

С. А. АЛЬШУЛЕР, В. Я. КУРЕНЕВ и С. Г. САЛИХОВ

ПАРАМАГНИТНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В МЕТАЛЛАХ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 5 IV 1952)

Е. К. Завойский, открывший явление парамагнитного резонансного поглощения, производил свои исследования большей частью в парамагнитных солях. Им было также установлено существование этого эффекта в некоторых металлах⁽¹⁾. Несмотря на то, что резонансное поглощение радиочастотного поля различными парамагнетиками за последнее время усиленно изучалось многими авторами, исследования парамагнитных металлов никем не проводились. Это объясняется, вероятно, рядом экспериментальных трудностей.

Для получения надежных результатов в металлах требуются установки большой чувствительности. Грубая оценка интенсивности линии резонансного парамагнитного поглощения может быть произведена, если принять, что величина эффекта пропорциональна статической восприимчивости χ_0 исследуемого вещества. Статическая восприимчивость металлов, как правило, намного меньше, чем солей.

Значительные затруднения связаны с большой электропроводностью металлов. Малая глубина проникновения радиочастотного поля в металл может привести к отсутствию наблюдаемого эффекта. Наконец, из работ по измерению статической восприимчивости металлов хорошо известно, насколько важно, но вместе с тем и трудно полностью избавиться от ферромагнитных загрязнений.

Мы попытались преодолеть эти трудности и изучить парамагнитное резонансное поглощение в 21 различных металлах. Как обычно, на исследуемый образец парамагнетика налагались два взаимно перпендикулярных магнитных поля: слабое переменное и сильное статическое. Переменное поле имело частоту $\nu = 2,38 \cdot 10^8$ герц; статическое магнитное поле H могло изменяться от 20 до 1000 эрст. Методом реакции на генератор, подробно описанном ранее⁽²⁾, производились измерения изменения величины поглощаемой парамагнетиком энергии Q , происходящего при медленном возрастании поля H .

Образцы металлов представляли собой мелкие порошки. Некоторые из них тщательно перемешивались с порошками парамагнитных солей. С целью освобождения образцов металлов от ферромагнитных загрязнений натрия, кадмия, ртути, мышьяка и селена возгонялись в вакуум. Порошки титана, ванадия, ниобия, вольфрама и платины настаивались в течение продолжительного времени с перегнанной соляной кислотой. Для контроля все образцы подвергались спектральному анализу. Чистота металлов проверялась также колориметрической реакцией с роданистым калием и эфиром, чувствительность которой выше $6 \cdot 10^{-5}\%$. Кроме того, в некоторых металлах были произведены измерения статической восприимчивости при различных значениях напряженности магнитного поля.

Результаты измерений парамагнитного поглощения подытожены в табл. 1. Существование эффекта было установлено во всех 9 подвергавшихся исследованию переходных металлах. Все 12 простых металлов заметного эффекта не дали. Для всех изучавшихся нами переходных металлов были получены кривые поглощения $Q = Q(H)$. Из этих кривых видно, что поглощение носит резонансный характер с одним явно выраженным максимумом. Кривые поглощения для хрома, вольфрама и церия приведены на рис. 1.

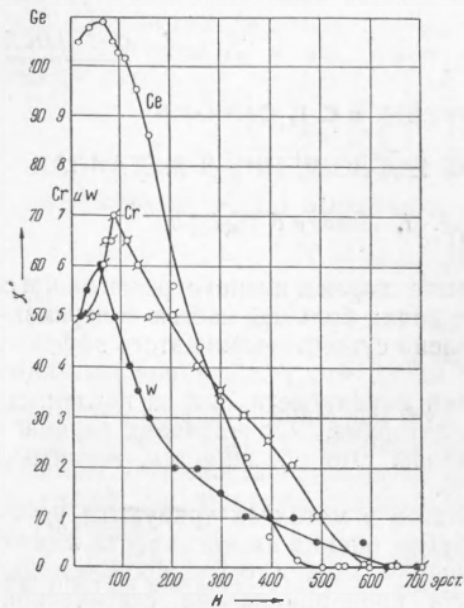


Рис. 1

По известным из статических измерений значениям атомной восприимчивости χ_A (см. табл. 1) можно заключить, что причиной отсутствия эффекта в простых металлах является недостаточная чувствительность установки. В табл. 1 приведено значение магнитного поля H_m , при котором наблюдается максимальное поглощение, и «правая полуширина» δ , т. е. $H_{1/2} - H_m$, где $H_{1/2}$ — значение поля $H > H_m$, при котором поглощение становится вдвое меньше максимального.

Из экспериментальных значений H_m с помощью уравнения $g\mu H_m = h\nu$ могут быть получены значения g -факторов. Как видно из таблицы, для всех элементов $g \approx 2$. Из этого следует, что основную роль в металлах играет спиновый магнетизм. Однако разброс наблюдаемых значений H_m с помощью измерений. Отклонения

величины g -факторов от значения $g = 2$ достигают 30%. Отсюда мож-

Таблица 1

Металл	$\chi_A \cdot 10^6$	H_m в эрст.	δ в эрст.
Ti . . .	150	76	265
V . . .	230	76	270
Cr . . .	160	90	210
Mn . . .	527	90	235
Nb . . .	121	100	245
La . . .	140	90	140
Ce . . .	2300	67	150
W . . .	40	60	150
Na . . .	15,6	—	—
Mg . . .	6	—	—
Al . . .	16,7	—	—
Cu . . .	-54	—	—
Zn . . .	-10	—	—
As . . .	-5,5	—	—
Se . . .	-265	—	—
Ag . . .	-21	—	—
Cd . . .	-19,6	—	—
Sn . . .	4,4	—	—
Hg . . .	-33,8	—	—
Bi . . .	-285	—	—

чений H_m лежит вне пределов

величины g -факторов от значения $g = 2$ достигают 30%. Отсюда мож-

но заключить, что для объяснения

наблюденных результатов зонное

приближение совершенно недоста-

точно и существенным является

учет спин-орбитального взаимодей-

ствия.

Особого рассмотрения требуют

редкоземельные металлы, ибо в этом

случае основную роль играют гл-

убоколежащие $4f$ -электроны. Можно

было бы ожидать, что, как и в со-

лях редкоземельных элементов,

спин-орбитальное взаимодействие

$4f$ -электронов окажется больше дей-

ствия внутрикристаллических по-

лей. В таком случае, так же как и

в солях, исследованных авторами

(³), положение максимума погло-

щения определялось бы g -факто-

ром, значение которого могло бы

значительно отличаться от 2. Более

того, можно было бы рассчитывать

на появление нескольких пиков по-

глощения. Из числа редкоземельных металлов нами исследовался

только церий, кривая поглощения которого дает довольно расплыв-

чатый максимум (рис. 1). Поэтому определенные выводы сделаны быть не могут. Приблизительно положение максимума поглощения соответствует $g = 2$. Возможно, что внутрикристаллическое поле в металле настолько велико, что оказалось в состоянии нарушить спин-орбитальную связь и «подавить» орбитальный магнетизм.

Из табл. 1 видно, что ширины кривых поглощения в металлах имеют тот же порядок, что и в парамагнитных солях. Из этого можно заключить, что, так же как и в большинстве солей, время спин-решеточной релаксации значительно больше времени спин-спиновой релаксации. Если учесть сравнительно большую «магнитную плотность» металлов, то путем простого расчета можно прийти к выводу, что на форму кривых поглощения в металлах существенное влияние оказывают обменные взаимодействия.

Интересные заключения могли бы быть сделаны из кривых поглощения, если бы измерения давали абсолютные значения поглощаемой энергии $Q(H)$. Такие абсолютные значения Q могли бы быть получены и из относительных измерений путем сравнения с поглощением в хорошо изученных солях. Мы, однако, не можем считать полученные нами путем такого сравнения значения Q достаточно точными, ибо трудно установить величину эффективной массы металла, участвовавшей в поглощении.

Величина статической восприимчивости металла сильно зависит от диамагнетизма валентных электронов и остова. Между тем, на парамагнитное поглощение энергии радиочастотного поля диамагнетизм никакого влияния не оказывает. Поэтому из кривых парамагнитного поглощения принципиально является возможным определить чисто парамагнитную часть статической восприимчивости металла.

Мы это попытались сделать, используя интегральные соотношения между коэффициентом поглощения χ'' и статической восприимчивостью χ_0 , установленные одним из авторов (4). Действительно, для некоторых металлов χ_0 , полученное таким путем из наших опытов, оказалось больше известного из статических измерений. Однако неточность измеренных нами абсолютных значений χ'' не позволяет сделать определенных количественных выводов.

Физико-технический институт
Казанского филиала Академии наук СССР

Поступило
27 II 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. К. Завойский, Докторская диссертация, 1944. ² С. А. Альтшулер, Е. К. Завойский и Б. М. Козырев, ЖЭТФ, 14, 407 (1944); С. Г. Салихов, ЖЭТФ, 17, 1070 (1947). ³ С. А. Альтшулер, В. Я. Куренев и С. Г. Салихов, ДАН, 70, 201 (1950). ⁴ С. А. Альтшулер, ЖЭТФ, 20, 1047 (1950).