

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЗОНАНС
НА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МАГНИТНЫХ МОМЕНТАХ Eg
В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ La

Н. Е. Алексеевский, И. А. Гарифуллин, Б. И. Кочелаев,
Э. Г. Харахамьян

Обнаружено электронное резонансное поглощение на локализованных моментах Eg в сверхпроводящем La. Изучены температурные и концентрационные зависимости g -фактора и ширины линии. Приведена возможная качественная интерпретация полученных результатов.

Принципиальная возможность изучения электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в сверхпроводниках второго рода была экспериментально показана в работе [1], где впервые наблюдался сигнал спинового резонанса на ионах Gd^{3+} в интерметаллическом соединении $La_{3-x}Gd_xIn$, находящемся в сверхпроводящем (СП) состоянии ниже H_{c2} . Более детальные исследования ЭПР на примесях Gd в СП соединении $La_{1-x}Gd_xRu_2$ были в дальнейшем проведены в работе [2].

В настоящем сообщении приводятся предварительные результаты изучения ЭПР на локализованных магнитных моментах Eg и La. Выбор Eg в качестве парамагнитной примеси позволяет провести исследования в значительно большем интервале концентраций при меньших величинах резонансного поля. Измерения были проведены на частоте ~ 9400 MHz в интервале температур $2 - 4,5^{\circ}K$ на массивных образцах поликристаллического La с концентрациями Eg от 0,5 до 3 ат. %.

На рис. 1 показана типичная запись сигнала ЭПР, который наложен на кривую поверхностного импеданса СП образца. Форма резонансной линии близка к лоренцевой, а параметр асимметрии $A/B = 2,5$. Измеренное значение g -фактора составило: $g_{\text{эксп}} = 6,83 \pm 0,05$. Известно, что металлический La кристаллизуется в виде смеси двух модификаций с гексагональной (α - La) и кубической (β - La) решетками. Измерение зависимости H_{c2} от температуры на наших образцах показало присутствие значительной доли β - La. В поликристаллическом α - La сигнал ЭПР от Eg^{3+} не наблюдалось вследствие большой анизотропии g -фактора. В кубичес-

ком поле нижним энергетическим уровнем оказывается крамерсов дублет Γ_7 , с $g = 6,77$ при учете промежуточной связи. Близость наблюдаемой величины g -фактора к теоретической является однозначным подтверждением, что резонансный сигнал обусловлен кубической фазой. Отметим, что при переходе образца в СП состояние g -фактор не испытывает заметных изменений в пределах точности измерений (см. рис. 2).

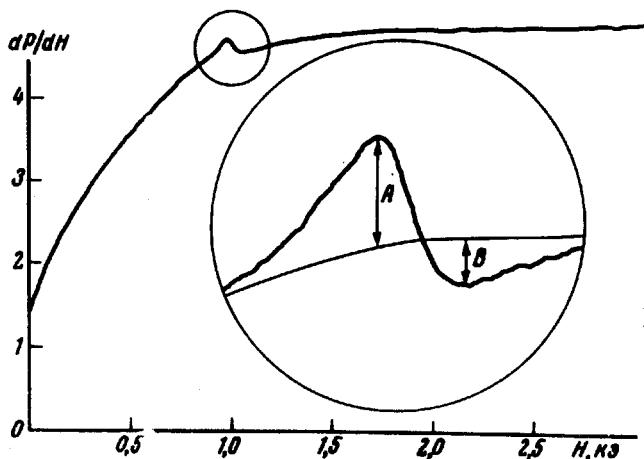


Рис. 1. Запись сигнала ЭПР (dP/dH в относительных единицах) для образца La + 1,5 ат.% Er при $T = 2,5^{\circ}\text{K}$ и $\nu = 9369,4 \text{ MHz}$

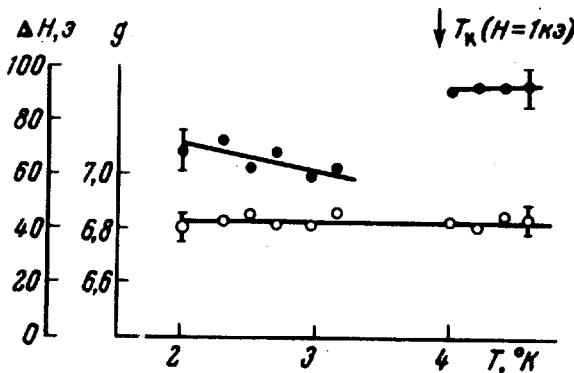


Рис. 2. Температурная зависимость ΔH и g -фактора для образца La + 2 ат.% Er : ● – ΔH ; ○ – g -фактор

На рис. 2 и рис. 3 представлены типичные температурная и концентрационная зависимости ширины линии ΔH (полуширина на полувысоте). Из приведенных результатов следует, что: 1) ΔH в нормальной области слабо зависит от температуры, 2) при переходе в СП состояние ширина линии резко уменьшается, 3) в СП состоянии ΔH растет с понижением температуры, 4) с понижением концентрации ΔH падает, причем наклоны кривых концентрационной зависимости для нормальной и СП фаз заметно отличаются. Полученные результаты можно качественно интерпретировать следующим образом.

1. Нормальное состояние. Основные вклады в ширину линии ЭПР на локализованных магнитных моментах обусловлены взаимодействием их между собой (диполь-дипольные и обменные взаимодействия), с электронами проводимости (механизм Корринги) и с неоднородностями

криSTALLИЧеской решетки. Оценка уширения линии, вызванного только магнитными диполь-дипольными взаимодействиями приводит к $\Delta H = 4,9 \cdot 10^3$ с, что заметно превышает концентрационно-зависящую часть наблюдаемой ширины. Можно предположить, что сужение линии в исследованных образцах происходит вследствие косвенного обмена через электроны проводимости в соответствии с теорией Рудермана – Киттеля – Касуи – Иосиды (РККИ), поскольку прямой обмен между f -электронами маловероятен. В этом случае для полуширины лоренцевой кривой имеем $\Delta H = (\pi / 2\sqrt{3}) M_2^{3/2} / M_4^{1/2}$, где M_2 и M_4 – второй и четвертый моменты соответственно. При этом из работы [3] после усреднения по направлениям магнитного поля следует

$$M_2 = 3,8(g^2 \beta^2 / v)^2 + \sigma^2; \quad M_4 = 5,5(g^2 \beta^2 / v)^4 c + 12,8(g^2 \beta^2 / v)^2 l^2 c^2. \quad (1)$$

Здесь δ^2 – вклад в M_2 , обусловленный дефектами решетки и механизмом Коррингса (в M_4 он не учитывается), l – обменный интеграл между ионами для ближайших узлов решетки, c – их концентрация в атомных долях, v – объем, приходящийся на один атом. Отметим, что в случае $S = 1/2$ обменная часть M_4 не содержит линейного по концентрации члена. Как видно из рис. 3 экспериментальные результаты для $T = 4,2^\circ\text{K}$ удовлетворительно описываются этими формулами, если положить $\delta = 23$ э и $l_H = 3,3^\circ\text{K}$.

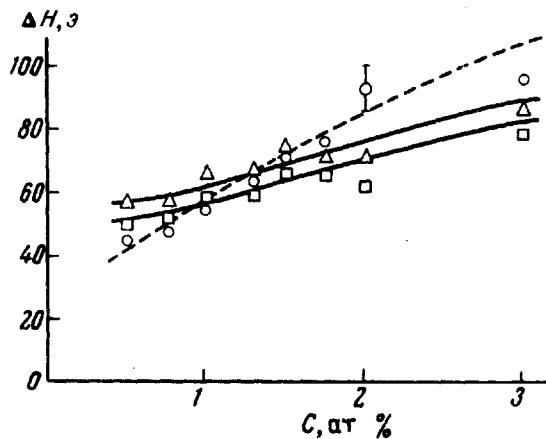


Рис. 3. Концентрационная зависимость ΔH при различных температурах: о – нормальная фаза $4,2^\circ\text{K}$; Δ и \square – СП фаза, 3°K и 2°K соответственно. Выражениям (1) соответствуют: в нормальной фазе – пунктирная линия, в СП фазе – сплошные линии

2. Сверхпроводящее состояние. При переходе в СП фазу появляется дополнительная причина уширения линии ЭПР вследствие возникновения неоднородного распределения магнитного поля в образце при $H_{c1} < H < H_{c2}$. Тем не менее, как уже отмечалось, происходит заметное сужение линии ЭПР, уменьшающееся с понижением концентрации парамагнитной примеси. Не исключено, что такое сужение линии может быть следствием увеличения косвенного обменного взаимодействия РККИ при переходе в СП состояние, что может быть связано с увеличением плотности состояний по обе стороны энергетической щели и эффектами когерентности. Приведенные на рис. 3 данные для $T = 3^\circ\text{K}$ можно согласовать с (1) при $\delta = 30$ э и $l_{\text{СП}} = 5,6^\circ\text{K}$. Наблюданная температурная зависимость δ , вероятно, определяется конкурирующими механизмами

уширения за счет неоднородного распределения поля и обменного сужения.

Авторы благодарны С.А.Альтшулеру и М.М.Зарипову за интерес к работе и полезные обсуждения.

Казанский
физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
1 августа 1973 г.

Литература

- [1] Т.С.Альтшулер, И.А.Гарифуллин, Э.Г.Харахашьян. ФТТ, 14, 263, 1972.
 - [2] C.Rettori, D.Davidov, P.Chaikin, R.Orbach. Phys. Rev. Lett., 30, 437, 1973.
 - [3] I.H.Van Vleck. Phys. Rev., 74, 1168, 1948.
-