

УДК 537.6

ОБ ОЦЕНКЕ ВЕЛИЧИНЫ S-D ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФЕРРИТАХ

Бержанский В.Н., Евстафьев И.И., Норден Д.В.

Взаимодействие между носителями заряда и магнитной подсистемой кристаллов является одной из важнейших особенностей магнитных полупроводников. Параметром, характеризующим данное взаимодействие в приближении широких зон, является так называемый интеграл s-d обмена I_{sd} [1]. Оценка этого параметра может быть получена при анализе некоторых экспериментальных зависимостей [2, 3]. В данной работе предложено два оригинальных метода оценки интеграла s-d обмена, использованных при исследовании оксидных и халькогенидных шпинелей. Первый метод основан на анализе аномалии проводимости вблизи температуры Кюри T_c , второй – на анализе полевых зависимостей магнитопроводимости.

Рассмотрим использование указанных методик на примере кристаллов Mn - Zn ферритов. На рис.1 представлена температурная зависимость проводимости $\sigma(T)$ в кристалле n-типа $Mn_{0,66}Zn_{0,27}Fe_{2,07}O_4$. Как и для большинства магнитных полупроводников n-типа зависимость $\sigma(T)$ вблизи T_c имеет аномальный характер, выражающийся в ее отклонении от экспоненциальной зависимости и появлении максимума [2, 4, 5].

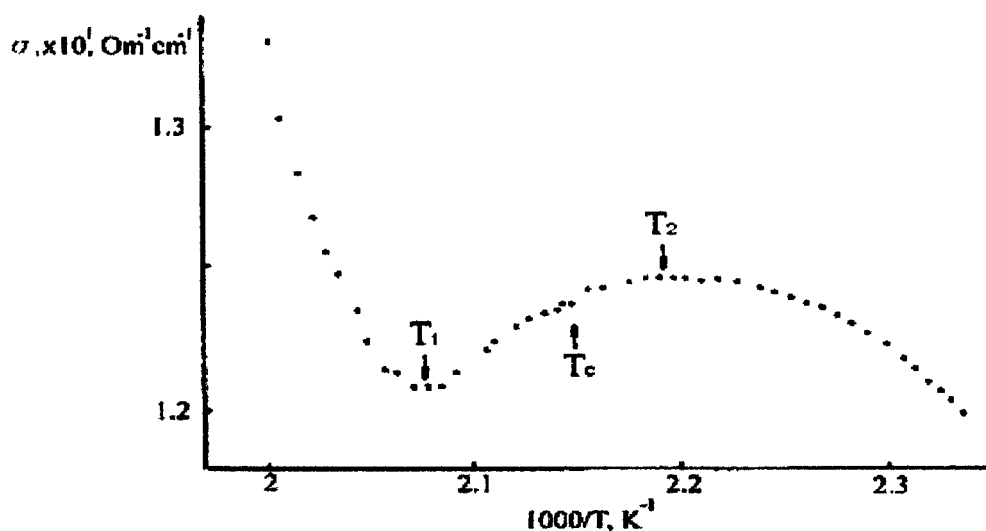


Рис. 1 Зависимость проводимости от температуры для монокристалла $Mn_{0,66}Zn_{0,27}Fe_{2,07}O_4$ в области температуры Кюри.

Согласно работам [6, 7] основную роль в проводимости феррита в этом диапазоне температур играет изменение концентрации носителей. В рамках экспоненциальной зависимости проводимости от температуры механизм этого явления можно представить следующим образом. Концентрация носителей зависит от величины энергии активации отнесенной к тепловой энергии $\Delta E_d/kT$. В дальней парамагнитной области, где энергия активации не зависит от температуры, это отношение возрастает с падением температуры. При приближении к T_c и появлении ближнего магнитного порядка в энергию активации входит магнитный член $\Delta E_m = \frac{1}{2} I_{sd} S m(T)$, величина которого зависит от намагниченности $m(T)$. Под намагниченностью понимается сумма двух слагаемых - локальной и объемной намагниченностей. При $T > T_c$ это, в основном, локальная намагниченность в областях вблизи примесных состояний. Из-за s-d обмена и модификации d-d обмена примесь - матрица, температура возникновения магнитного порядка в пределах примесного центра выше температуры Кюри всего кристалла. Поэтому скорость изменения локальной намагниченности вблизи T_c невелика. При приближении к T_c определяющим становится в основном вклад от намагниченности матрицы, упорядоченные области которой зарождаются на флуктуациях вблизи примесных состояний. Скорость изменения этой части намагниченности существенно выше. Все это приводит к быстрому росту магнитного вклада в энергию активации и отношение $(\Delta E_d - \Delta E_m)/kT$ может уменьшаться при снижении температуры, что вызывает аномальный рост проводимости. Так как dm/dT максимальна в окрестности T_c , то, и $|d\sigma/dT|$ максимальна в этой же области. При дальнейшем снижении температуры величина dm/dT падает, что при некоторой температуре снова приводит к падению проводимости. При наличии в температурной зависимости проводимости отрицательного участка должны существовать две особые точки, где $d\sigma_{1,2}/dT = 0$. Точка T_1 лежит выше T_c и связана с изменением магнитного вклада в результате роста флуктуационных областей намагниченности. Точка T_2 связана с замедлением скорости изменения намагниченности при $T < T_c$. Характер аномалии проводимости в районе T_c зависит от величины интеграла s-d взаимодействия. Записав для $\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(\frac{E_d - \Delta E_m}{kT}\right)$, получим $d\sigma_{1,2}/dT = 0 = \sigma(T) \left(\frac{E_d - \Delta E_m}{kT^2} + \frac{1}{kT} \frac{d\Delta E_m}{dT} \right)$. Т.к. $\sigma(T) \neq 0$ и $\Delta E_m = \frac{1}{2} I_{sd} S m(T)$, получим $E_d - \frac{1}{2} I_{sd} S (m(T) - \frac{dm(T)}{dT} T) = 0$. Из эксперимента известна зависимость намагниченности матрицы $m(T)$ ниже T_c и E_d . Мы можем оценить I_{sd} в точке T_2 . Для $Mn_{0,66}Zn_{0,27}Fe_{2,07}O_4$ $I_{sd} \approx 0,1$ эВ. Это хорошо согласуется с оценкой, полученной другими методами для данного соединения ($I_{sd} \approx 0.11$ эВ) [8].

Рассмотрим особенности магнитной проводимости, обусловленные s-d обменным взаимодействием. На рис.2 представлены полевые зависимости продольной и поперечной магнитопроводимости для образца $Mn_{0,66}Zn_{0,27}Fe_{2,07}O_4$. При высоких температурах

зависимости магнитной проводимости поля близки к линейным. С понижением температуры при низких полях наблюдается отклонение от линейной зависимости $\Delta\sigma(H)$. Особенностью является совпадение полевых зависимостей для продольной и поперечной ориентации магнитного поля и тока.

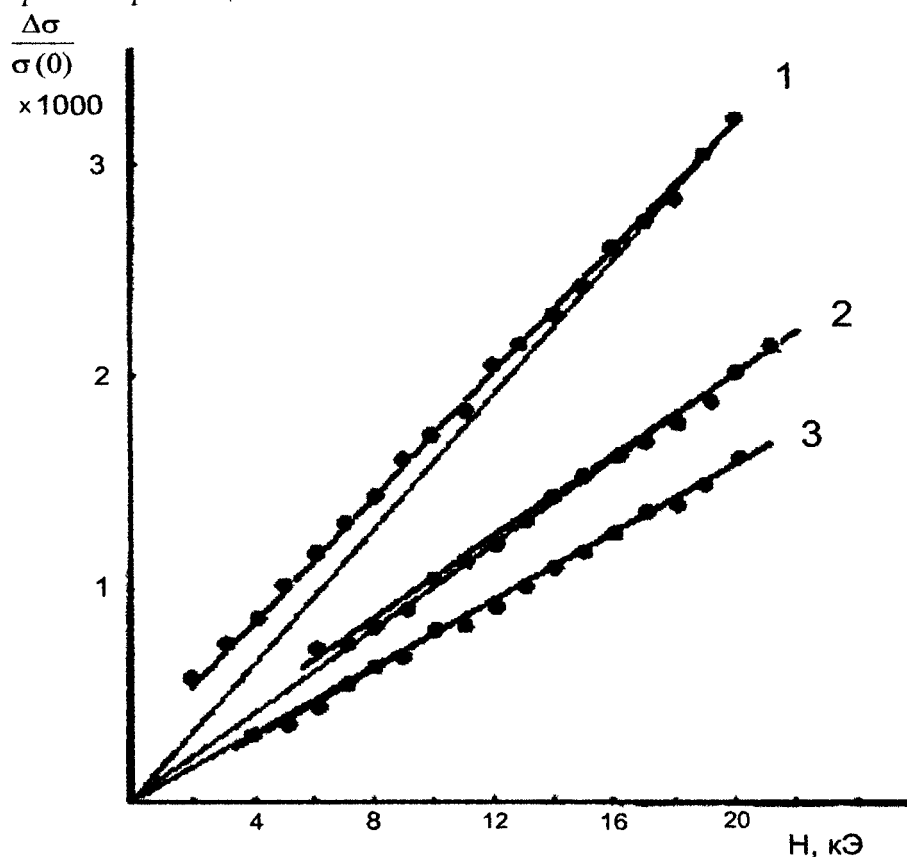


Рис. 2. Полевые зависимости магнитопроводимости монокристалла $Mn_{0,66}Zn_{0,27}Fe_{2,07}O_4$ при различных температурах. 1, 2, 3 – 209 К, 300 К, 388 К.

Анализ этих результатов позволяет предположить, что подход, основанный на изменении концентрации носителей под действием магнитного поля, адекватно описывает полевые зависимости проводимости в ферромагнитных полупроводниках.

В рамках этого подхода выражение для магнитопроводимости можно записать в виде

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma(0)} = \exp\left\{\frac{1}{2} I_{sd} \frac{X_p H}{M(0)} S \frac{1}{kT}\right\} - 1$$

где X_p – восприимчивость парапроцесса, $M(0)$ – намагниченность при $T=0$, $\sigma(0)$ – проводимость при $H=0$.

Оценим величину показателя экспоненты. При реальных значениях величин: $I_{sd} = 0,1 \text{ эВ}$, $X_p = 10^{-5}$, $M(0) = 100 \text{ Гс/г см}^3$, $H = 20 \text{ кЭ}$, $S = 5/2$, $T = 300 \text{ К}$. Величина

показателя порядка 0.01. Это позволяет разложить в ряд экспоненту в формуле и получить в первом приближении следующее выражение для магнитопроводимости:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma(0)} = \left[\frac{1}{2} I_{sd} \frac{X_p H}{M(0)} S + P(H^2) \right] \frac{1}{kT},$$

где $P(H^2)$ - малая добавка, которую следует учитывать при значительном парапроцессе. Используя экспериментальные данные для магнитопроводимости в Mn - Zn ферритах, мы можем оценить величину s-d обменного интеграла

Для величины s-d обменного интеграла получим выражение

$$I_{sd} = \frac{kT}{X_p H} \ln \frac{\sigma(H)}{\sigma(0)}$$

Используя данные $\sigma(H)$, $\sigma(0)$ представленные на рис.2, можно оценить величину интеграла s-d взаимодействия, которая равна $I_{sd} \approx 0.19$ В. Это значение согласуется с оценкой полученной из приведенного выше анализа температурной зависимости проводимости.

Результаты работы подтверждают применимость широкозонного подхода при рассмотрении кинетических эффектов в исследованных соединениях. Полученные значения s-d обменного параметра позволяют оценить степень взаимодействия электрической и магнитной подсистем в рассматриваемых соединениях и выделить вклады от других эффектов в процессы переноса (например, спин-орбитальный).

Список литературы

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука. (1971).
2. Бержанский В.Н., Чернов В.К. Процессы переноса носителей в магнитных полупроводниках на основе CdCr₂Se₄. В кн.: Магнитные полупроводники и их свойства. Красноярск: Институт физики СО АН СССР. 44-73 (1980).
3. Гавричikov Б.А., Вружиков М.Ш., Овчинников С.Г., Эдельман И.С. Многоэлектронная энергетическая структура и физические свойства ферромагнитного полупроводника CdCr₂Se₄. ЖЭТФ. Т.90. 1275-1287 (1986).
4. Зятьков И.М. Мирошкин В.П., Панова Я.И. Проводимость монокристаллических марганец-цинковых ферритов. Изв. АН СССР. Неорган. Материалы. Т.21. №12. 2096-2098 (1985).
5. Башкиров Ш.Ш., Либерман А.Б., Парфенов В.В., Синяевский В.И. Исследование явлений переноса в марганец-цинковых феррошпинелях. Неорган, материалы. Т.15. №3. 516-520 (1979).
6. Зятьков И.И. Мирошкин В.П. Попова Е.А. Исследование термоэдс и проводимости марганец-цинковых ферритов. Труды Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова. 104-108 (1985).
7. Satyanarayana R., Ramana Murthy S. Electrical conductivity and thermoelectric power of NiZn ferrites. Cryst. Res. Technol. V.20. №8. 1109-1116 (1985).
8. V.N.Berzhansky, I.I.Evstafev, V.I.Ivanov. Charge Carrier Transfer in Ferrite Spinels Affected by Magnetic Ordering Phys. Stat. Sol.(b) 158, 643-652 (1990).

Поступила в редакцию 13.11.2002 г.