

НОВЫЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$

© 2011 Т. Г. Аминов, Г. Г. Шабунина, Е. В. Бушева

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

Поступила в редакцию 21.03.2011 г.

Аннотация. Синтезированы новые антиферромагнитные фазы на основе шпинельных твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=0; 0,5; 3,5$ и 4. Экспериментально установлены их основные кристаллохимические и магнитные параметры: размеры элементарной ячейки, межатомные расстояния Cr–Cr, температуры Нееля, температуры замораживания спинов, эффективные магнитные моменты, парамагнитные температуры Кюри. Проведено обсуждение полученных результатов.

Ключевые слова: магнитные полупроводники, антиферромагнетик, спиновое стекло, метамагнетик.

ВВЕДЕНИЕ

Антиферромагнитные полупроводники из группы халькогенидных шпинелей хрома известны сравнительно давно. Последние вместе с монооксидом и халькогенидами европия являются классическими магнитными полупроводниками — материалами, для которых характерна сильная взаимосвязь электрических и магнитных свойств с участием электронов проводимости [1]. В 1989 году данное семейство пополнилось — был обнаружен флоренсовит [2], новый минерал $\text{Cu}^+[\text{Cr}_{1,5}^{3+}\text{Sb}_{0,5}^{5+}]_4\text{S}_4^{2-}\text{ZnCr}_2\text{S}_4$, относящийся к антиферромагнитным халькогенидным шпинелям, и это событие не прошло незамеченным.

Под его влиянием были проведены исследования родственных твердых растворов $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ ($x=0 \div 0,5$), показавшие, что тип упорядочения в образцах изменяется с составом от ферромагнитного ($x=0$) до антиферромагнитного ($x=0,5$) через промежуточную стадию спинового стекла [3—4]. Металлический характер проводимости тетрасульфида дихрома меди при этом меняется на полупроводниковый.

Полученные результаты стимулировали проведение новых работ, к примеру, данного исследования, посвященного анион-замещенным твердым растворам $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ как перспективным антиферромагнитным полупроводниковым материалам. Актуальность подобных исследований обусловлена потребностями техники в новых магнитно-полупроводниковых функциональных материалах с достаточно высокими точками Кюри, что,

в общем, является необходимым условием широкого применения любых магнитных материалов [5].

Одним из путей решения подобных вопросов является создание посредством легирования в антиферромагнитном полупроводнике особых микрообластей с повышенным ферромагнитным порядком, которые с ростом концентрации лигатуры увеличивались бы в своих размерах вплоть до взаимного перекрывания, образуя высокотемпературный ферромагнитный бесконечный кластер [6—7]. Помимо практики, данный подход представляет значительный интерес для физической химии твердого тела, и, в частности, для выяснения природы спин-стеклообразного состояния и роли s - d -обмена в магнитных полупроводниковых материалах.

Антиферромагнетик $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{Cr}_2\text{S}_4$ ($T_N \approx 23$ К), называемый иногда ради простоты флоренсовитом, обычно получают путем твердофазной реакции как крайний состав твердых растворов $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ при замещении сурьмой хрома в структуре ферромагнитной квазиметаллической шпинели CuCr_2S_4 ($T_C=367$ К). Расчетная граница образования твердого раствора для модели катионного распределения: $\text{Cu}^+[\text{Cr}_{1+x}^{3+}\text{Cr}_{1-2x}^{4+}\text{Sb}_x^{5+}]_4\text{S}_4^{2-}$ лимитируется исчезновением четырехвалентного хрома при значении $x=0,5$, что соответствует составу флоренсовита. Следует отметить, что этот результат может указывать на наличие в материале односторонней области гомогенности.

С точки зрения физики магнитных явлений синтез флоренсовита крайнего состава твердого

раствора $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ ($x=0,5$) можно рассматривать, как изоморфное диамагнитное разбавление ферромагнетика CuCr_2S_4 . В случае малых значений x магнитные свойства $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ описываются простым диамагнитным разбавлением CuCr_2S_4 . Однако при дальнейшем росте x происходит разрушение дальнего ферромагнитного порядка, и твердые растворы переходят в микромагнитное состояние кластерного спинового стекла. В них наблюдаются размытие фазового перехода, нелинейная зависимость обратной магнитной восприимчивости $\chi^{-1}(T)$, уменьшение парамагнитной температуры Кюри. По достижении предельного разбавления размеры антиферромагнитно взаимодействующих между собой кластеров резко уменьшаются, и твердый раствор $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ при $x=0,5$ становится антиферромагнетиком с $T_N \approx 23$ К и $\theta = -180$ К.

В $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ крайние составы $x=0$ и $0,5$ являются однородными магнетиками, но их твердые растворы представляет собой неупорядоченные магнетики, в которых атомы разного сорта случайным образом размещены в узлах кристаллической решетки. Хаотическое расположение магнитных атомов вызывает флуктуации как величины, так и знака обменных взаимодействий между ними. Поэтому магнитная структура таких неупорядоченных веществ типа $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$ часто оказывается более сложной, чем в случае магнитно упорядоченных систем.

Настоящее исследование посвящено антиферромагнитным анион-замещенным твердым растворам $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где крайними составами являются флоренсовит $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_4$ и селеношпинель $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{Se}_4$, которые, в принципе, должны быть однородными магнетиками. Последнее утверждение нуждается в экспериментальном подтверждении, так как практическая однородность магнитного материала часто зависит от присутствия неконтролируемых дефектов и отклонения состава от стехиометрии, связанных с чистотой исходных веществ и термодинамическими условиями синтеза. Что же касается твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, то они неоднородны по определению и для подобных неупорядоченных систем из 5-компонентов вполне можно ожидать усложнения магнитной структуры или новых свойств по сравнению с магнитно однородными образцами. Сказанное подтверждается, например, исследованием анион-замещенных твердых растворов $\text{CuCr}_2\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где обнаружена сильная нелинейная зависимость магнитного момента и температуры Кюри от состава [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При синтезе новых антиферромагнитных фаз на основе анион-замещенных твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ в качестве исходных веществ использовали элементы: порошкообразные медь (99,9%) и хром (99,9%) фирмы Koch Light, сурьму (99,999%), селен осч 17-3 (99,999%), серу осч 16-5 (99,9999%). На рис. 1—4 и в табл. 1 представлены результаты исследования твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, полученных методом твердофазных реакций в вакуумированных кварцевых ампулах при температуре 560—600 °С в течение 10—17 суток.

Контроль фазового состава полученных поликристаллических образцов осуществляли методом рентгенофазового анализа (РФА). Дифрактограммы снимали на установках ДРОН-1 и Rigaku, Cu-K α излучение, Ni-фильтр. Межплоскостные расстояния исследуемых образцов сравнивали с эталонными в системе Cu-Cr-Sb-S-Se, а также с данными картотеки JCPDS. Уточнение параметра решетки для кубической сингонии осуществляли методом наименьших квадратов с помощью специально составленной программы. Однофазными при условиях опыта были составы с $x=0; 0,5; 3,5$ и 4 .

Измерения магнитных свойств образцов были проведены в МТЦ СО РАН на СКВИД-магнетометре MPMS Quantum Design в интервале температур 5—300 К и магнитных полях до 10 кЭ. Температурные зависимости намагниченности измеряли в слабом (50 Э) и сильном (10 кЭ) полях при охлаждении в поле и без поля.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 показаны температурные зависимости обратной магнитной восприимчивости $\chi^{-1}(T)$ в поле $H=10$ кЭ образцов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=4,0$ (1), $3,5$ (2), $0,5$ (3) и 0 (4). Значения парамагнитных температур Кюри θ_p , найденные экстраполяцией прямолинейной части кривой $\chi^{-1}(T)$ до ее пересечения с осью температур, приводятся в табл. 1. Как видно из таблицы, величины θ_p изменяются от $\theta_p=-104$ К ($x=0$) до $\theta_p=+34,8$ К ($x=4$), при этом скорость изменения парамагнитной температуры с составом $\Delta\theta_p/\Delta x$ для интервала $x=0 \div 4$ равна $34,7$ (К/ат.Х). Если же рассматривать каждый состав по отдельности, то изменение величины $\Delta\theta_p/\Delta x$ для интервала $x=0 \div 0,5$ будет $59,2$ (К/ат.Х), для интервала $x=0,5 \div 3,5$ будет $15,5$ (К/ат.Х) и для интервала $x=3,5 \div 4$ будет $125,6$ (К/ат.Х).

Таблица. 1. Магнитные и кристаллохимические параметры твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$

№ п/п	Состав (x)	Параметр решетки (Å)	Расстояния Cr–Cr (Å)	Магнитный момент (μB)	Парамагнитная т-ра Кюри (К)	Температуры магнитных переходов T_N и T_f (К)
1	0	10,010	3,539	3,77	-104	$T_N=21$
2	0,5	10,044	3,551	3,69	-74,4	$T_N=24$ $T_f=37$
3	3,5	10,419	3,683	3,98	-28	$T_N=29$ $T_f=40$
4	4,0	10,492	3,709	3,81	+34,8	$T_N=30$ $T_f=47$

Здесь просматриваются две тенденции. Во-первых, зависимость $\Delta\theta_p/\Delta x=f(x)$ проходит через минимум, то есть парамагнитная температура Кюри изменяется с концентрацией наиболее быстро у крайних составов. Во-вторых, изменение θ_p с составом $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ в положительном направлении имеет тенденцию к ускорению с ростом величины x , связанной с замещением атомов серы атомами селена.

Последний факт объясняется характером и величиной магнитного взаимодействия ионов Cr^{3+} с шестью его ближайшими соседями, которое в сильной степени зависит от размера диамагнитного аниона. В самом деле, именно размер диамагнитного аниона является главным фактором, определяющим расстояние между ионами Cr^{3+} . Как видно из таблицы, эти расстояния в полученных твердых растворах $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ с ростом концентрации селена от $x=0$ до $x=4$ увеличиваются от 3,539 Å до 3,709 Å.

При анализе результатов магнитных измерений обычно берут в расчет два параметра: параметр J_1 , который отвечает за антиферромагнитный прямой обмен между ионами $\text{Cr}^{3+}-\text{Cr}^{3+}$, и параметр J_2 , отвечающий за ферромагнитный 90-градусный сверхобмен $\text{Cr}^{3+}-\text{X}-\text{Cr}^{3+}$ через диамагнитный анион. С возрастанием расстояния между ближайшими соседями Cr^{3+} при переходе от аниона O^{2-} к аниону S^{2-} и далее к аниону Se^{2-} параметр J_1 уменьшается быстрее, чем параметр J_2 , поэтому суммарный интеграл J в этом ряду будет менять знак, превращаясь из антиферромагнитной константы в ферромагнитную. Соответственно, как видно из таблицы, в интервале составов $x=3,5 \div 4$ изменяется знак парамагнитной температуры Кюри θ_p , величина которой определяется суммой обменных взаимодействий, имеющих место в кристалле.

Здесь, однако, важно указать, что независимо от знака и величины θ_p все исследованные составы $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ однозначно являются антифер-

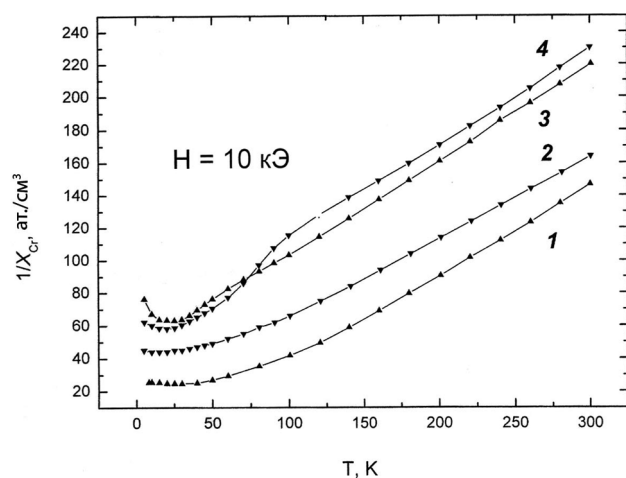


Рис. 1. Температурные зависимости обратной магнитной восприимчивости в поле $H=10$ кЭ твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=4,0$ (1), 3,5 (2), 0,5 (3) и 0 (4)

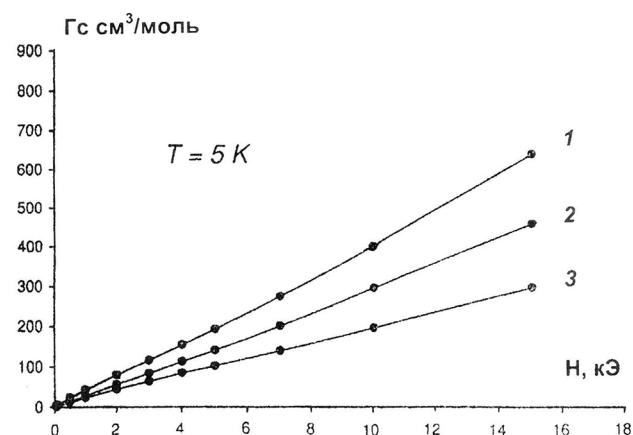


Рис. 2. Полевые зависимости намагниченности при $T=5$ К твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=4,0$ (1), 3,5 (2) и 0,5 (3)

ромагнетиками. Это подтверждается, например, линейным характером полевой зависимости намагниченности образцов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=4,0$ (1), 3,5 (2) и 0,5 (3), измеренных при температуре $T=5$ К (рис. 2). К сожалению, магнитная структура исследуемых соединений, в том числе флоренсовита, до сих пор не установлена. Возможно, что этот материал обладает антиферромагнитной структурой, близкой к шахматной. Но также не исключено, что в данном соединении имеет место более сложная магнитная структура, в которой преобладают антиферромагнитные взаимодействия.

В пользу последнего предположения свидетельствуют температурные зависимости прямой и обратной магнитных восприимчивостей в поле $H=10$ кЭ образцов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, снятые при охлаждении без поля и в поле. Почти все указанные кривые в интервале температур от 50 до 250 К имеют выраженный релаксационный характер, и в них наблюдается температурный гистерезис, затрудняющий определение величины θ_p с достаточной точностью. Значение парамагнитной температуры Кюри поэтому сильно зависит от направления проводимого измерения: при подъеме или снижении температуры. В таблице представлены значения θ_p , полученные на образцах, охлажденных без поля, при подъеме температуры. Этим фактом, помимо выбранного температурного интервала проводимых измерений, объясняется пониженная, по сравнению с данными других авторов [9], величина θ_p для состава $x=0$. Тем не менее практически все значения эффективных магнитных моментов, рассчитанные из константы Кюри, оказались очень близкими к теоретическому моменту $3,87 \mu_B$ иона Cr^{3+} в невырожденной d^3 -электронной конфигурации с суммарным спином $S=3/2$, изменяясь от 3,69 до 3,98 μ_B для интервала составов $x=0 \div 4$.

Эксперимент, таким образом, свидетельствует о различном характере концентрационной зависимости для эффективного магнитного момента и парамагнитной температуры при полном замещении атомов серы во флоренсовите на атомы селена. Для объяснения этого результата надо учитывать два фактора, а именно: конкуренцию тепловой и магнитной энергии, отражаемую законом Кюри, и антиферромагнитную природу исследуемых соединений. Независимость магнитного момента от состава твердого раствора говорит о приоритете первого фактора, положенного в основу уравнения Ланжевена, и незначительном влиянии второго

фактора, связанного с обменными антиферромагнитными взаимодействиями, на величину $\mu_{\text{эфф}}$. Или ход зависимости $\chi^{-1}(T)$ при $T=100 \div 250$ К. Тем не менее, с ростом содержания серы в образцах усиливаются отрицательные обменные взаимодействия подобно тому, как при снижении температуры в системе возникают антиферромагнитные кластеры, которые потом, укрупняясь и контактируя один с другим, образуют бесконечный антиферромагнитный кластер — магнитоактивную фазу. Как видно из таблицы, баланс в образцах положительных и отрицательных взаимодействий находит свое адекватное отражение в концентрационном поведении парамагнитной температуры Кюри.

Бесконечный антиферромагнитный кластер — исследуемую магнитоактивную фазу — иногда удобно рассматривать как матрицу, содержащую конечные кластеры другой природы. Такая ситуация изображена на рис. 3 и 4, где представлены температурные зависимости намагниченности в слабом (50 Э) и сильном (10 кЭ) магнитном полях образцов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ с $x=4,0$ (1), 3,5 (2) и 0,5 (3). Тонкими вертикальными линиями на рис. 3 показаны

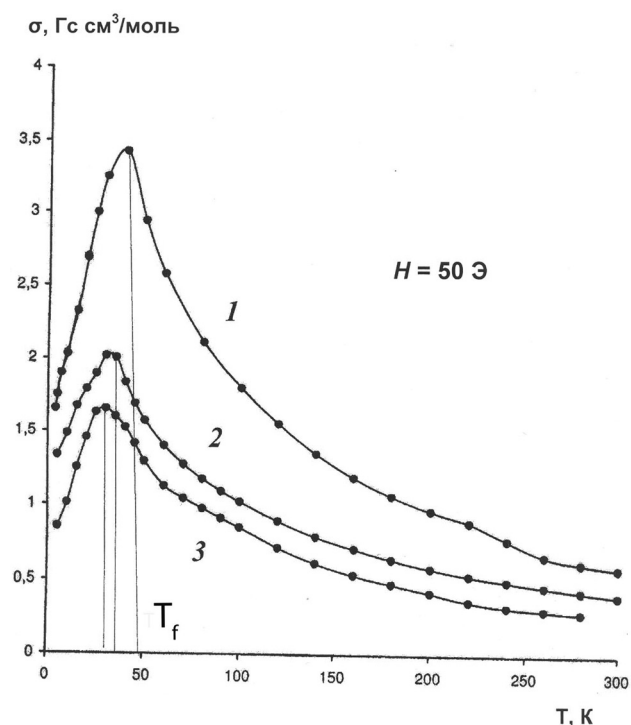


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности в слабом магнитном поле $H=50$ Э твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=4,0$ (1), 3,5 (2) и 0,5 (3). Тонкими вертикальными линиями показаны температуры перехода в спин-стекольное состояние (T_f), равные 47 К (для $x=4,0$), 40 К (для $x=3,5$) и 37 К (для $x=0,5$)

температуры перехода в локальное состояние спинового стекла (T_f), равные 47 К (для $x=4,0$), 40 К (для $x=3,5$) и 37 К (для $x=0,5$). Такие состояния обычно возникают в образце, когда нарушена стехиометрия, присутствуют антиструктурные или другие кластеризующиеся дефекты. Наконец, это могут быть отдельные кластеры матричного антиферромагнетика, не вошедшие в бесконечный кластер и ведущие себя суперпарамагнитно в силу нескомпенсированности магнитных моментов малой антиферромагнитной частицы.

Проблема, часто встречающаяся и тесно связанная с изложенной ситуацией, состоит в том, что пики антиферромагнитного и локального спин-стекольного переходов обычно близко располагаются друг от друга вплоть до частичного или полного перекрытия. В таких случаях для разделения переходов иногда дополнительно проводят эксперименты с использованием переменного измерительного поля. В нашем случае для решения проблемы оказалось достаточным проведения опытов в сильном магнитном поле (рис. 4). Как видно из этого рисунка, пики зависимостей $\sigma(T)$ в поле $H=10$ кЭ сильно размыты, что свойственно для спин-стекольного состояния и не свойственно для антиферромагнетика (если он не метамагнетик). Антиферромагнетик на рисунке идентифицируется по низкотемпературному спаду намагниченности, а спин-стекольный переход — совмещением графиков $\sigma(T)$, снятых в сильном и слабом магнитных полях. Стрелками на рис. 4 отмечены температуры T_f перехода в состояние спинового стекла в слабом поле $H=50$ Э, равные 47 К (для $x=4,0$), 40 К (для $x=3,5$) и 37 К (для $x=0,5$).

Температуры Нееля, представленные на рис. 4 и таблице, — это важнейшие характеристики антиферромагнетика, связанные с переходом материала в магнитно упорядоченное состояние. Чаще всего T_N определяют по характерному пику на температурной зависимости прямой или обратной восприимчивости. Размытость этих пиков, которая видна на рис. 4 для всех анион-замещенных составов, за исключением $x=0$, говорит о магнитной неоднородности исследуемых рентгеновски однофазных образцов. Это вполне естественное явление, так как критерий магнитной однородности требует, чтобы одинаковые магнитные атомы находились в эквивалентных атомных узлах правильной кристаллической решетки. Между тем наши образцы, будучи твердыми растворами двух, хоть и близких, но разных ферромагнитных веществ, представляют собой простейшие неупорядоченные магнетики, в

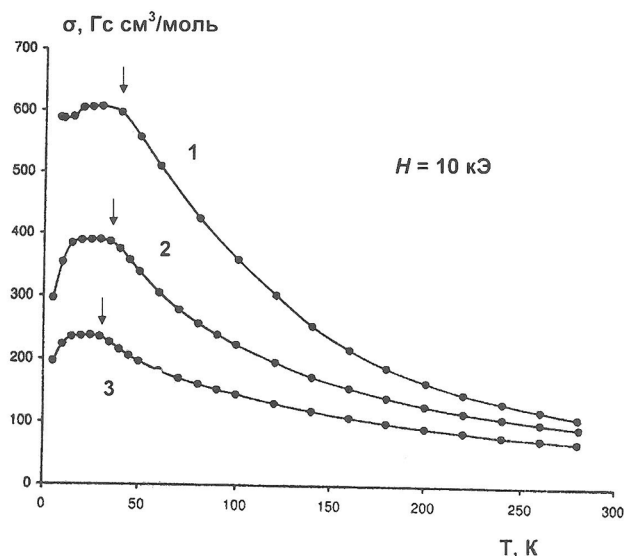


Рис. 4. Температурные зависимости намагниченности в сильном магнитном поле $H=10$ кЭ твердых растворов $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=4,0$ (1), 3,5 (2) и 0,5 (3). Стрелками показаны температуры перехода в спин-стекольное состояние (T_f) при $H=50$ Э, равные 47 К (для $x=4,0$), 40 К (для $x=3,5$) и 37 К (для $x=0,5$)

которых атомы разного сорта случайным образом размещены в узлах кристаллической решетки. Как говорилось выше, лишь состав с $x=0$ по отсутствию размытия пика на кривой $\sigma(T)$, а также отсутствию локальных спин-стекольных пиков, удовлетворяет критерию однородного магнетика. Состав с $x=4$, который в принципе должен был бы быть похож на состав с $x=0$, по-видимому, в настоящей партии нестехиометричен. В общем же полученные в работе экспериментальные результаты убедительно свидетельствуют о возможности мягкого регулирования магнитных свойств флоренсовита при получении материала с заданным набором рабочих свойств.

Авторы выражают благодарность академику В. М. Новоторцеву за полезные советы.

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.

ВЫВОДЫ

Синтезированы шпинельные твердые растворы $\text{CuCr}_{1,5}\text{Sb}_{0,5}\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$, где $x=0; 0,5; 3,5$ и 4, и измерены их магнитные свойства в интервале температур 5—300 К. Установлено, что все исследованные

образцы являются антиферромагнетиками, подчиняющимися закону Кюри в интервале температур 100—250 К с эффективными магнитными моментами от 3,69 до 3,98 магнетона Бора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Метфессель З., Маттис Д.* Магнитные полупроводники. М.: Мир, 1972.
2. *Калинин В. А., Осипенко М. С., Ольшанский А. В. и др.* // ЖВМО. 1989. № 1. С. 729—732.
3. *Арбузова Т. И., Смоляк И. Б., Аминов Т. Г. и др.* // ФТТ. 1996. Т. 38. № 4. С. 1195—1207.

4. *Арбузова Т. И., Аминов Т. Г., Бушева Е. В. и др.* // Изв. АН СССР. Неорг. Мат. 2000. Т. 36 № 2. С. 164—168.
5. *Иванов В. А., Аминов Т. Г., Новоторцев В. М. и др.* // Изв. АН. Сер. Хим. 2004. № 11. С. 2255.
6. *Нагаев Э. Л.* // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 8. С. 833—858.
7. *Nagaev E. L.* // Physics Reports. 2001. V. 346. P. 387—531.
8. *Королева Л. И.* // ЖЭТФ. 1994. Т. 106. Вып. 1(7). С. 280—296.
9. *Кеслер Я. А., Королева Л. И., Михеев М. Г. и др.* // Изв. АН СССР. Неорг. Мат. 1993. Т. 29. № 1. С. 115—116.

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

Aminov Telman G. — grand PhD (chemistry), professor, leading scientific employee, Institute of General and Inorganic Chemistry RAS; tel.: (495) 9543841, e-mail: aminov@igic.ras.ru

Шабунина Галина Георгиевна — к.х.н., с.н.с., Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН); тел.: (495) 9543841, e-mail: shabunina@igic.ras.ru

Shabunina Galina G. — PhD (chemistry), senior scientific employee, Institute of General and Inorganic Chemistry RAS; tel.: (495) 9543841, e-mail: shabunina@igic.ras.ru

Бушева Елена Владимировна — к.х.н., с.н.с., Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН); тел.: (495) 9543841, e-mail: aminov@igic.ras.ru

Busheva Elena V. — PhD (chemistry), senior scientific employee, Institute of General and Inorganic Chemistry RAS; tel.: (495) 9543841, e-mail: aminov@igic.ras.ru