

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПАРАМАГНЕТИКОВ НА ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Е. К. Завойский *

Введение

Измерение действительной части магнитной восприимчивости парамагнетиков в области частот не выше $5 \cdot 10^7$ герц, как известно, производится хорошо разработанным методом биений [1,2]. Для более высоких частот, несколько нам известно, не было предложено достаточно точных и практически удобных способов измерений. Необходимость же в такой методике вполне назрела, по крайней мере для изучения парамагнитной релаксации. Именно последнее — явление магнитоспинового резонанса [3] — заставило испытать описываемый ниже метод.

Метод

Если парамагнетик находится в однородном высокочастотном магнитном поле, то его свойства в отношении этого поля существенно зависят от величины и ориентации постоянного магнитного поля [1–4]. Так, для некоторых веществ действительная и мнимая части магнитной восприимчивости зависят только от постоянного поля, параллельного высокочастотному, в то время как для других веществ играет роль только перпендикулярное поле. К первой группе принадлежат некоторые сильно гидратированные соли Cr^{+++} , Mn^{++} , Cu^{++} [4], а ко второй — безводные или слабогидратированные соли этих же ионов [4,3]. Существует группа веществ, например железоаммонийные и хромокалиевые квасцы [4], жидкие растворы [5], в которых наблюдаются оба эффекта одновременно.

Предлагаемый метод использует анизотропию, появляющуюся в парамагнетике благодаря постоянному магнитному полю, и основан на независимости магнитных восприимчивостей в направлении, параллельном и перпендикулярном полю.

Рис. 1 поясняет идею метода. Здесь AB и CD — оси двух катушек самоиндукций, острый угол α между которыми равен или близок к $\pi/2$. Через катушку AB проходит ток частоты ν , а в катушку CD включен измеритель электродвижущей силы индукции, например детектор с гальванометром. Все пространство внутри катушек и снаружи заполнено изучаемым парамагнетиком. Пусть постоянное магнитное поле H_c составляет угол $90 - \varphi$ с напряженностью H высокочастотного поля, направленного параллельно AB . Обозначим магнитную восприимчивость в направлении, перпендикулярном H_c , через χ_{\perp} , а в направлении H_c — через χ_{\parallel} . Очевидно,

$$\chi_{\perp} = \chi'_{\perp} + j\chi''_{\perp}, \quad \chi_{\parallel} = \chi'_{\parallel} + j\chi''_{\parallel}.$$

* This paper by E. Zavoisky, «The Measurement of Paramagnetic Susceptibility with Decimetre Waves» will be published in English in Journ. of Phys., 11, No 2, 1947.

где χ'_{\perp} и χ'_{\parallel} , χ''_{\perp} и χ''_{\parallel} — соответственно действительные и мнимые части восприимчивостей в перпендикулярных и параллельных полях. Разлагая H на составляющие по H_c и перпендикулярно H_c , можно найти компоненты магнитной индукции B по этим направлениям

$$B_{\perp} = H \cos \varphi + 4 \pi \chi'_{\perp} H \cos \varphi,$$

$$B_{\parallel} = H \sin \varphi + 4 \pi \chi'_{\parallel} H \sin \varphi,$$

где $H = H_0 e^{j\omega t}$, ω — угловая частота.

Проецируя слагающие индукции на CD , беря их сумму и умножая ее на площадь S витков этой катушки и угловую частоту ω , находим амплитуду электродвижущей силы взаимной индукции катушек

$$e = e_1 + j e_2, \quad (1)$$

где

$$e_1 = \omega S H_0 \{ \cos \alpha + 4 \pi [\chi'_{\perp} \cos \varphi \cos (\varphi + \alpha) + \chi'_{\parallel} \sin \varphi \sin (\varphi + \alpha)] \}, \quad (2)$$

$$e_2 = 4 \pi \omega S H_0 [\chi''_{\perp} \cos \varphi \cos (\varphi + \alpha) + \chi''_{\parallel} \sin \varphi \sin (\varphi + \alpha)]. \quad (3)$$

При измерениях, как это будет показано ниже, удобно брать α таким, чтобы первое слагаемое в уравнении (1) было значительно больше второго. Естественно, что электродвижущая сила индукции в измерительной катушке определяется только величиной e_1 .

Рассмотрим работу детектора в катушке CD . Допустим, что мгновенное значение тока i в детекторе может быть представлено полиномом вида

$$i = ne + me^2 + pe^3, \quad (4)$$

где n , m и p — постоянные коэффициенты, а e равно $e = e_1 \cdot e^{j\omega t}$, где e_1 находится из уравнения (2). Усредняя i за период колебаний T , очевидно, имеем

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{m}{2} e_1^2. \quad (5)$$

Положим, что при $H_c = 0$, $I = I_0$ и $e_1 = E_0$. Введем обозначения $I = I_0 - \Delta I$, $e_1 = E_1 + E$, где

$$E_1 = \omega S H_0 [\cos \alpha + 4 \pi \chi'_{\parallel} \sin \varphi \sin (\varphi + \alpha)], \quad (6)$$

$$E = 4 \pi \omega S H_0 \chi'_{\perp} \cos \varphi \cos (\varphi + \alpha), \quad (7)$$

а $\Delta I \ll I_0$, $E \ll E_1$. Отбрасывая члены второго порядка малости, получаем

$$\Delta I = -m E_1 E, \quad (8)$$

т. е. показания гальванометра, считая их от I_0 , пропорциональны действительной части магнитной восприимчивости и знак ΔI определяется знаком χ'_{\perp} . Если при некоторых значениях H_c вещество диамагнитно, то $\chi'_{\perp} < 0$ и $\Delta I < 0$, так как $\cos (\varphi + \alpha) < 0$, но при $\chi'_{\perp} > 0$ $\Delta I > 0$.

При относительных измерениях зависимости χ'_{\perp} от H_c , очевидно, достаточно измерить ΔI при разных H_c . Для абсолютных определений

χ'_{\perp} легко воспользоваться следующим приемом. Убедившись, что амплитуда тока высокой частоты в катушке AB не меняется с течением времени, можно измерить зависимость ΔI от α , вращая AB относительно CD .

Если под величиной E в уравнении (8) подразумевать электродвижущую силу индукции в катушке CD , возникающую в ней при изменении α на малую величину $\Delta\alpha$, то это уравнение можно переписать в виде

$$\Delta I = -mE_1 \omega SH_0 \sin \alpha \cdot \Delta\alpha. \quad (9)$$

Приравнявая это ΔI тому изменению тока I_0 , которое вызвано полем H_c в парамагнетике при постоянном α , будем иметь согласно уравнениям (8) и (7)

$$-\omega SH_0 \sin \alpha \cdot \Delta\alpha = 4\pi \omega SH_0 \cos \varphi \cos (\varphi + \alpha) \Delta\chi'_{\perp} \quad (10)$$

или

$$\Delta\chi'_{\perp} = -\frac{\sin \alpha}{4\pi \cos \varphi \cos (\varphi + \alpha)} \Delta\alpha, \quad (11)$$

где $\Delta\chi'_{\perp}$ есть разность значений χ'_{\perp} в поле H_c и при $H_c = 0$. Очевидно, если при $H_c = 0$ $\chi'_{\perp} = 0$, то $\Delta\chi'_{\perp}$ равно χ'_{\perp} в данном поле H_c .

Уравнение (11) принимает особенно простой вид при $\sin \alpha \cong 1$, $\varphi = \pi/4$ и $\Delta\chi'_{\perp} = \chi'_{\perp}$:

$$\chi'_{\perp} = \frac{1}{2\pi} \Delta\alpha. \quad (12)$$

Измерительная установка

Установка на волну 16 см была собрана на магнетроне RD2ND2 мощностью около 0,3 W. Питание генератора осуществлялось от аккумуляторов. Внешний контур — лехеровская система — был емкостно связан с центральным проводом гибкого коаксиального высокочастотного фидера длиной 2 м, наружная стенка которого присоединялась к экрану лехеровской системы.

Свободный конец фидера замыкался на виток прямоугольной формы длиной 2,5 см и шириной 1 см, сделанный из медного провода диаметром 0,8 мм. Ось этого витка, перпендикулярная его плоскости, имела направление AB (рис. 1).

Под углом, близким к 90° , к плоскости этого витка располагался второй виток с осью CD , имеющий такие же размеры, как и первый.

В этот виток через миниатюрную емкость порядка 10 см присоединялся кристаллический детектор типа ED-704, соединенный через дроссель с апериодическим гальванометром на 10^{-9} А типа Гартман-Браун. При больших значениях тока I_0 он компенсировался потенциометром или перед измерениями нить гальванометра закручивалась на некоторый угол в сторону, обратную отклонениям. Оба витка монтировались на изоляторах внутри трубки диаметром 2,3 см, сделанной из электролитической меди, и весь объем трубки в месте расположения витков заполнялся парамагнетиком. Трубка

5 жэФ, № 2

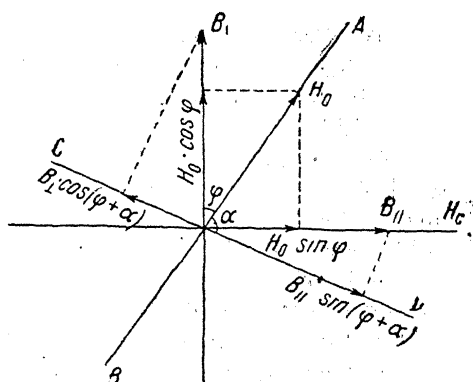


Рис. 1