

**О ПРИРОДЕ  
АНОМАЛЬНОГО ОТРИЦАТЕЛЬНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ  
И ПАРАПРОЦЕССА В МАГНЕТИТЕ И  
МАРГАНЦЕВОМ ФЕРРИТЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*К.П.Белов, А.Н.Горяга, В.Н.Пронин, Л.А.Скипетрова*

На основе анализа экспериментальных данных по измерению электрических и магнитных характеристик магнетита и марганцевого феррита делается вывод о том, что при низких температурах в этих магнетиках существует новый механизм парапроцесса и отрицательного магнитосопротивления основанный на делокализации внешним магнитным полем  $t_2g$ -электронов, спаренных в ковалентных связях катион- $B$  – катион- $B$ .

Большое отрицательное магнитосопротивление (МС) и значительный парапроцесс на изо-термах намагниченности  $\sigma$  обнаруженные в магнетите<sup>1-3</sup> и марганцевом феррите<sup>4,5</sup> при низких температурах, относятся к числу наиболее труднообъяснимых аномалий, наблюда-

емых в ферритах-шпинелях. Несмотря на большое число работ, посвященных изучению этих явлений, их природа в настоящее время остается невыясненной.

В данной работе на одних и тех же образцах магнетита и Mn-феррита нами были проведены измерения  $\sigma$ , МС и магнитострикции  $\lambda$ . Образцы были приготовлены по керамической технологии. Первый и второй отжиги образца  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  проводились в среде  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  при температурах 1100° и 1300°С, соответственно. Образец  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  первоначально отжигался при 1000°С в воздухе, а окончательное спекание проводилось при 1350°С в вакууме.

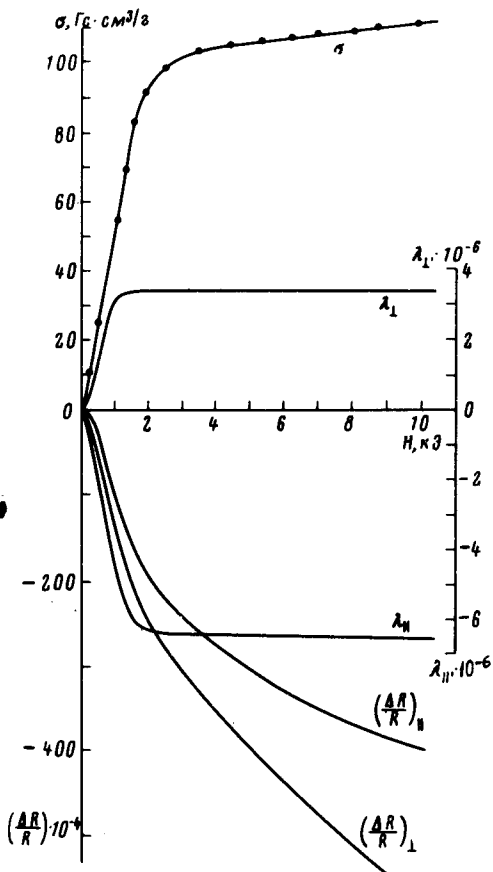


Рис. 1

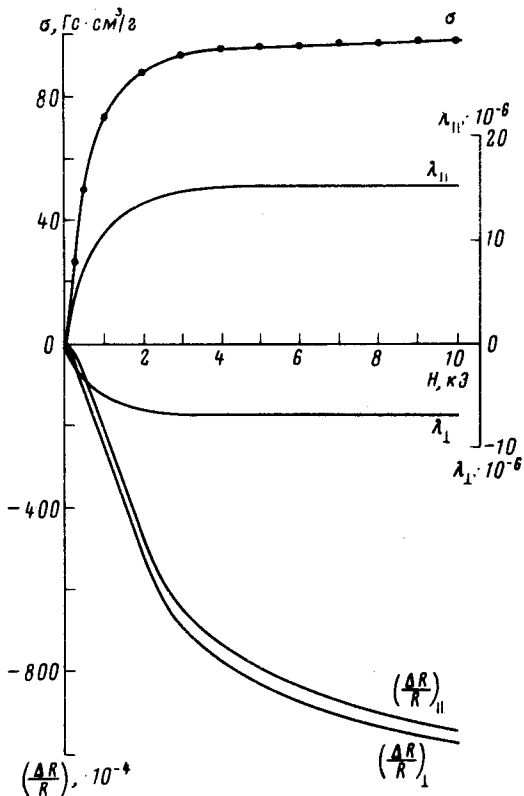


Рис. 2

Рис. 1. Изотермы удельной намагниченности  $\sigma$ , продольного и поперечного магнитосопротивления  $(\Delta R/R)_{\parallel}$ ,  $(\Delta R/R)_{\perp}$  и магнитострикции  $\lambda_{\parallel}$ ,  $\lambda_{\perp}$  образца Mn-феррита, снятые при 80К

Рис. 2. Изотермы удельной намагниченности  $\sigma$ , продольного и поперечного магнитосопротивления  $(\Delta R/R)_{\parallel}$ ,  $(\Delta R/R)_{\perp}$  и магнитострикции  $\lambda_{\parallel}$ ,  $\lambda_{\perp}$  магнетита, снятые при 130К

На рис. 1 приведены изотермы  $\sigma(H)$ , продольного и поперечного магнитосопротивления  $(\Delta R/R)_{\parallel}$ ,  $(\Delta R/R)_{\perp}$  и магнитострикции  $\lambda_{\parallel}$ ,  $\lambda_{\perp}$  образца Mn-феррита, снятые при 80К. Аналогичные результаты для магнетита (рис. 2) даны для температуры 130К, когда образец имеет неискаженную кубическую структуру. Видно, что оба образца обладают аномально большим отрицательным МС, причем  $(\Delta R/R)_{\parallel}$  и  $(\Delta R/R)_{\perp}$  приблизительно равны по величине и в сильных полях носят нелинейный характер. Обращает на себя внимание тот факт, что в то время как на изотермах  $\sigma(H)$  имеет место парапроцесс, величина магнитострикции в сильных полях остается неизменной. Отсутствие магнитострикции парапроцесса свидетельствует о существовании в магнетите и Mn-феррите при данных температурах коллинеарного спино-

вого упорядочения, что согласуется с результатами нейтронографических <sup>6</sup> и мессбауэровских <sup>7</sup> исследований. Следовательно, парапроцесс и отрицательное МС в этих соединениях не связано с наличием неколлинеарного спинового упорядочения.

Как впервые показал Гуденаф <sup>8</sup>, в оксидных соединениях со структурой шпинели возможны фазовые переходы, связанные с образованием в октаэдрической подрешетке (*B*-подрешетке) при определенной температуре  $T_{\Pi}$  устойчивых ковалентных связей катион-*B* – катион-*B*. Появление таких связей вызвано непосредственным перекрытием  $t_{2g}$ -орбиталей  $3d$ -катионов, находящихся в соседних *B*-узлах. В результате этого происходит локализация  $t_{2g}$ -электронов в этих связях, что в свою очередь сопровождается резким ростом электропроводности ферритов. Если перекрывающиеся  $t_{2g}$ -орбитали имеют по одному электрону (как, например, у катионов  $Fe^{2+}$  и  $Mn^{2+}$  с электронной конфигурацией  $e_g^{2+} t_{2g}^{3+}$ ), то происходит спаривание спинов этих электронов и, следовательно, уменьшение магнитных моментов взаимодействующих катионов. Ранее мы установили <sup>9</sup>, что в магнетите образование ковалентных связей  $Fe_B^{2+} - Fe_B^{2+}$  и  $Fe_B^{3+} - Fe_B^{3+}$  происходит при температурах  $\approx 170$  и  $\approx 140$  К, соответственно. В *Mn*-феррите ковалентные связи  $Mn_B^{2+} - Mn_B^{2+}$  и  $Fe_B^{3+} - Fe_B^{3+}$  образуются соответственно, при  $\approx 240$  и  $\approx 145$  К.

Известно, что магнитное поле вызывает сжатие волновых функций электронов <sup>1)</sup>. Поэтому следует ожидать, что в ферритах-шпинелях при  $T < T_{\Pi}$  наложение внешнего магнитного поля будет приводить к уменьшению степени перекрытия  $t_{2g}$ -орбиталей в парах катион-катион. Это в свою очередь приведет к частичной делокализации электронов и, следовательно, к уменьшению электропроводности, т. е. к отрицательному МС. Такое утверждение находится в согласии с выводами теории отрицательного МС полупроводников в которой показано <sup>11, 12</sup>, что если основной причиной отрицательного МС является делокализация электронов магнитным полем, то в этом случае продольное и поперечное МС должны быть близки по величине. Кроме того из этой теории следует, что изотермы МС в сильных полях должны носить нелинейный характер, что и наблюдается в магнетите и *Mn*-феррите при  $T < T_{\Pi}$ .

Очевидно, что делокализация электронов в ковалентных связях катион-катион будет также приводить и к нарушению спаривания их спинов. В результате этого у ферритов-шпинелей, в которых ответственной за магнитный момент является октаэдрическая подрешетка (как в случае магнетита и *Mn*-феррита), при  $T < T_{\Pi}$  в сильном поле должен наблюдаться рост истинной намагнитченности, т. е. парапроцесс.

Таким образом в данной работе для ферритов-шпинелей при  $T < T_{\Pi}$  предложен новый механизм парапроцесса и отрицательного МС основанный на делокализации внешним магнитным полем  $t_{2g}$ -электронов, спаренных в ковалентных связях катион-*B* – катион-*B*.

#### Литература

1. Никитин С.А., Белов К.П. Кристаллография, 1960, 5, 726.
2. Белов К.П., Горяга А.Н., Пронин В.Н., Скипетрова Л.А. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 118.
3. Domenicali C.A. Phys. Rev., 1950, 78, 458.
4. Jacobs I.S. J. Phys. Chem. Solids, 1960, 15, 54.
5. Крупичка С. Физика ферритов, 1976, т.2, М.: Мир.
6. Shull C.G. Phys. Rev., 1951, 84, 626.
7. Sawatzky G.A., Van Der Woud F., Morrish A.H. Phys. Rev., 1969, 187, 747.
8. Гуденаф Дж. Магнетизм и хим. связь, 1968, М.: Металлургия.
9. Белов К.П., Горяга А.Н., Скипетрова Л.А. Вестник МГУ, 1980, 21, 77.
10. Шкловский Б.И. ФТП, 1972, 6, 1197.

1) Теоретически этот вопрос рассмотрен в работе <sup>10</sup>.

11. *Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г. Ларкин А.И., Хмельницкий Д.Е. ЖЭТФ, 1981, 81, 768.*

12. *Kawabata A. Solid St. Comm., 1980, 34, 431.*

МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА

Поступила в редакцию  
15 марта 1983 г.

---