), а  $3m$ , так как окта-узел, находившийся ранее (при  $O_h$  — симметрии) на одинаковом расстоянии  $r_0$  от ближайших соседей, делится теперь на два узла с расстояниями до соседей, равными  $r_0(1 \pm \Delta_0)$ .

В этом случае центральный ион  $\text{Cr}^{3+}$  в соединениях  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  будет расположен ближе к одной тройке своих ближайших соседей — ионов  $\text{Cr}^{3+}$  на расстоянии  $r_0(1 - \Delta_0)$ , чем к другой тройке ближайших соседей — ионов  $\text{Cr}^{3+}$  на расстоянии  $r_0(1 + \Delta_0)$ . Со спинами ионов  $\text{Cr}^{3+}$ , расположенных на расстоянии  $r_0(1 + \Delta_0)$ , данный ион будет взаимодействовать ферромагнитно, а с результирующей спинов, расположенных на расстоянии  $r_0(1 - \Delta_0)$ , — антиферромагнитно.

Если каждую результирующую четырех магнитных моментов ближайших ионов  $\text{Cr}^{3+}$ , которые взаимодействуют ферромагнитно в составе тетраэдра, заменить на один магнитный момент, локализованный в его центре, то такие суммарные моменты образуют в  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  ниже  $T_N$  простую магнитную гранцентрированную решетку Бравэ с антиферромагнитным упорядочением первого рода.

Другому крайнему составу исследуемой системы  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$ , а именно  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , со-

гласно данным нейтронографии свойственен коллинеарный ферримагнетизм, как при комнатной, так и при гелиевой температурах с  $T_c = 341\text{—}347\text{ K}$  [7—9]. При  $x = 0$  валентное и катионное распределение в твердом растворе отвечают общей формуле соединений  $A_{0,5}^{1+}A_{0,5}^{3+}Cr_2S_4$  с упорядочением ионов меди и железа в тетраэдрических позициях шпильной решетки по типу 1 : 1 [8].

В этом случае, подобно  $Cu_{0,5}In_{0,5}Cr_2S_4$ , тетраэдрическая и анионная подрешетки по отдельности разбиваются на две неэквивалентные подрешетки [4], в которых тетраэдрические ионы  $Fe^{3+}$  координированы с серой S1, а тетраэдрические ионы  $Cu^{+}$  — с серой S2. Длины связей Fe—S1 короче длин связей Cu—S2 в соответствии со значениями ионных радиусов  $R_{Fe^{3+}} = 0,63\text{ \AA}$  и  $R_{Cu^{+}} = 0,74\text{ \AA}$ . Структура  $Cu_{0,5}Fe_{0,5}Cr_2S_4$  аналогично  $Cu_{0,5}In_{0,5}Cr_2S_4$  образуется из бесконечных цепей  $CrS_6$ -октаэдров, вершины которых соединяются с вершинами тетраэдров  $FeS_4$  ( $InS_4$ ) и  $CuS_4$ , чередующихся в правильном порядке [7].

В соответствии со строением и химической формулой рассмотренных выше соединений в пятерном твердом растворе  $Cu_{0,5}Fe_{0,5-x}In_xCr_2S_4$ , объекте данного исследования, происходит статистическое замещение в тетраэдрических узлах парамагнитных ионов  $Fe^{3+}$  на диамагнитные ионы  $In^{3+}$ . Выявлению образующихся при этом магнитных структур и построению магнитной фазовой диаграммы твердых растворов  $Cu_{0,5}Fe_{0,5-x}In_xCr_2S_4$  посвящена данная работа.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходными веществами для получения твердых растворов  $Cu_{0,5}Fe_{0,5-x}In_xCr_2S_4$  служили элементы: In-000 (99,999%), S (ос. ч.) с содержанием серы не менее 99,999%, карбонильное Fe (99,99%), порошкообразные Cu (99,99%) и Cr (99,8%) производства Koch Light. Синтезы проводили методом твердофазных реакций в кварцевых ампулах, откачанных до  $10^{-2}$  Па.

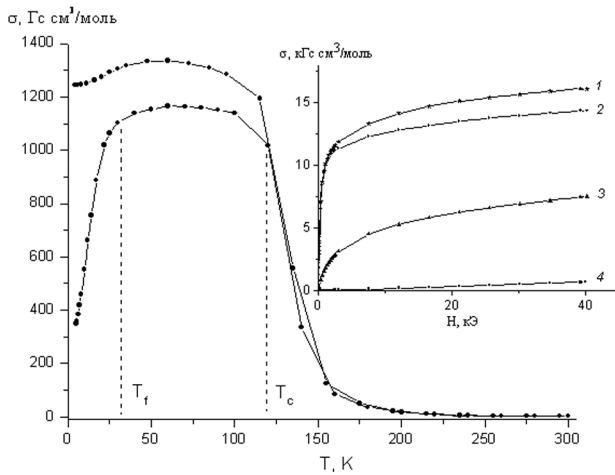
Рентгенофазовый анализ образцов осуществляли на дифрактометре Rigaku D/MAX 2500 с вращающимся Cu-анодом и максимальной мощностью рентгеновской трубки 18 кВт. Съёмку выполняли при  $2\theta = 20\text{—}70^\circ$ . Полученные спектры сравнивали со спектрами из базы данных PDF2, для обработки спектров РФА использовали программу WinXpov(STOE). Точность измерения параметра решетки в среднем составляла  $0,002\text{—}0,006\text{ \AA}$ .

Были синтезированы образцы  $Cu_{0,5}Fe_{0,5-x}In_xCr_2S_4$  следующих составов:  $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,42;$

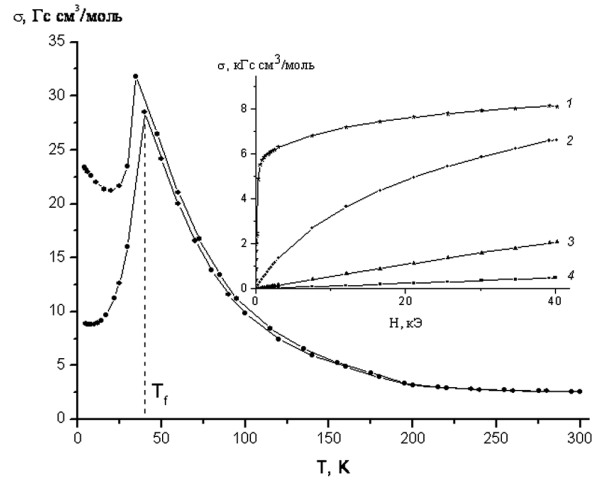
$0,45; 0,46; 0,48; 0,5$ . По данным РФА в системе  $Cu_{0,5}Fe_{0,5}Cr_2S_4\text{—}Cu_{0,5}In_{0,5}Cr_2S_4$  существует непрерывный ряд твердых растворов, что обусловлено достаточно близкими значениями параметров решетки граничных составов, кристаллизующихся в одной и той же структуре  $F\bar{4}3m$ . Линейный характер концентрационной зависимости параметра решетки по закону Vegarda свидетельствовал в пользу образования твердых растворов замещения по схеме  $In \leftrightarrow Fe$  ( $r_{In^{3+}} = 0,76\text{ \AA}$ ;  $r_{Fe^{3+}} = 0,63\text{ \AA}$ ).

Магнитные свойства синтезированных твердых растворов измеряли с помощью сквид-магнитометра MPMS 5P Quantum Design в МТЦ СО РАН в температурном интервале  $5\text{—}300\text{ K}$  в слабом (50 Э) и сильном (40 кЭ) магнитных полях. Температурную зависимость намагниченности определяли двумя способами, различающимися друг от друга тем, что исследуемый образец охлаждается в нулевом и ненулевом магнитном поле. В первом случае — ZFC-охлаждение проводили до температуры жидкого гелия в отсутствие магнитного поля, а затем включали небольшое измерительное поле порядка 50 Э и медленно поднимали температуру, регистрируя значения намагниченности. Во втором случае — FC-методика измерений отличалась тем, что образец сразу начинали охлаждать в ненулевом измерительном магнитном поле при одновременном снятии показаний. Изотермы намагниченности измеряли вплоть до значений напряженности магнитного поля  $H = 40\text{ кЭ}$ . Температуру замораживания спинов находили по максимуму на температурной зависимости начальной намагниченности образцов, охлажденных в нулевом поле.

На рис. 1 показаны температурные зависимости намагниченности  $\sigma(T)$  — ZFC и FC-твердого раствора с  $x = 0,3$  (состав  $Cu_{0,5}Fe_{0,2}In_{0,3}Cr_2S_4$ ) в интервале от комнатной до гелиевой температуры в слабом магнитном поле  $H = 50\text{ Э}$ . Как видно, зависимость  $\sigma(T)$  — ZFC для данного образца характеризуется двумя максимумами производной намагниченности по температуре, первый из которых отвечает переходу твердого раствора из парамагнитного состояния в ферримагнитное состояние с температурой Кюри  $T_c = 120\text{ K}$ . Второй максимум отвечает переходу из ферримагнитного состояния в локальное состояние возвратного спинового стекла с температурой замораживания спинов  $T_f \approx 30\text{ K}$ . На вставке к рис. 1 для этого же состава приведены полевые зависимости намагниченности при температурах  $T = 4, 50, 150$  и  $300\text{ K}$ . Здесь на себя обращает внимание то, что наклон кривой  $\sigma(H)$  к оси температур при



**Рис. 1.** Температурные зависимости намагниченности твердого раствора  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,2}\text{In}_{0,3}\text{Cr}_2\text{S}_4$  в магнитном поле  $H = 50$  Э. На вставке приведены полевые зависимости намагниченности этого же состава при  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К

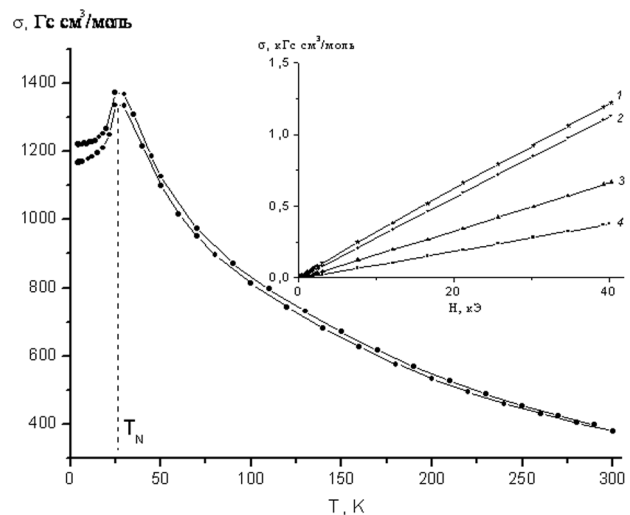


**Рис. 2.** Температурные зависимости намагниченности твердого раствора  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,1}\text{In}_{0,4}\text{Cr}_2\text{S}_4$  в магнитном поле  $H = 50$  Э. На вставке приведены полевые зависимости намагниченности этого же состава при  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К

$T = 4$  К под влиянием образовавшегося спинового стекла характеризуется большей величиной угла, чем в случае кривой  $\sigma(H)$  при  $T = 50$  К, когда спиновое стекло в системе еще не образовалось.

На рис. 2 представлены температурные зависимости намагниченности  $\sigma(T)$  —  $ZFC$  и  $FC$ -твердого раствора с  $x = 0,4$  (состав  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,1}\text{In}_{0,4}\text{Cr}_2\text{S}_4$ ) в интервале от комнатной до гелиевой температуры также в слабом магнитном поле  $H = 50$  Э. По сравнению с рис. 1, зависимость  $\sigma(T)$  в данном случае имеет совсем иной характер и наиболее отвечает магнитному переходу типа «парамагнетик — спиновое стекло» с температурой замораживания спинов  $T_f = 40$  К. На вставке к рис. 2 для указанного состава приведены полевые зависимости намагниченности  $\sigma(H)$  при температурах  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К, которые свидетельствуют в пользу образования в системе кластерного спинового стекла коллективного ферронного типа. В частности, об этом говорят значительная остаточная намагниченность  $\sigma(H)$  при  $T = 5$  К в условиях спин-стеклового состояния и быстрое возрастание зависимости  $\sigma(T)$  при температурах ниже  $20$  К.

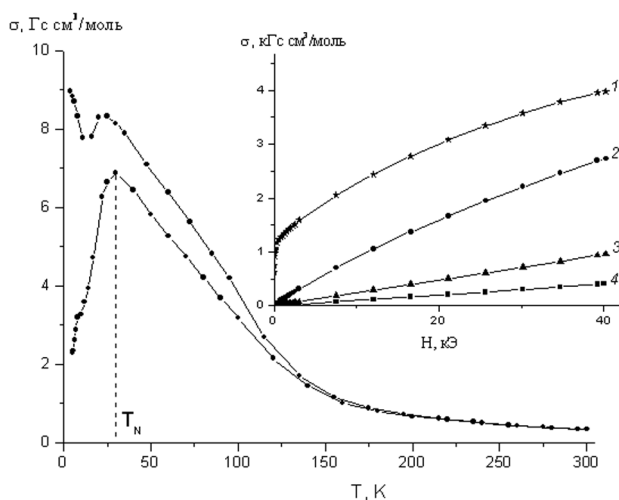
Температурные зависимости намагниченности ( $ZFC$  и  $FC$ ) соединения  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , являющегося граничным составом твердого раствора  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$  ( $x = 0,5$ ), при сильном магнитном поле  $H = 40$  кЭ показаны на рис. 3. Представленные зависимости  $\sigma(T)$  говорят о том, что синтезированное соединение является однородным антиферромагнетиком с температурой Нееля  $T_N \approx 28$  К. Об этом же на вставке к рис. 3 свидетельствуют по-



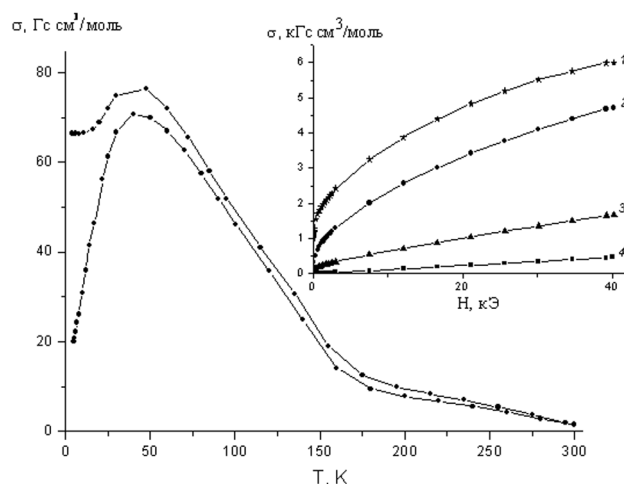
**Рис. 3.** Температурные зависимости намагниченности соединения  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  в магнитном поле  $H = 40$  кЭ. На вставке приведены полевые зависимости намагниченности этого же соединения при  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К

левые зависимости намагниченности  $\sigma(H)$  данного соединения, которые сохраняют линейный характер при всех температурах измерения ( $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К).

На рис. 4 и 5 приведены температурные зависимости намагниченности ( $ZFC$  и  $FC$ ) твердых растворов с  $x = 0,42$  (состав  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,08}\text{In}_{0,42}\text{Cr}_2\text{S}_4$ ) и  $x = 0,46$  (состав  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,04}\text{In}_{0,46}\text{Cr}_2\text{S}_4$ ) в слабом магнитном поле  $H = 50$  Э для интервала температур от комнатной до гелиевой. Образец с  $x = 0,46$  (рис. 4) располагается в достаточной близости к граничному составу с  $x = 0,5$ , являющемуся одно-



**Рис. 4.** Температурные зависимости намагниченности твердого раствора  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,04}\text{In}_{0,46}\text{Cr}_2\text{S}_4$  в магнитном поле  $H = 50$  Э. На вставке приведены полевые зависимости намагниченности этого же состава при  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К



**Рис. 5.** Температурные зависимости намагниченности твердого раствора  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,08}\text{In}_{0,42}\text{Cr}_2\text{S}_4$  в магнитном поле  $H = 50$  Э. На вставке приведены полевые зависимости намагниченности этого же состава при  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К

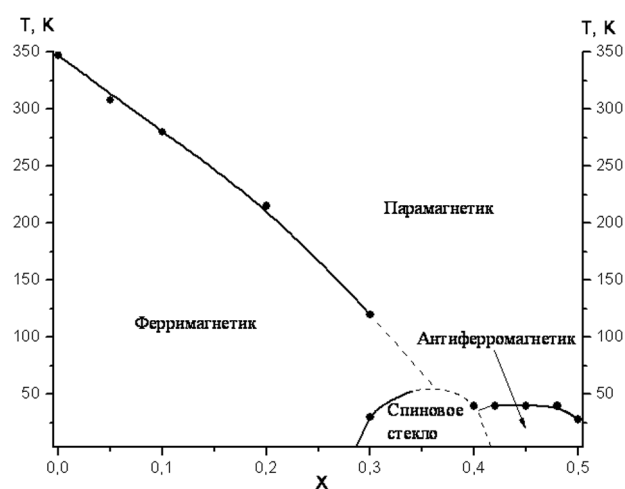
родным антиферромагнетиком, и сохраняет с ним много общих черт, хотя и обнаруживает заметную величину остаточной намагниченности. Это видно по вставке к рис. 4, где для данного состава приведены полевые зависимости намагниченности при различных температурах  $T = 4, 50, 150$  и  $300$  К.

Образец с  $x = 0,42$  (рис. 5) находится вблизи границы устойчивости антиферромагнитной фазы. Как видно из рис. 5, в районе данной концентрации происходит разрушение в твердом растворе дальнего антиферромагнитного порядка, свойственного для  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , и начинается переход к спин-стеклообразной фазе, которая обычно ассоциируется с ближним магнитным порядком. Однако даже в таких условиях распада структуры можно приблизительно оценить для образца значения критических температур  $T_N$  и  $T_f$ .

Проведенное экспериментальное исследование позволило построить магнитную фазовую диаграмму твердых растворов  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$ , показанную на рис. 6. Помимо составов, которые были рассмотрены выше, на диаграмме проставлены некоторые точки из ферримагнитной области, которым в силу ограничений формата в тексте не уделено достаточного внимания. Наибольшую площадь, как и в случае [11], на диаграмме занимают ферримагнитные составы на основе  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , в которых с понижением температуры наблюдается возвратный переход в спин-стеклообразное состояние. Далее с возрастанием содержания индия в твердых растворах происходят переходы из пара-

магнитной области в спин-стеклообразное и антиферромагнитное состояния.

Кроме этих температурно-зависимых переходов в  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$  с ростом  $x$  имеют место концентрационные переходы: «ферримагнетик — парамагнетик» и «парамагнетик — антиферромагнетик», а также переходы типа «ферримагнетик — спиновое стекло» в районе  $x \approx 0,37$  и «спиновое стекло — антиферромагнетик» в районе  $x \approx 0,42$ . На магнитной фазовой диаграмме твердых растворов  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$  (рис. 6), таким образом, присутствуют четыре области: ферримагнитная, парамагнитная, антиферромагнитная и область спинового стекла.



**Рис. 6.** Магнитная фазовая диаграмма твердых растворов  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во введении отмечалось, что из соединений типа  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  к числу наиболее изученных относится антиферромагнетик  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , крайний состав нашей системы  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  —  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ . Ранее для этого вещества методом нейтронографии было показано [5], что выше  $T_N = 35$  К дальний антиферромагнитный порядок в соединении исчезает, но вплоть до  $T = 85$  К сохраняется ближний магнитный порядок, ответственный за вероятное возникновение в данном интервале температур спин-стекольного состояния. По мнению [5 и др.], состояние спинового стекла вызывается фрустрацией магнитных связей, которая свойственна для некоторых типов кристаллических решеток. Гранецентрированная решетка, аналогичная  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , с антиферромагнитными взаимодействиями между ближайшими соседями, много большими, чем взаимодействия с соседями, следующими за ближайшими, является одной из таких решеток.

Кроме того, другая особенность соединений типа  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  и, в частности,  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , заключается в том, что здесь каждому иону  $\text{Cr}^{3+}$ , видимо, свойственны как 90-градусное ферромагнитное сверхобменное взаимодействие с тремя соседями на расстоянии  $r_0(1 + \Delta_0)$ , так и антиферромагнитное прямое  $d-d$  обменное взаимодействие с тремя соседями на расстоянии  $r_0(1 - \Delta_0)$ . Формирование такой необычной магнитной структуры в соединениях  $\text{A}_{0,5}^{1+}\text{A}_{0,5}^{3+}\text{Cr}_2\text{X}_4$  можно объяснить преимущественным взаимодействием каждого иона  $\text{Cr}^{3+}$  с шестью ближайшими соседями, тогда как взаимодействие с более удаленными соседями не превышает нескольких процентов [5].

Приведенные соображения служат обоснованием повышенной склонности обсуждаемых соединений к переходу в спин-стекольное состояние. Определение температуры Нееля для  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , выполненное при  $H = 10$ — $110$  кЭ [5], дало величину  $T_N = 35$  К, тогда как максимуму отражения (100) на нейтронограмме соответствовала температура  $T = 29$  К, практически совпадающая с нашими магнитными измерениями ( $T_N = 28$  К, рис. 3). Автору [5] не удалось с помощью использованных методов определить температуру перехода соединения  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  в спин-стекольное состояние. Эта задача и сейчас является трудно решаемой вследствие имеющего место перекрытия пиков антиферромагнитного и спин-стекольного переходов и т.п. Стандартный метод определения температуры замораживания спинов по максимуму на

температурной зависимости начальной намагниченности в слабом поле не полностью устраняет возникающие трудности, включая также те, которые связаны с неконтролируемыми примесями и нестехиометрией образцов или частичной раскомпенсацией спинов. В подобных ситуациях весьма желательными являются измерения динамических температурных и полевых зависимостей намагниченности при различных значениях  $H$  и  $T$ .

## ВЫВОДЫ

Построена магнитная фазовая диаграмма твердых растворов ферримагнетика  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$  и антиферромагнетика  $\text{Cu}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ , кристаллизующихся в структуре  $F\bar{4}3m$  ( $T_d^2$ ). В процессе исследования синтезированы образцы  $\text{Cu}_{0,5}\text{Fe}_{0,5-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{S}_4$  в области составов  $x = 0$ — $0,5$  и измерены их магнитные свойства в широком интервале полей и температур.

Авторы благодарны А. С. Богомякову (МТЦ СО РАН) за магнитные измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект № 09-03-00645) и Фонда Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ (НШ-8503.2010.3) и целевых программ фундаментальных исследований Президиума РАН и ОХНМ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутичка С. Физика ферритов и родственных магнитных окислов. М.: Мир, 1976. Т. 1. 353 с.
2. Таланов В. М. Журнал структ. Химии. 1986. Т. 31. № 2. С. 172—176.
3. Lotgering F. K., van Stapele R. P., van der Steen G. H., et al. // J. Phys. Chem. Solids. 1969. № 30. P. 799.
4. Plumier R., Sougi M., Lecomte M. // Phys. Lett. 1977. A 60. P. 341.
5. Plumier R., Sougi M., Lecomte M., et al. // Condensed Matter. B. 1980. № 40. P. 227-231.
6. Королева Л. И. Магнитные полупроводники. М.: МГУ, 2003. 312 с.
7. Palmer H. M., Greaves C. // J. Mater. Chem. 1999. V. 9. P. 637-640.
8. Ковтун Н. М., Шемяков А. А., Прокопенко В. К. и др. // Физ. твердого тела. 1983. Т. 25. № 10. С. 2954—2959.
9. Зарицкий В. Н., Садьков Р. А., Костюк Я. И. и др. // Физ. твердого тела. 1986. Т. 28. № 11. С. 3292—3298.
10. Gobel H., Pink H., Treitinger L., et al. // Mat. Res. Bull. 1975. V. 10. P. 783—786.
11. Pinch H. L., Woods M. J., Lopatin E. // Mat. Res. Bull. 1970. V. 5. P. 425—429.
12. Аминов Т. Г., Шабунина Г. Г., Кирдянкин Д. И. и др. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. Т. 11. № 3. С. 190.

*Аминов Тельман Газизович* — д.х.н., профессор Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН; тел.: (495) 9543841, e-mail: aminov@igic.ras.ru

*Шабунина Галина Георгиевна* — к.х.н., старший научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН; тел.: (495) 9543841, e-mail: info@igic.ras.ru

*Кирдянкин Денис Иванович* — аспирант Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН; тел.: (495) 9543841, e-mail: info@igic.ras.ru

*Бушева Елена Владимировна* — к.х.н., старший научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН; тел.: (495) 9543841, e-mail: info@igic.ras.ru

*Новоторцев Владимир Михайлович* — д.х.н., академик, директор Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН; тел.: (495) 9520224, e-mail: vmnov@igic.ras.ru

*Aminov Telman.G.* — grand PhD (chemical sciences), professor of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences; tel.: (495) 9543841, e-mail: aminov@igic.ras.ru

*Shabunina Galina G.* — PhD (chemical sciences), senior scientific employee of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences; tel.: (495) 9543841, e-mail: info@igic.ras.ru

*Kirdyankin Denis I.* — PhD student of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences; tel.: (495) 9543841, e-mail: info@igic.ras.ru

*Busheva Elena V.* — PhD (chemical sciences), senior scientific employee of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences; tel.: (495) 9543841, e-mail: info@igic.ras.ru

*Novotorcev Vladimir M.* — grand PhD (chemical sciences), academician, director of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences; tel.: (495) 9520224, e-mail: vmnov@igic.ras.ru