

10.1. ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Хурсик Екатерина

Цель работы

1) Исследовать электронный парамагнитный резонанс в молекуле ДФПГ; 2) определить g -фактор электрона; 3) измерить ширину линии.

1 Теоретическое введение

g -фактор

Энергетический уровень электрона в присутствии магнитного поля B расщепляется на два подуровня, расстояние между которыми равно:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2\mu B \quad (1)$$

Между этими двумя уровнями возможны переходы. Они могут возбуждаться внешним высокочастотным магнитным полем подходящих характеристик. Резонансное значение частоты определяется из очевидного соотношения:

$$\hbar\omega_0 = \Delta E = 2\mu B \quad (2)$$

В работе требуется получить ЭПР сигнал на ДФПГ. Известно, что связь между магнитным моментом электрона и его механическим моментом выражается через гиромагнитное соотношение:

$$\mu = \gamma \mathbf{M} \quad (3)$$

Если магнитный момент выражается в магнетонах Бора, а механический в единицах \hbar , то связь выражается через фактор Ланде:

$$\frac{\mu}{\mu_B} = \frac{g\mathbf{M}}{\hbar} \quad (4)$$

Эта формула справедлива и для проекций. Можно выразить g -фактор через определяемые экспериментально величины:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B_0}, \quad (5)$$

где μ_B – магнетон Бора, а величину магнитного поля B_0 можно рассчитать из соотношения

$$V_{\Pi} = NB_0 S \omega_{\simeq},$$

где $\omega_{\simeq} = 2\pi\nu$ – угловая частота переменного тока (ν -частота сети).

Ширина линии ЭПР

Для определения ширины линии ЭПР определяем по экрану осциллографа полный размах модулирующего поля (в делениях шкалы) $A_{\text{полн}}$ и полную ширину кривой резонансного поглощения на полувысоте $A_{1/2}$. Берём пробную катушку и вносим её внутрь соленоида максимально близко к образцу. Переменное поле модуляционных катушек наводит в пробной катушке ЭДС индукции, по которой можно определить величину поля. Параметры пробной катушки указаны на ней ($N = 46$, $d = 14.6 \pm 0.1$ мм и ЭДС $\varepsilon_i = 2,51 \cdot 10^{-3} B$). Вольтметр измеряет действующее значение ЭДС индукции, а полный размах сигнала на экране осциллографа соответствует амплитудному значению переменного поля. По измеренной ЭДС индукции ε_i и параметрам катушки (числу витков $N_{\text{проб}}$ и диаметру намотки d) определите амплитуду модулирующего поля $B_{\text{мод}} = \sqrt{2} \frac{2\varepsilon_i}{\pi^2 d^2 N_{\text{проб}} \nu}$, где ν - частота модулирующего напряжения. Полуширина на полувысоте линии резонансного поглощения (в единицах поля) может быть тогда получена как $\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн}}} B_{\text{мод}}$.

Установка

Для исследования электронного парамагнитного резонанса в данной работе используется радиоспектроскоп. Его действие основано на уменьшении добротности контура при появлении резонансных парамагнитных потерь. Величина постоянного магнитного поля B , резонансная частота колебательного контура и частота генератора ω выбираются так, чтобы они были близки к значениям, удовлетворяющим уравнению $\hbar\omega_0 = \Delta E = 2\mu B$.

При наступлении ЭПР поглощение энергии в образце увеличивается, добротность колебательного контура падает, и амплитуда колебаний в контуре уменьшается.

Схема спектро스코па приведена на рисунке:

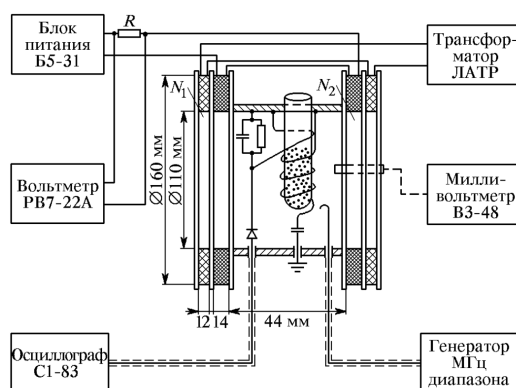


Рис. 1: Схема установки

Параметры установки: $N_1 = 1500$, $d_1 = 0.23$ см, $N_2 = 4500$, $d_2 = 0.29$ см

2 Метод достижения цели

2.1

Для наблюдения электронного парамагнитного резонанса нужно поместить исследуемое вещество в магнитное поле и измерить поглощение электромагнитного излучения, частота которого удовлетворяет соотношению (2).

При настулении ЭПР поглощение энергии в образце увеличивается, добротность колебательного контура падает, а соответственно амплитуда колебаний в контуре уменьшается.

2.2

Измеряем g -фактор, для чего находим резонансное значение частоты ω_0 и индукции B_0 . Резонансную частоту ω_0 определяем по лимбу генератора.

Величину магнитного поля B_0 поля измеряем следующим способом:

- помещаем пробную катушку внутрь основных катушек;
- снимаем показания лампового милливольтметра V ;
- зная параметры пробной катушки из соотношения $V = NB_0S\omega_{\simeq}$, где ω_{\simeq} - угловая частота переменного тока, определяем величину магнитного поля B_0 ;
- вычисляем g -фактор по формуле $g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B_0}$.

2.3

Измерение ширины линии производится по экрану осциллографа.

Получив сигнал ЭПР, переключаем осциллограф в режим временной развёртки на развёртку от модуляционных катушек. Длина развёртки есть удвоенная амплитуда модулирующего поля. Амплитуду этого поля определяем при помощи милливольтметра и пробной катушки.

Ширину линии получаем, пользуясь формулой (2).

3 Ход работы

Настроим генератор на резонансную частоту колебательного контура, определили значение частоты при максимальном и половинных значениях амплитуды выведенного на осциллограф сигнала:

$$\omega_0 = 125.76 \text{ МГц},$$

$$\omega_h = 126.94 \text{ МГц},$$

$$\omega_l = 126.46 \text{ МГц}.$$

Рассчитаем добротность

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{125.76}{0.48} = 262$$

Теперь настроим установку на наблюдение резонансного сигнала. Резонансное поглощение возникает при совпадении в некоторые моменты времени поля $B(t)$ с полем резонансного поглощения на частоте колебательного контура $B_0 = \frac{hf_0}{g\mu_B}$.

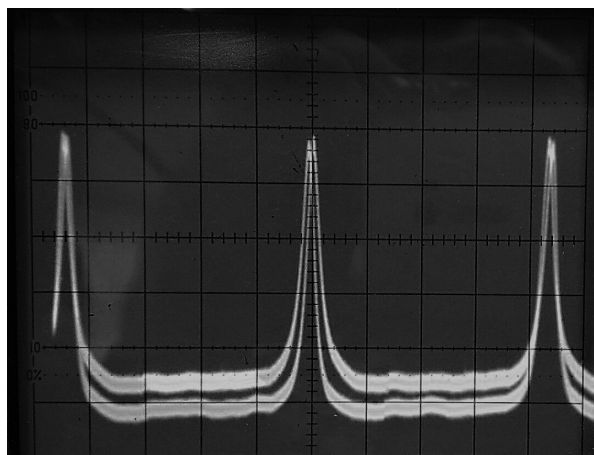


Рис. 2: Резонансное поглощение

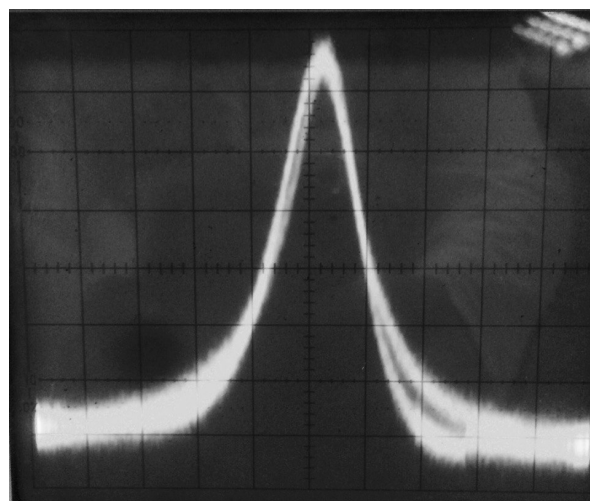


Рис. 3: Точно настроенный пик

Переменное поле модуляционных катушек наводит в пробной катушке ЭДС индукции, по которой можно определить величину поля. Зная параметры катушки $N = 46$, $d = 14.6 \pm 0.1$ мм и ЭДС $\varepsilon_i = 2,51 \cdot 10^{-3} \text{ В}$, определим величину модулирующего поля:

$$B_{\text{мод}} = \sqrt{2} \frac{2\varepsilon_i}{\pi^2 d^2 N \nu} = \sqrt{2} \frac{2 \cdot 2.51 \cdot 10^{-3} \text{ В}}{\pi^2 \cdot 14.6^2 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 46 \cdot 50 \text{ Гц}} = 1.47 \cdot 10^{-3} \text{ Тл} = 1.47 \text{ мТл}$$

Рассчитаем погрешность измерения $B_{\text{мод}}$.

$$\varepsilon_{B_{\text{мод}}} = \varepsilon_d = 0,7\% \rightarrow B_{\text{мод}} = (1,47 \pm 0,01) \text{ мТл}$$

Тогда для полуширины на полувьсоте линии резонансного поглощения (в единицах поля) получим

$$\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн}}} B_{\text{мод}} = \frac{1}{10.4} \cdot 1.47 \text{ мТл} = 0.14 \text{ мТл} \quad (6)$$

Определяем g-фактор. Для этого подаем в основные катушки переменный ток, а ЭДС индукции измеряем при помощи пробной катушки. Строим калибровочный график:

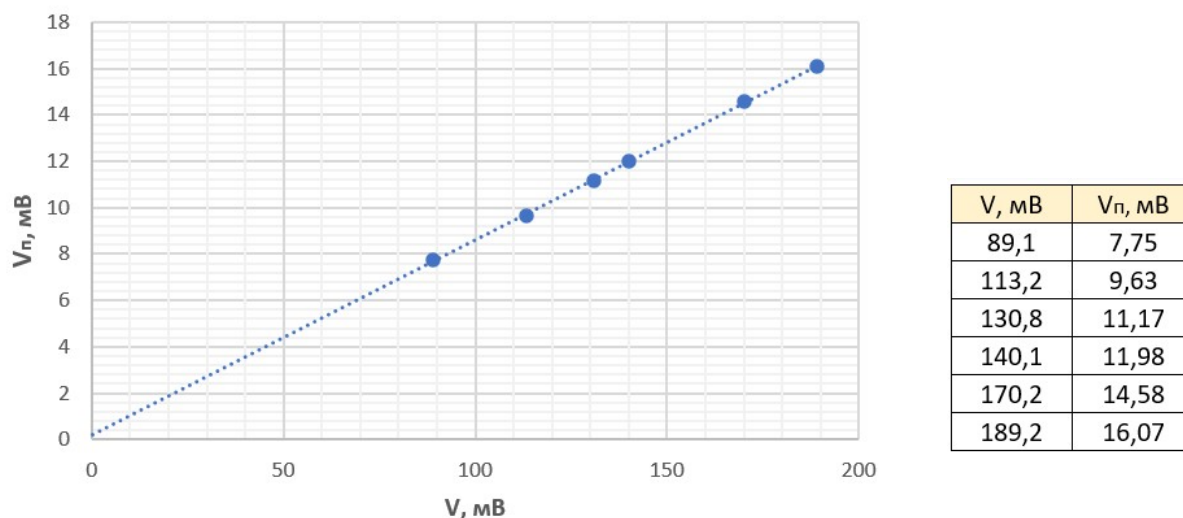


Рис. 4: Зависимость ЭДС индукции в пробной катушке от падения напряжения в цепи основных катушек

Найдём зависимость ЭДС индукции в пробной катушке от падения напряжения на резисторе в цепи основных катушек.

Определим по графику тангенс угла наклона:

$$\operatorname{tg} \alpha = k = 0,086.$$

При $V = 122,84 \text{ мВ}$ получаем $V_{\Pi} = 10,56 \text{ мВ}$.

Определим погрешность измерений V_{Π} .

Погрешность измерений V_{Π} есть случайная погрешность, она же средняя квадратичная. Вычисляем её по формуле

$$\langle \sigma(V_{\Pi}) \rangle = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_{\Pi_i} - \langle V_{\Pi} \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 5} \sum_{i=1}^6 (V_{\Pi_i} - 10,56)^2} = 0,04.$$

		V _п при V=122,84 (мВ)	<V _п >	<σ(V _п)>	ε _{V_п}
tgα ₁ =	0,087	10,68	10,51	0,04	0,3
tgα ₂ =	0,085	10,45			
tgα ₃ =	0,085	10,49			
tgα ₄ =	0,086	10,50			
tgα ₅ =	0,086	10,52			
tgα ₆ =	0,085	10,43			

Рис. 5: Расчёт погрешности

Теперь можем записать: $V_{\Pi} = (10,56 \pm 0,04) \text{ мВ}$, $\varepsilon = 0,3\%$.
Рассчитаем величину магнитного поля B_0 .

$$B_0 = \frac{2V_{\Pi}}{N\pi^2 d^2 \nu} = \frac{2 \cdot 10,56 \cdot 10^{-3}}{46 \cdot 3,14^2 \cdot 14,6^2 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 4,37 \text{ мВ}$$

Рассчитаем погрешность измерений B_0 .

$$\varepsilon_d = \frac{0,1}{14,6} \cdot 100\% = 0,7\%, \quad \varepsilon_{V_{\Pi}} = 0,3\% \quad \rightarrow \quad \varepsilon_{B_0} = \sqrt{2\varepsilon_d^2 + \varepsilon_{V_{\Pi}}^2} = 1\%.$$

Итого получаем $B_0 = (4,37 \pm 0,04) \text{ мВ}$.

Рассчитаем g -фактор.

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B_0} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 125,76 \cdot 10^6}{9,27 \cdot 10^{-24} \cdot 4,37 \cdot 10^{-3}} = 2,06$$

Рассчитаем погрешность вычисления g -фактора:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{B_0} = 1\% \quad \rightarrow \quad g = 2,06 \pm 0,02$$

4 Вывод

Рассчитали g -фактор, а также проверили достоверность полученных результатов в определении g -фактора и ширины линии ЭПР в кристаллическом ДФПГ.