

Письма в ЖЭТФ, том 20, вып. 6, стр. 416 – 419 20 сентября 1974 г.

"ЭФФЕКТ "ЭЛЕКТРОННОГО УЗКОГО ГОРЛА" В СИСТЕМЕ Cu – Er

Т.С.Альтшулер, М.М.Зарипов, Е.Ф.Куковицкий,
Е.П.Хаймович, Э.Г.Хараташьян

В монокристаллах меди, легированных парамагнитной примесью эрбия, обнаружен эффект "электронного узкого горла" двух связанных обменным взаимодействием спиновых подсистем (электронов проводимости и локализованных магнитных моментов) с существенно отличающимися g -факторами.

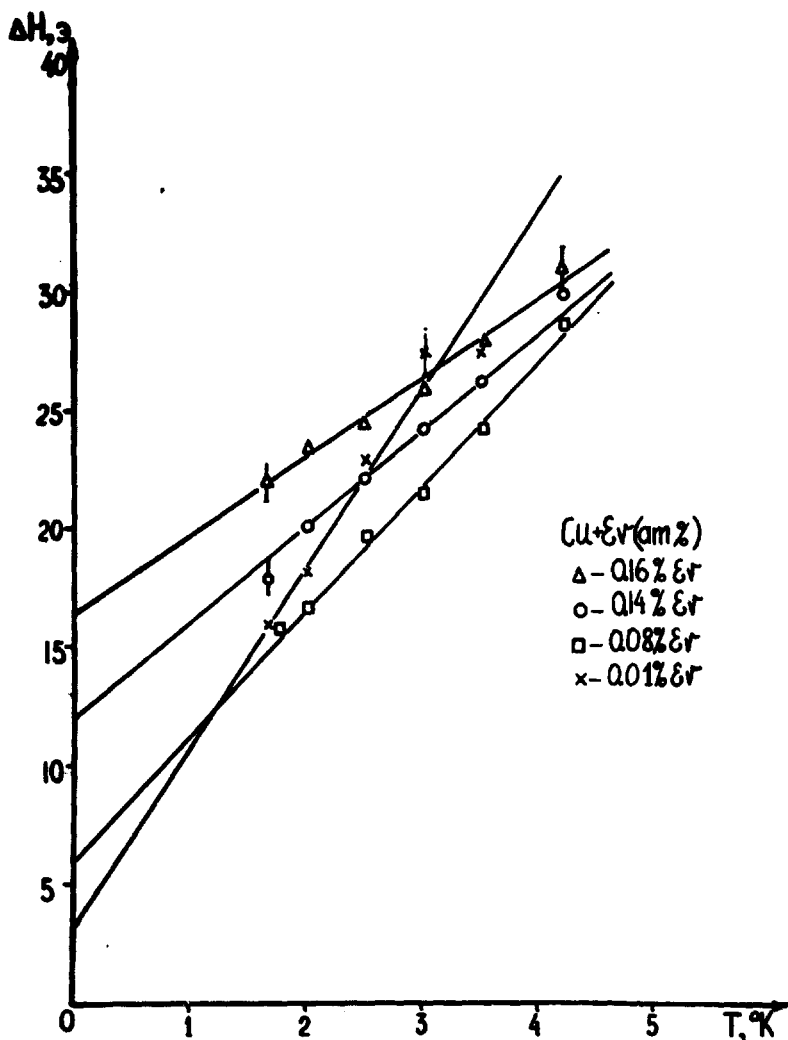
Хорошо известно, что в металлах наличие сильного обменного взаимодействия между электронами проводимости (ЭП) и локализованными магнитными состояниями (ЛМС) с близкими значениями g -факторов при увеличении концентрации парамагнитной примеси приводит к явлению "электронного узкого горла" (ЭУГ) [1, 2]. Это явление заключается, в частности, в исчезновении связанного с обменом релаксационного вклада в ширину линии ΔH электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на ЛМС, что в эксперименте проявляется в характерной зависимости ΔH от концентрации C .

В случае спиновых подсистем с сильной отличающимся g ситуация существенным образом меняется. Было показано (смотри, например, [3]), что явление ЭУГ возможно и в этом случае, если выполняется условие:

$$\omega_s - \omega_e \ll \frac{1}{T_{es}} + \frac{1}{T_{se}}, \quad (1)$$

где T_{es} и T_{se} – времена релаксации спин-системы ЭП в спин-систему ЛМС и обратно (времена релаксации типа Оверхаузера и Корринги), а ω_s и ω_e – резонансные частоты ЛМС и ЭП, $\omega = \frac{g\beta}{\hbar} H$, β – магнетон Бора, H – постоянное магнитное поле. В настоящей работе сообщаются предварительные данные о первом наблюдении ЭУГ в подобных сис-

темах на примере Cu – Er (g -фактор для ЭП чистой меди $g_e \approx 2,03$ [4]; для свободного иона эрбия $g_s \approx 6,77$ [5]) и приведена интерпретация полученных результатов, основанная на простом термодинамическом подходе. Оказалось, что условие (1) в действительности не является необходимым.



Зависимость ширины линии ЭПР от температуры для исследованных образцов

Измерения методом ЭПР на частоте 9300 МГц в диапазоне температур $1,6 + 4,2^\circ\text{К}$ были проведены на монокристаллах чистой меди, легированных примесями эрбия с концентрациями 0,16; 0,14; 0,08; 0,01 ат.%. Наблюдаемый спектр ЭПР на локализованных магнитных моментах эрбия состоял из центральной линии с $g = 6,84 \pm 0,02$ (в пределах ошибок эксперимента g -фактор не зависел от C) и шести линий сверхтонкой

структуры от нечетного изотопа E_{Γ}^{167} с постоянной $A = 74,8 \pm 1,5$ э. На рисунке представлена температурная зависимость ширины центральной линии для исследованных образцов. Отчетливо наблюдается изменение температурного наклона кривых с концентрацией, причем $\partial\Delta H / \partial T$ обратно пропорционально c . Подобное поведение $\Delta H(T, c)$ характерно для ЭУГ. Вместе с тем, оценка скоростей релаксации Корринги (из данных измерений на образце $c = 0,01$ ат.%, для которого ЭУГ еще нет) и Оверхаузера (для образца $c = 0,1\%$ ат.%) дала соответственно $4 \cdot 10^8 \text{сек}^{-1}$ и $8 \cdot 10^9 \text{сек}^{-1}$. Это показывает, что соотношение (1) в нашем случае не выполняется и, таким образом, скорость обмена между спиновыми подсистемами явно меньше разности их собственных частот. Однако при относительно длинных временах спин-решеточной релаксации ЭП T_{eL} возникает необходимость учета конечности теплоемкости спин-системы ЭП, что и при нарушении (1) приводит к ЭУГ. Введем параметр "гор-

ла" $\sigma = \frac{C_s T_e s}{C_e T_s e}$ где C_s и C_e теплоемкости спиновых подсистем ЛМС и ЭП. При $\sigma > 1$ (для нашего случая оценка дает $\sigma \approx 3$) в полной аналогии с известным явлением "фононного узкого горла" в диэлектриках [6] для эффективной скорости спиновой релаксации ЛМС в решетку получим:

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{3\eta(E_F)kT}{2S(S+1)C} \frac{1}{T_{eL}}, \quad (2)$$

где $\eta(E_F)$ — плотность состояний на поверхности Ферми, S — эффективный спин. При выводе этого соотношения было учтено, что через спин-систему ЭП в решетку передается лишь часть энергии ЛМС, равная $g_e \beta H$. Интересно, что (2) совпало с известным выражением Хасегавы [1]. Если принять, что (2) описывает изменение температурно-зависящего вклада в ΔH с ростом C (температурно-независящий вклад связан, главным образом, с диполь-дипольным взаимодействием), то можно провести дополнительную экспериментальную проверку присутствия эффекта ЭУГ [2]. Для этого в образец с концентрацией $E_{\Gamma} c = 0,14$ ат.% вводилась примесь Ni с концентрациями $\sim 0,1$ и $0,5$ ат.%. Введение дополнительного рассеивателя укорачивало T_{eL} и в соответствии с (2) приводило к увеличению $\partial\Delta H / \partial T$. С помощью (2) было получено: $T_{eL} \approx 10^{10} \text{сек}^{-1}$, для примеси Ni в Cu $\partial(1/T_{eL}) / \partial c \approx 5 \cdot 10^9 (\text{сек} \cdot \text{ат.}\%)^{-1}$.

В заключение заметим, что своеобразие эффекта ЭУГ в нашем случае заключается в том, что вместе с характерной зависимостью $\Delta H(T, c)$ наблюдается и "электронный сдвиг Найта" для g -фактора и сверхтонкая структура.

Авторы выражают глубокую благодарность С.А.Альтшулеру и Б.И.Кочелаеву за плодотворные обсуждения.

Казанский
физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 августа 1974 г.

Литература

- [1] H.Hasegawa. *Progr. Theor. Phys.*, **21**, 483, 1959.
 - [2] A.C.Gossard, A.J.Heeger, J.H.Wernick. *J. Appl. Phys.*, **38**, 1251, 1967.
 - [3] J.Dupraz, B.Giovannini, R.Orbach, J.D.Riley, J.Zitkova. *Magnetic Resonance*, Plenum Press, NewYork, 1970, p. 197.
 - [4] S.Schultz, C.Latham. *Phys. Rev. Lett.*, **15**, 148, 1965.
 - [5] С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. *Электронный парамагнитный резонанс*, М., изд. Наука, 1972.
 - [6] B.W.Faughnan, M.W.Strandberg. *Phys. Chem. Sol.*, **19**, 155, 1961.
-