

С. Г. САЛИХОВ

**РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В МЕТАЛЛАХ
НА САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ**

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 18 IX 1953)

За последнее время началось интенсивное изучение парамагнитного резонансного поглощения в металлах (1-3). Нами проведены измерения резонансного поглощения в 28 парамагнитных и суммарно-диамагнитных металлах при температурах 290 и 90° К на частоте $\nu = 9,378 \cdot 10^9$ гц.

Исследования велись на образцах, линейные размеры которых значительно больше, чем глубина проникновения электромагнитных волн в металл, и в то же время значительно меньше длины волны. В этом случае, как показал Блумберген (4), энергия, поглощенная образцом и зависящая от напряженности статического магнитного поля, складывается из двух частей: парамагнитных потерь и потерь на проводимость; при этом полные потери энергии пропорциональны

$$1 + 2\Pi(\chi' + \chi''). \quad (1)$$

Для того чтобы иметь возможность сравнивать поглощение в различных металлах, измеренные значения энергии поглощения пересчитывались по формуле

$$W_{\text{эфф}} = \frac{sd\sqrt{\rho}}{M} W_0, \quad (2)$$

где W_0 — полученная непосредственно из опыта энергия поглощения; s — активная поверхность образца; d — плотность металла; ρ — обратная величина удельной проводимости; M — молекулярный вес.

Раздельные кривые дисперсии и поглощения получены нами пересчетом при помощи формулы С. А. Альтшулера (5):

$$\chi''(H_0) - \chi'(H_0) - 2\chi_2''(H_0) - 2\chi_2'(H_0) = \frac{1}{\Pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(H_0 + H) - f(H_0 - H)}{H} dH, \quad (3)$$

где $\chi_1'' = \chi'' - \chi_2''$; $\chi' - i\chi_2'' = \frac{1}{2} \frac{1 + i\tau\nu}{1 + i(\nu + \nu_0)\tau}$; τ — время спиновой релаксации.

Эксперименты осуществлялись следующим образом: отражательный клистрон соединялся с главным волноводом измерительной линии; контроль частоты осуществлялся посредством резонансного волномера, связанного с линией через петлю связи; резонансная полость представляла собой продолжение волновода с подвижным дном, на котором укреплялась поглощающая ячейка; металлические образцы в виде тонких пластинок помещались в поглощающей ячейке.

Поверхность исследуемого металлического образца специально обрабатывалась до оптической гладкости для того, чтобы обеспечить

равномерное проникновение радиоволн в металл. Некоторые образцы металлов (титан, ванадий, ниобий, вольфрам и платина) с целью освобождения их от ферромагнитных загрязнений настаивались в течение продолжительного времени с перегнанной соляной кислотой. Чистота металлов проверялась также колориметрической реакцией с роданистым калием и эфиром, чувствительность которой выше $6 \cdot 10^{-5}$; кадмий, натрий, ртуть, мышьяк и селен возгонялись в вакууме. Для контроля все образцы подвергались спектральному анализу. Кроме того, для контроля в некоторых металлах были произведены измерения статической восприимчивости при различных значениях напряженности магнитного поля.

Результаты измерений парамагнитного поглощения в парамагнитных и суммарно-диамагнитных металлах подытожены в табл. 1.

Таблица 1

Металлы	$\chi_A \cdot 10^6$	$W_{эфф.}$	$T=290^\circ K$			$T=90^\circ K$		
			g -фактор	Ширина линии δ в эрст.	Интенсивн. линии в максим. I	g -фактор	Ширина линии δ в эрст.	Интенсивн. линии в максим. I
Li . . .	+25,9	5,73	1,80	550	4,5	1,95	550	4,5
Na . . .	+15,2	2,30	2,02	500	36,0	2,00	500	36,0
K . . .	+20,0	1,47	2,00	650	122,0	2,00	650	122,0
Mg . . .	+ 6,0	4,00	1,98	600	126,0	2,05	650	130,0
Al . . .	+16,7	4,15	2,04	650	20,5	1,90	640	22,0
V . . .	+23,0	13,30	2,00	600	12,0	2,00	620	13,0
Nb . . .	+140,0	8,80	2,10	200	22,5	2,05	200	22,5
Ta . . .	+145,0	8,45	2,00	1200	7,5	2,02	1100	28,0
Cr . . .	+160,0	1,40	2,05	900	2,0	2,02	900	2,0
Mo . . .	+ 54,0	6,08	2,02	700	3,0	2,03	720	3,5
W . . .	+ 40,0	6,05	1,83	1100	21,0	1,92	1200	7,2
Mn . . .	+527,0	7,65	2,05	800	7,0	2,03	800	7,5
Ru . . .	+ 44,0	8,20	2,00	600	1,2	2,01	600	1,6
Rh . . .	+113,0	6,20	2,00	800	1,4	2,00	850	1,5
Pd . . .	+580,0	9,60	2,00	400	0,6	2,07	375	10,0
Os . . .	+ 7,6	8,45	1,98	890	1,5	2,01	900	1,6
Ir . . .	+ 25,0	6,00	2,03	1000	1,3	2,02	1000	1,8
Pt . . .	+200,0	8,65	1,80	800	15,0	1,79	800	25,0
Zn . . .	- 10,0	6,20	1,80	700	3,7	2,05	700	3,7
Cd . . .	- 19,6	5,05	2,00	1500	9,0	2,06	670	10,5
Hg . . .	- 33,8	13,10	1,97	700	2,0	2,00	700	2,0
Sn . . .	+ 4,4	4,70	1,98	800	20,0	2,00	800	22,0
Pb . . .	-240,0	6,00	1,90	800	21,0	1,95	800	21,0
Sb . . .	-107,0	8,50	2,00	1000	21,0	1,92	1000	21,0
Bi . . .	-285,0	12,50	2,00	650	18,0	1,85	600	18,0
As . . .	- 55,0	9,03	1,98	700	23,0	2,07	670	23,0
Se . . .	-265,0	4,30	1,95	1000	1,6	2,00	1100	1,8
Si . . .	- 25,0	3,65	2,02	450	6,0	1,97	400	6,0

В таблице приведены значения факторов спектроскопического расщепления g , вычисленные при помощи формулы

$$\nu = \frac{g\mu H^*}{h}; \quad (4)$$

ν — частота генератора, μ — магнетон Бора, H^* — резонансное поле.

Для комнатной температуры значение g как у парамагнитных, так и у суммарно-диамагнитных металлов довольно близко к чисто спиновому значению $g = 2,00$. Однако для некоторых металлов наблюдаются отклонения значений g -факторов от 2, а именно для лития,

вольфрама, платины, цинка и свинца. Отклонения значений g -фактора от 2 находятся за пределами возможной экспериментальной ошибки, так как на частоте $9,378 \cdot 10^9$ гц возможная ошибка в определении g -факторов не превышала 2%.

Как видно из таблицы, при понижении температуры до жидкого кислорода значения g -факторов для многих металлов также близки

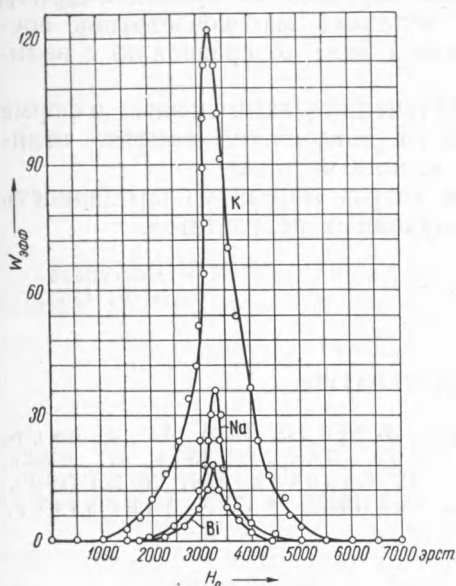


Рис. 1. $T = 290^\circ\text{K}$, $\lambda = 3,2$ см

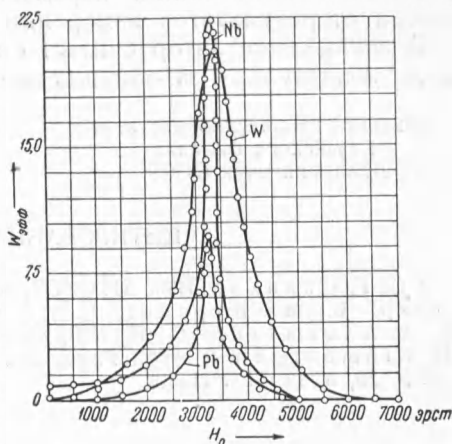


Рис. 2. $T = 90^\circ\text{K}$, $\lambda = 3,2$ см

к чисто спиновому значению $g = 2,00$. Однако для некоторых металлов и здесь наблюдаются отклонения значений g -факторов от 2, а именно, для алюминия, вольфрама, платины, сурьмы и висмута.

Интересным является тот факт, что с понижением температуры значение g для сурьмы становится меньше 2. Для висмута также наблюдается резкий спад значения g с температурой.

В табл. 1 приведены значения ширины резонансных линий δ в исследуемых областях температуры. У кадмия наблюдается резкое изменение формы кривой с понижением температуры: полуширина с 1500 эрст. при комнатной температуре резко падает до 670 эрст. при температуре жидкого кислорода.

Интенсивность резонансных линий с понижением температуры изменяется незначительно.

На рис 1. приведены кривые суммарных потерь при комнатной температуре для калия, натрия и висмута; по оси ординат отложены $W_{\text{эфф}}$, а по оси абсцисс — статическое внешнее магнитное поле H_0 . Как видно из графика, линия калия в 3,5 раза интенсивнее, чем линия натрия, и в 7 раз интенсивнее, чем линия висмута.

На рис. 2 приведены результаты измерений на низких температурах для ниобия, вольфрама и палладия. Для большинства металлов изменение температуры не влияет на форму резонансных пиков.

Методом, описанным выше, нами были выделены парамагнитное поглощение и дисперсия из суммарной кривой, дающие суммарные

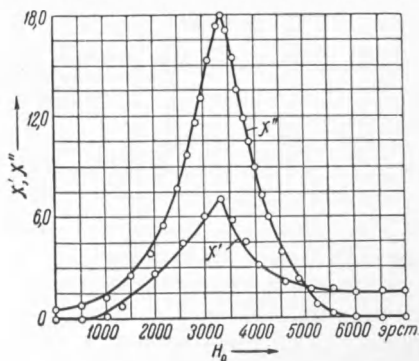


Рис. 3. Вольфрам. $T = 290^\circ\text{K}$, $\lambda = 3,2$ см

поглощения по формуле (3). Эти кривые приведены на рис. 3. Кривая $\chi''(H_0)$ имеет максимум при том же значении H_0 , что и кривая $W_{\text{эфф}}(H_0)$ для вольфрама. Ширина кривой $\chi''(H_0)$ несколько больше, чем кривой $W_{\text{эфф}}(H_0)$. Малое изменение формы при переходе от кривой $W_{\text{эфф}}(H_0)$ к кривой $\chi''(H_0)$ связано с тем, что величина высокочастотной восприимчивости $\chi'(H_0)$ в области резонанса мала по сравнению с величиной $\chi''(H_0)$.

Наконец, следует отметить, что полученные нами данные о форме и интенсивности линий парамагнитного поглощения заметно отличаются от результатов измерений на низких частотах.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность С. А. Альтшулеру за обсуждение полученных результатов.

Физико-технический институт
Казанского филиала
Академии наук СССР

Поступило
30 VI 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Г. Салихов, Изв. АН СССР, сер. физ., **26**, № 6, 748 (1952). ² С. А. Альтшулер, В. Я. Куренев, С. Г. Салихов, ДАН, **84**, № 4, 677 (1952).
³ С. А. Альтшулер, В. Я. Куренев, С. Г. Салихов, ДАН, **70**, 201 (1950).
⁴ N. Bloembergen, J. Appl. Phys., **23**, № 12, 1383 (1952). ⁵ С. А. Альтшулер, ЖЭТФ, **20**, в. 11, 1147 (1950).