

Рис. 2. Удельный выход энергии излучения E_{ph} (на электрон) для фотонов с энергией выше 5 МэВ в тормозном излучении электронов с энергией 70 МэВ при различных толщинах t вольфрамовых радиаторов и углах конусов излучения: 1 — угол меньше 90° , 2 — угол меньше 10° , 3 — угол меньше 5°

соответственно при оптимальных толщинах радиаторов. Полный кпд, учитывающий вклад фононов с энергией меньше 5 МэВ, достигает почти 0.5. Как показывают расчеты, столь же высокие параметры свойственны режимам излучения и при других энергиях ускоренных электронов.

В заключение отметим, что, несмотря на высокий кпд, доля «неизрасходованной» энергии электронов

оказывается достаточно большой. Поэтому в настоящее время авторами исследуется более сложный тип тормозного источника с радиатором, помещенным в магнитное поле. Благодаря этому излучающие электроны могут несколько раз пересекать мишень, что позволит существенно поднять фотонный выход.

Литература

1. Shvedunov V.I., Karev A.I., Melekhin V.N. et al. // Proc. of 1995 Particle Accelerator Conf. «PAC'1995» / Ed. L. Gennary. Piscataway, 1996. **2**. P. 807.
2. Skachkov V.S., Ermakov A.N., Shvedunov V.I. // Proc. of 2000 European Particle Accelerator Conf. «EPAC'2000» / Eds. J.L. Laclare, W. Mitaroff, Ch. Petit-Jean-Genaz, J. Poole, M. Regler. Singapore, 2000. P. 2125.
3. Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979.
4. Findlay D.J.S. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1990. **B50**. P. 314.
5. Brun R., Bruyant F., Maire M. et al. GEANT 3.21 (User manual). Geneva, 1990.
6. Berger M.J., Seltzer S.M. // Phys. Rev. **C2**. 1970. P. 621.
7. Berger M.J., Seltzer S.M. // Nucl. Instr. Meth. 1985. **B12**. P. 95.

Поступила в редакцию
08.02.02

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.172

МЁССБАУЭРОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВ $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ФЕРРИМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ВО ФРУСТРИРОВАННУЮ

А. А. Опаленко, Л. Г. Антошина, А. И. Кокорев, А. И. Фиров

(кафедра оптики и спектроскопии; кафедра общей физики
для естественных факультетов)

E-mail: alg@ofefc41.phys.msu.su

В разбавленных ферритах-шпинелях системы $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$, начиная с концентрации $x = 0.5$, наблюдается переход ферримагнитной структуры во фрустрированную. Установлено, что для состава с ферримагнитным упорядочением ($x \leq 0.4$) имеет место линейная зависимость сверхтонкого магнитного поля на ядрах ^{57}Fe от параметра замещения x , тогда как для ферритов с фрустрированной магнитной структурой ($x \geq 0.5$) зависимость $H(x)$ становится нелинейной. Результаты проведенных мёссбауэровских исследований находятся в согласии с известными данными о макроскопических магнитных свойствах.

Разбавленные ферриты-шпинели в зависимости от содержания в них немагнитных ионов в А- и В-узлах могут находиться в ферримагнитном, антиферромагнитном, парамагнитном состоянии или состоянии спинового стекла [1]. Фрустрированная магнитная структура представляет собой структу-

ру с «порванными» магнитными связями. В зависимости от степени разбавления фрустрированная магнитная структура может быть представлена либо как ферримагнитная матрица, в которой присутствуют отдельные парамагнитные центры, либо как отдельные спонтанно намагниченные области как

с дальним, так и с ближним магнитным порядком.

В кристалле CuFe_2O_4 $3d$ -катионы находятся в пустотах кислородных тетраэдров (А-узлы) и октаэдров (В-узлы). Ионы Cu^{2+} помещаются в В-узлах, тогда как ионы Fe^{3+} находятся как в А-, так и в В-узлах. Поскольку ионы Ga^{3+} имеют тенденцию занимать тетраэдрические узлы, а ионы Al^{3+} — октаэдрические, разбавление обеих подрешеток медного феррита должно сопровождаться возникновением фрустрированной магнитной структуры в образцах системы $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы выяснить, как разбавление медного феррита немагнитными ионами Ga^{3+} и Al^{3+} приводит к трансформации его ферримагнитной структуры во фрустрированную. В результате изучения магнитных свойств оксидных ферритов-шпинелей с фрустрированной магнитной структурой [2, 3] обнаружены необычные свойства таких ферритов. Поэтому представляет интерес сопоставление поведения их макроскопических магнитных свойств с величинами эффективных магнитных полей на ядрах ^{57}Fe .

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены мёссбауэровские спектры ферритов системы $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ ($x = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6$), полученные при $T = 300$ К. Спектры можно представить в виде суперпозиции двух секстетов, соответствующих ионам Fe^{3+} в А- и В-узлах. Влияние случайного распределения ионов Ga^{3+} и Al^{3+} вокруг ионов Fe^{3+} проявляется в уширении земановских компонент спектра для составов с $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$.

Сверхтонкая структура спектра для $x = 0.5$ при $T = 300$ К не разрешена. Этот спектр свидетельствует о появлении фрустрированной магнитной структуры феррита. Можно предположить, что у феррита при $x = 0.5$ магнитная структура представляет собой кластеры, образованные как ближним, так и дальним магнитным порядком.

Наконец, для состава с $x = 0.6$ мёссбауэровский спектр состоит из квадрупольного дублета с расщеплением $\Delta E = (0.55 \pm 0.02)$ мм/с и небольшого «размытого» фона у основания дублета, характерного для магнитного упорядочения. По-видимому, у состава с $x = 0.6$ при $T = 300$ К магнитная структура представляет собой в основном кластеры, образованные ближним магнитным порядком. Ранее на основании результатов анализа магнитных свойств феррита с замещением $x = 0.6$ было сделано предположение, что дальний магнитный порядок в этом соединении возникает при температуре $T \approx 340$ К [2, 3]. Очевидно, что неразрешенный «провал» в спектре у основания парамагнитного дублета также свидетельствует о присутствии дальнего магнитного порядка при $T = 300$ К. Спектр этого соединения, полученный при $T = 77$ К, приведен на рис. 2 и

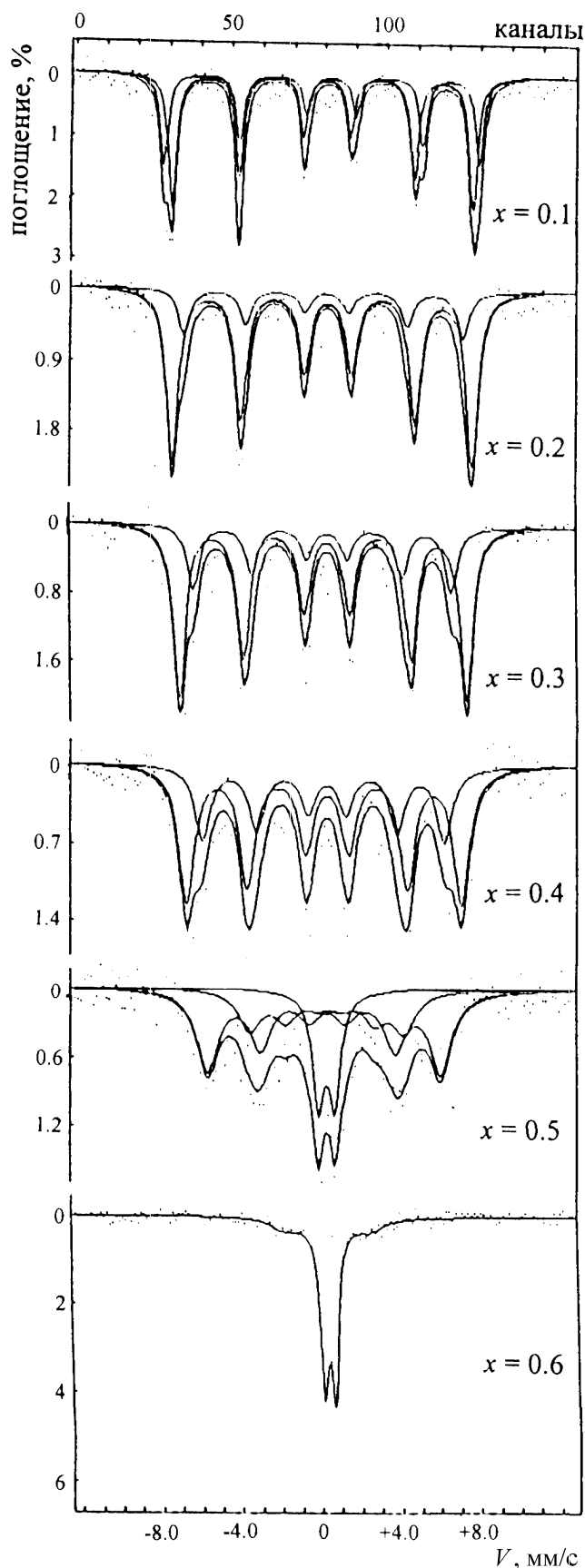


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры ферритов системы $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ при $T = 300$ К

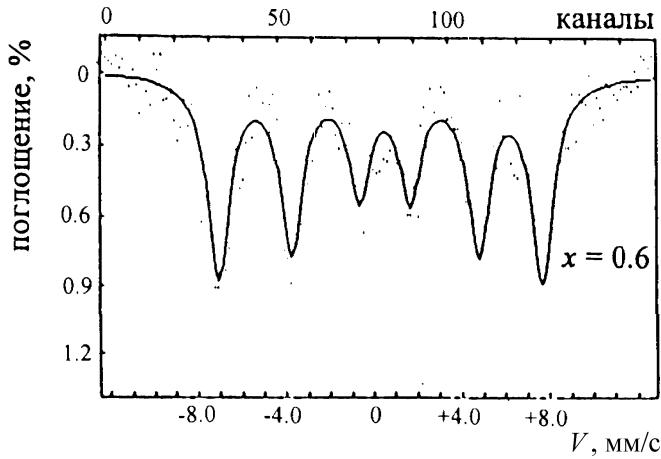


Рис. 2. Мёссбауэровский спектр феррита с $x = 0.6$ при $T = 77$ К

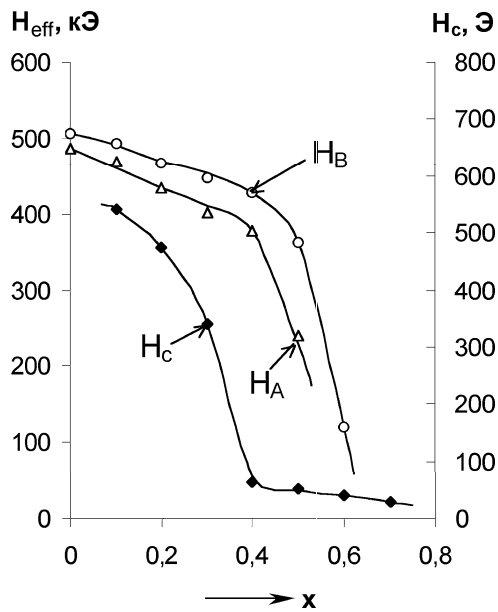


Рис. 3. Зависимость магнитного поля на ядрах ^{57}Fe и коэрцитивной силы ферритов системы $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ от параметра x

является характерным для магнитоупорядоченного состояния феррита. Таким образом, при $T = 77$ К в формировании магнитной структуры доминирующим является дальний магнитный порядок. Полученная нами последовательность мёссбауэровских спектров в зависимости от концентрации примеси является характерной для ферритов-шпинелей. Например, аналогичные мёссбауэровские спектры при $T = 300$ К были получены авторами работы [4] для разбавленных ферритов-хромитов никеля $\text{NiAl}_x\text{Cr}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$.

На рис. 3 представлены величины эффективных магнитных полей H_A и H_B для А- и В-узлов в зависимости от концентрации примеси x , а также данные о коэрцитивной силе H_c , полученные авторами [2]. Для медного феррита CuFe_2O_4 значения H_A и H_B взяты из работы [5]. Видно, что зависимости $H_A(x)$ и $H_B(x)$ практически линейны в диапазоне $x = (0.1 \div 0.4)$, тогда как при $x = 0.5$ и 0.6 величины эффективных полей уменьшаются резко нелинейно. Линейное уменьшение сверхтонких полей с увеличением x свидетельствует об уменьшении степени ферромагнитного упорядочения в ферритах исследуемой системы. Из этого рисунка видно также, что между зависимостями $H_{\text{eff}}(x)$ и $H_c(x)$ имеет место корреляция. Так, для составов с $x = 0.2 \div 0.4$, имеющих ферромагнитное упорядочение, наблюдается резкое уменьшение величины H_c в зависимости от x , тогда как у ферритов с фрустрированной магнитной структурой ($x \geq 0.5$) коэрцитивная сила мала по величине и слабо уменьшается с ростом x . Эта аналогия подтверждает высказанное ранее предположение [6], что фрустрация магнитных связей приводит к уменьшению коэрцитивной силы ферритов.

Результаты проведенных мёссбауэровских исследований убедительно свидетельствуют в пользу сделанного ранее предположения [2] о том, что у составов системы $\text{CuGa}_x\text{Al}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$ при $x \geq 0.5$ магнитная структура является фрустрированной и характеризуется аномальным поведением макроскопических свойств, таких, как намагниченность, коэрцитивная сила, магнитострикция и магнитосопротивление.

Литература

1. Poole C.P., Farach H.A. // Z. Phys. B. 1982. **47**. P. 55.
2. Антошина Л.Г., Кукуджанова Е.Н. // ФТТ. 1998. **40**, № 8. С. 1505.
3. Antoshina L.G., Goryaga A.N., Kukudzhanova E.N. // JMMM. 1998. **188**, No. 1-2. P. 228.
4. Chhaya U.V., Trivedi B.S., Kulkarni R.G. // J. Mater. Sci. Lett. 1999. **18**. P. 1177.
5. Janicki J., Pietrzak J., Porebska A., Suwalski J. // Phys. Stat. Sol. (a). 1982. **72**. P. 95.
6. Antoshina L.G., Goryaga A.N., Kukudzhanova E.N. // J. Phys. IV (France). 1998. **8**, No. 2. P. 339.

Поступила в редакцию
15.04.02