

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛА $s$ - $d$ -ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*Евстафьев И.И., канд. физ.-мат. наук, доцент,*

*Лагунов И.И., ассистент*

Принципиальной особенностью магнитных полупроводников (МПП), является взаимодействие коллективизированных электронов с локализованными  $d$ - или  $f$ - электронами [1]. Указанное взаимодействие представляет фундаментальный интерес, поскольку приводит к аномалиям ряда физических свойств. С другой стороны делаются попытки его использования в прикладных целях, например, для компенсации потерь в линиях задержки. Рассчитать величину  $s-d$ - взаимодействия из первых принципов не удастся, поэтому важно найти способы оценки его основного параметра - интеграла  $s-d$ - взаимодействия  $I_{sd}$ .

Данная работа посвящена описанию методов оценки величины  $I_{sd}$  по результатам экспериментальных исследований проводимости  $\sigma(T)$ , магнитопроводимости  $\sigma(H)$  и термоЭДС  $Q$  в широком интервале температур и магнитных полей.

Исследования проводились на кристаллах оксидных и халькогенидных МПП  $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ,  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  и  $Cd_{1-x}Me_xCr_2Se_4$ , где  $Me - In^{3+}, Ag^+$ , на автоматизированной гальваномагнитной установке в диапазоне температур  $77-600 K$  и магнитных полей до  $10 kЭ$ .

1. В приближении широких зон, когда  $I_{sd} < W$   $\sigma(T)$  при  $T < T_C$  определяется в основном изменением концентрации носителей заряда, которая меняется по экспоненте с энергией активации  $\Delta E = \Delta E_{a,d}^o - \Delta E_m$ , где  $\Delta E_{a,d}^o$  - энергия активации акцепторов (доноров) в парамагнитной области температур.  $\Delta E_m$  - магнитный вклад в энергию активации при  $T \leq T_C$ . Если примесные центры лежат глубоко в запрещенной зоне, то  $\Delta E_m$  определяется в основном значениями  $I_{sd}$ , обуславливающими расщепление зон проводимости  $I_{sd}^n$  или валентной зоны  $I_{sd}^v$ , при этом  $\Delta E_m = 1/2 \cdot S I_{s,d}^{v,n} m(T)$ . Здесь  $S$  - спин  $d$ - иона, а  $m(T)$  - приведенная намагниченность. В случае мелких примесей, а также при движении по примесной зоне следует учитывать также  $s-d$ - расщепление примесных энергетических зон. Считая, что влияние магнитного порядка слабо влияет на подвижность носителей,  $\Delta E_m$  можно определить по экспериментальным данным  $\sigma(T)$  следующим образом:

$$\Delta E_m(T) = kT \ln \left[ \sigma_{ferro}(T) / \sigma_{para}(T) \right]$$

Для ферромагнитных МПП типа  $CdCr_2Se_4$  в широком диапазоне температур  $m(T)$  меняется

по закону Блоха  $m(T) = 1 - CT^{3/2}$ . Поэтому величина  $I_{sd}$  может быть определена построением зависимости  $\Delta E_m(T) = f(T^{3/2})$  либо, если известно значение  $m(T)$ , по зависимости  $2/S \cdot \Delta E_m / m(T)$ . На рис. 1 представлена определенная таким образом  $\Delta E_m(T)$  в  $p-CdCr_2Se_4$ . Оценка показывает, что в  $CdCr_2Se_4$   $I_{sd} \approx 0,34 eV$ . Используя данные о локальных намагниченностях подрешеток в разбавленных ферритах-шпинелях

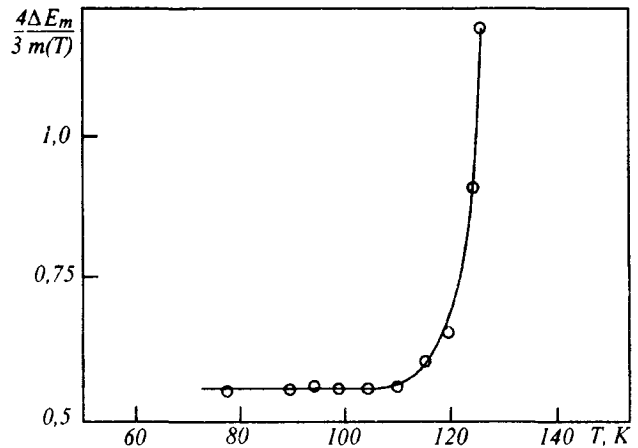


Рис. 1. Зависимость магнитного вклада в энергию активации от температуры в  $p-CdCr_2Se_4$

[2] по данным  $\sigma(T)$  были оценены интегралы  $s-d$  взаимодействия для ферритов  $NiFe_2O_4:Zn$  и  $MnFe_2O_4:Zn$ . Значения  $I_{sd}$  в зависимости от подрешетки колеблются для  $Ni-Zn$  феррита  $0,19-0,12 eV$ , для  $Mn-Zn$  феррита  $0,16-0,10 eV$ .

2. В кристаллах  $n$ - типа в зависимости  $\sigma(T)$  наблюдается аномалия (рис. 2). Видно, что существуют температуры  $T_1$  и  $T_2$ , при которых  $\partial\sigma / \partial T = 0$ . а  $T_2 < T_C < T_1$ .

Можно показать, что в точке  $T_2$

$$E_d^n = \frac{1}{2} I_{sd} S \left[ m(T) - \frac{dm(T)}{dT} T_2 \right] \quad \text{и}$$

по данным  $m(T)$  и  $\sigma(T)$  определить  $I_{sd}$ . Значение  $I_{sd}$  для  $MnFe_2O_4:Zn$

определенные первым и вторым методом оказались практически равными  $I_{sd} \approx 0,11$  и  $I_{sd} = 0,10 eV$ .

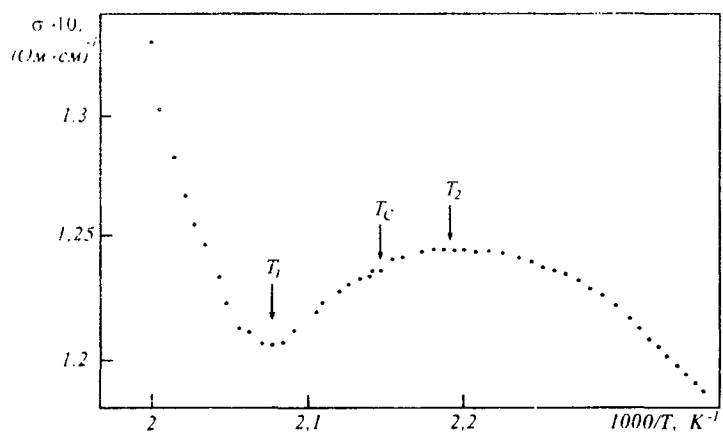


Рис. 2. Зависимость проводимости от температуры в  $MnFe_2O_4:Zn$

3. Обнаружено, что в кристаллах  $n$ - типа проводимость меняется линейно от магнитного поля. Мы полагаем, что это связано с полевой зависимостью  $\Delta E_m(H)$ . Можно показать, что величина  $\sigma(H)$  в пренебрежении спин-орбитальными эффектами может быть записана в виде

$$\frac{\sigma(H)}{\sigma(0)} = \exp \left[ \frac{1}{2} I_{sd} \frac{\chi_0 H}{M(0)} S \right] \frac{1}{kT},$$

где  $\chi_0$  - восприимчивость связанная с подавлением термодинамических флуктуаций. Значения интеграла  $I_{sd}$ , определенные по данным  $\sigma(H)$  для  $MnFe_2O_4:Zn$  хорошо согласуются с результатами полученными первым и вторым способами.

4.  $s-d$  обменное взаимодействие модифицирует не только  $\sigma(T)$  и  $\sigma(H)$ , но и температурные зависимости термоэлектрических эффектов. В [3] получено теоретическое выражение для термоЭДС

$$Q = -\frac{k}{e} \left[ \frac{T}{\rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{I_{sd}}{2k} \frac{dm}{dT} \right],$$

где  $\rho = 1/\sigma$ ,  $m = m_{sd} + m_{dd}$ ,  $m_{sd}$  и  $m_{dd}$  намагниченности матрицы и примесных центров. Так как  $I_{sd} \gg I_{dd}$ , то при  $T < T_c$   $m_{sd}$  слабо меняется с  $T$ . Это позволило произвести оценку  $I_{sd}$  для  $n-CdCr_2Se_4$  используя данные  $Q(T)$ ,  $m(T)$  и  $\sigma(T)$ . Наилучшее совпадение экспериментальной зависимости  $Q(T)$  с теоретической получены при  $I_{sd} \approx 0,33 eV$ , что коррелирует со значением  $I_{sd}$  полученным из анализа  $\sigma(T)$ .

Результаты работы подтверждают применимость широкозонного подхода при рассмотрении кинетических эффектов в МПП. Полученные значения  $I_{sd}$  позволяют оценить степень взаимодействия электрической и магнитной подсистем в рассматриваемых соединениях и выделить вклады других эффектов (например, спин-орбитального) в процессы переноса носителей.

#### Литература.

1. Nagaev E.L. Physics of Magnetic Semiconductors. -М.: Mir, 1983.
2. Berzhansky V.N., Evstafjev I.I. // Phys.Stat.Sol.(b) V.158, 1990, P.643.
3. Зайцев А.Н. //ФТТ, т.26, в.5, С. 1474-1478.