538.113

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Е. К. Завойский

1. ПАРАМАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ЖИДКИХ РАСТВОРАХ ПРИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ПОЛЯХ **)

ДИСПЕРСИЯ АБСОРБЦИИ

В литературе нет данных о наличии дисперсии парамагнитной абсорбции для перпендикулярных полей, даже в твердых солях. Поэтому представляет интерес изучение этого вопроса для кристаллов и растворов. Здесь приводятся данные по дисперсии для твердого треххлористого хрома, водного раствора хлористого марганца и пятиводного сульфата меди.

На рис. 1—3 изображены результаты измерений соответственно для треххлористого хрома, водного раствора хлористого марганца ($c = 0{,}1$ *г/см*^{3}) и пятиводного сульфата меди, где на оси абсцисс отложены

*) Устойчивой является точка $V = V_R$, которая соответствует второй четверти полупериода, когда разность потенциалов в ускоряющем промежутке уменьшается со временем.

**) По ЖЭТФ 15(7), 347 (1945) воспроизводятся разделы 6 «Дисперсия абсорбции» и «Дискуссия результатов измерений». Рис. 1—3 соответствуют рис. 10—12 оригинала, литературные ссылки [1-4] соответствуют ссылкам [7-10] в оригинале.

напряженности постоянного магнитного поля, а по оси ординат — значения абсорбций, выраженных в процентах к абсорбции при остаточном поле электромагнита, равном, как было указано, приблизительно 10 *э*.

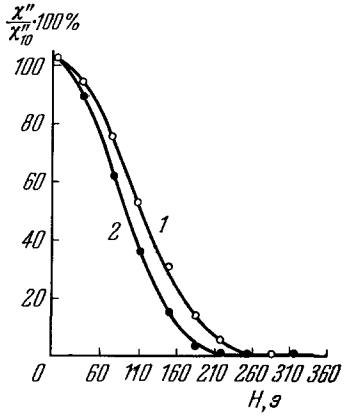

Рис. 1. $CrCl_3$.
λ = 13,70 *см*, T = 298° К.

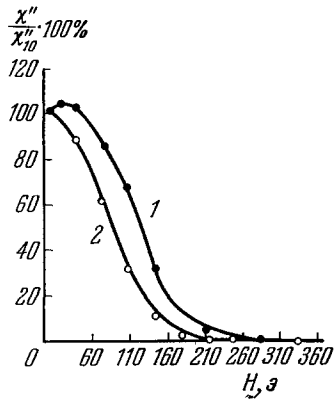

Рис. 2. $CrCl_3$.
λ= 10,85 *см*, T = 298° К.

Кривые *1* и *2* рис. 1 отвечают длинам волн 25,3 и 56,5 *м*, кривые *1* и *2* рис. 2 — волнам 27,0 и 56,5 *м*, кривые *1* и *2* рис. 3 — волнам 23,5 и 56,5 *м*. Отсюда видно смещение функции $\chi'' = \chi''(H)$ в область больших магнитных полей H при увеличении частоты осциллирующего поля, причем особенно заметно увеличение магнитного поля, наполовину подавляющего абсорбцию от ее максимального значения, с уменьшением длины волны.

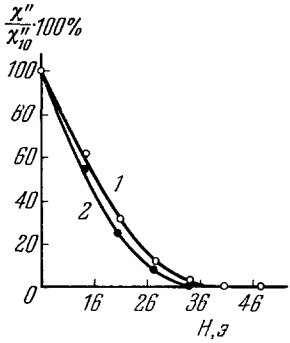

Рис. 3. $MnSO_4$.
λ = 10,9 *см*, T = 298° К.

ДИСКУССИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Формальные теории Гортера и Кронига [1] и Кронига [2] парамагнитной абсорбции в перпендикулярных полях не могут дать на основании имеющегося материала достаточно полной картины явления. В последнее время Я. И. Френкель [3] развил оригинальную теорию парамагнитной релаксации в перпендикулярных полях, положив в основу явления магнитоспиновый резонанс. Согласно его теории магнитный момент атома совершает прецессионное движение во внешнем магнитном поле с частотой ν_0; при совпадении частоты ν_0 с частотой колебаний высокочастотного поля наблюдается увеличение абсорбированной парамагнетиком энергии, если время установления равновесия между системой спинов и вибрациями решетки меньше $1/\nu$. В противном случае условие максимума абсорбции изменяется. Эти вычисления при спине 1/2 дают

$$\chi'' = \frac{2\nu_0^2\nu\nu'\chi_0}{(\nu_0^2-\nu^2)^2+4\nu^2\nu'^2}, \qquad (1)$$

где χ'' — коэффициент при мнимой части магнитной восприимчивости, χ_0 — статическая магнитная восприимчивость, $\nu_0 = aH$ — частота прецессии Лармора, a — константа, H — напряженность постоянного магнитного поля, ν — частота генератора, $\nu' = 1/\rho$ — величина, обратная

времени релаксации ρ. Из этого уравнения получается условие максимума абсорбции

$$\nu_0^4 - \nu^4 = 4\nu^2\nu'^2.$$

Если для времени установления спин-решеточного равновесия принять значение, найденное из измерений релаксации в параллельных полях, то для рассмотренных выше парамагнетиков при комнатной температуре ν' будет иметь порядок величины

$$\nu' \approx 3 \cdot 10^6 \text{ гц}.$$

При этом условии в области частот $\nu \approx 10^7$ *гц* максимум абсорбции должен быть расположен при $\nu_0 \approx \nu$. Оценка напряженности постоянного магнитного поля в максимуме абсорбции по уравнению

$$H = \frac{\nu}{a}$$

дает $H \approx 10$ *э*. Величина этого поля равна остаточной напряженности поля электромагнита, а поэтому в условиях описанных экспериментов максимум абсорбции практически не мог наблюдаться. Вопрос о существовании максимума парамагнитных потерь будет рассмотрен особо.

Следует заметить, что теория Френкеля в одинаковой степени приложима к твердым и жидким телам и позволяет предвидеть тождественный характер явлений релаксации в них, если растворение твердой соли не изменяет состояния магнитного атома и не сопровождается существенным изменением времени установления равновесия между спин-системой и молекулярным движением. Опыт подтверждает это: в водных растворах солей марганца магнитные ионы благодаря S-состоянию имеют тот же фактор Ланде, а наши измерения ρ в них приводят приблизительно к тем же временам релаксации, что и в кристаллических соединениях марганца[4]. С другой стороны, как было экспериментальным путем показано выше, явления релаксации в растворах тождественны релаксации в кристаллах, что относится к зависимости $\chi'' = \chi''(H)$ и дисперсии абсорбции. На этом основании можно попытаться интерпретировать полученные нами результаты как в твердых, так и жидких телах с точки зрения теории магнитоспинового резонанса Френкеля. К сожалению, в настоящее время нет точных данных о времени релаксации для интересующих нас парамагнетиков. Поэтому возможность интерпретации, например, зависимости релаксации в растворах от концентрации пока исключена. Но явление дисперсии может быть объяснено. Рассматривая уравнение для количества абсорбированной парамагнетиком энергии

$$W = A\nu\chi''h^2,$$

где A — константа, ν — частота, h — напряженность высокочастотного магнитного поля, находим

$$W = A\,\frac{2\nu_0^2\nu^2\nu'}{(\nu_0^2-\nu^2)^2+4\nu^2\nu'^2}\,h^2. \qquad (2)$$

Из этого уравнения непосредственно следует наблюденное на опыте смещение кривой абсорбции в область больших магнитных полей H с увеличением частоты поля. Эффект смещения будет особенно заметен в том случае, когда ν имеет порядок ν', так как роль последнего слагаемого в знаменателе уравнения (2) возрастает. Этому следствию из уравнения (2) не противоречат все имеющиеся данные о порядке величины ν'. Надо заметить, что пока неизвестная зависимость ρ от напряженности постоянного магнитного поля не может существенно повлиять на наши выводы,

так как эта зависимость не должна быть столь сильной, чтобы заметно изменить расположение кривой абсорбции. Но следует указать на возможность усложнения картины абсорбции аномальным зеемановским расщеплением энергетических уровней магнитного атома; относящиеся сюда вопросы могут быть разобраны только на данных по парамагнитной релаксации в перпендикулярных полях и при весьма высоких частотах.

Казанский государственный университет

Поступило в редакцию 12 июля 1944 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. J. Gorter and R. de L. Kronig, Physica 3, 1009 (1936).
2. R. de L. Kronig, Physica 5, 65 (1938).
3. Я. И. Френкель, ЖЭТФ 15, 409 (1945).
4. Е. К. Завойский, ЖЭТФ 15, 253 (1945); J. Phys. (USSR) 8, 377 (1944).

2. МАГНИТОСПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС В ПАРАМАГНЕТИКАХ *)

В парамагнитном теле, помещенном в высокочастотном магнитном поле, помимо электрических потерь, наблюдаются также и потери энергии чисто магнитной природы. В 1936 г. Гортер [1] наблюдал подавление этих магнитных потерь на частоте 10^4 *кгц* при наложении постоянного магнитного поля, перпендикулярного к направлению переменного поля.

Интересно было исследовать это явление на значительно бóльших частотах. Было обнаружено, что при частоте $\nu = 1{,}33 \cdot 10^5$ *кгц* в гидратированной двухлорной меди наблюдается острый пик поглощения при напряженности постоянного магнитного поля $H = 47{,}6$ *э*. Поглощение в максимуме возрастает по мере снижения температуры от комнатной до температуры твердого водорода.

При температуре жидкого гелия (в интервале от 4,2° до 1,2° K) пик поглощения практически исчезает и поглощение перестает зависеть от постоянного магнитного поля.

Наблюдение указанного пика поглощения свидетельствует в пользу предположения [2], что в этих условиях осуществляется резонанс между частотой прецессии магнитного момента иона в постоянном магнитном поле и частотой переменного магнитного поля. Если это справедливо, то отношение $\frac{\nu}{H} = \frac{1{,}33 \cdot 10^8}{47{,}6} = 2{,}791 \cdot 10^6$ выражает частоту прецессии спина в поле напряженностью 1 *э*. Отсюда следует, что спин двухлорной меди равен 1/2.

Данное явление представляет интерес с точки зрения определения времен релаксации парамагнетиков.

Низкотемпературные измерения были выполнены при непосредственном участии проф. А. Шальникова с любезного согласия проф. П. Капицы, которым автор выражает искреннюю признательность.

Казанский государственный университет

Получено редакцией 14 марта 1945 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Gorter, Physica 3, 503, 998, 1006 (1936).
2. J. Frenkel, J. Phys. (USSR) 9 (1945).

---

*) Воспроизводится по J. Phys. (USSR) 9, 245 (1945).

3. МАГНИТОСПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН *)

В последнее время нами было установлено [1, 2], что парамагнитное поглощение во взаимно перпендикулярных полях достигает максимальной величины при совпадении частоты переменного поля с ларморовской частотой ионного спина. Было замечено, что для следующих солей: $MnSO_4$, $CuCl_2 2H_2O$, $CrCl_3$, $MnCO_4$ — положение максимума при $\nu = 10^5$ *кгц* соответствует значению спина 1/2, так что фактор Ланде для них равен 2 **). Это хорошо согласуется с результатами гиромагнитных измерений.

В настоящей заметке сообщаются основные результаты исследования поглощения на значительно бо́льших частотах, для чего был использован метод, описанный ранее в статье [1]. Генератором в диапазоне длин волн $10 \div 14$ *см* служил магнетрон мощностью 0,3 *вт*.

На рис. 1—3 представлены графики зависимости парамагнитного поглощения Q от магнитного поля H, причем поглощение отложено в относительных единицах ($Q = 0$ при $H = 0$), а магнитное поле — в эрстедах ***).

Из этих данных можно вычислить отношение $\nu/H^* = a$, где H^* — напряженность поля в максимуме поглощения на частоте ν. По данным рис. 1—3 находим соответственно: $a = 2{,}74 \cdot 10^6$; $2{,}73 \cdot 10^6$; $2{,}73 \cdot 10^6$ *сек*$^{-1}$*э*$^{-1}$. Отличие этих величин от теоретического значения $2{,}8 \cdot 10^6$ для спина $S = 1/2$ не превышает 2%.

Более подробно наши эксперименты будут описаны в другом месте.

Автор желает выразить благодарность проф. П. Капице за предоставление возможности проведения данной работы в Институте физических проблем и проф. А. Шальникову за постоянные и весьма ценные консультации.

Институт физических проблем АН СССР
Казанский государственный университет

Получено редакцией
12 февраля 1946 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. K. Zavoisky, J. Phys. (USSR) 9, 211 (1945).
2. E. K. Zavoisky, J. Phys. (USSR) 9, 245 (1945).