

Лабораторная работа №5.10.1
Электронный парамагнитный резонанс

Рожков А. В.

16 сентября 2025 г.

Цель работы: исследовать электронный парамагнитный резонанс в молекуле ДФПГ, определяется g -фактор электрона, измерить ширину линии ЭПР.

1 Теоретическое введение

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

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

Здесь μ – абсолютная величина проекции магнитного момента на направление поля.

Между этими двумя уровнями возможны переходы. Эти переходы могут возбуждаться внешним высокочастотным электромагнитным полем, если оно имеет нужную частоту и нужное направление.

Резонансное значение частоты определяется из очевидной формулы:

$$\hbar\omega_0 = \Delta E. \quad (2)$$

При переходе с нижнего на верхний уровень энергии электрон поглощает квант электромагнитной энергии, а при обратном переходе такой же квант излучается. Возбуждение электронных резонансных переходов электромагнитным полем, имеющим частоту, определяемую формулой (2), носит название *электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)*.

Как известно, связь между магнитным моментом электрона и его механическим моментом \mathbf{M} выражается через гиромагнитное отношение γ с помощью формулы

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

Используя соотношения (1)-(3), нетрудно получить выражение для g -фактора через определяемые экспериментально величины:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B}. \quad (\star)$$

Уширение линии поглощения происходит в основном за счёт спин-спинового взаимодействия (взаимодействие между магнитным моментом рассматриваемого электрона и магнитными моментами других электронов) и спин-решеточного взаимодействия (взаимодействие электрона с атомами и молекулами вещества). Спин-решеточное взаимодействие быстро возрастает с температурой (числом фононов), спин-спиновое взаимодействие от температуры практически не зависит.

2 Экспериментальная установка

Образец (порошок ДФПГ) в стеклянной ампуле помещается внутрь катушки индуктивности входящей в состав колебательного контура. Входящий в состав контура конденсатор состоит из двух пластин, разделенных воздушным зазором, одна из пластин может перемещаться поворотом штока. Колебания в контуре возбуждаются антенной, соединённой с генератором частоты (ВЧ) Г4-116. Амплитуда колебаний поля в катушке индуктивности измеряется по наводимой в петле связи ЭДС индукции. Высокочастотные колебания ЭДС индукции в приёмном контуре детектируются диодом, измеряемая при помощи осциллографа низкочастотная огибающая этого сигнала пропорциональна квадрату амплитуды колебаний поля в катушке.

Постоянное магнитное поле создаётся пропусканием тока от источника постоянного тока через основные катушки. При этом при помощи вольтметра измеряется падение напряжения на резисторе в цепи основных катушек. Переменное поле небольшой амплитуды создаётся подачей на модуляционные катушки напряжения с регулируемого трансформатора ЛАТР. Для измерения амплитуды колебаний переменного поля используется пробная катушка известной геометрии, подключенная к вольтметру.

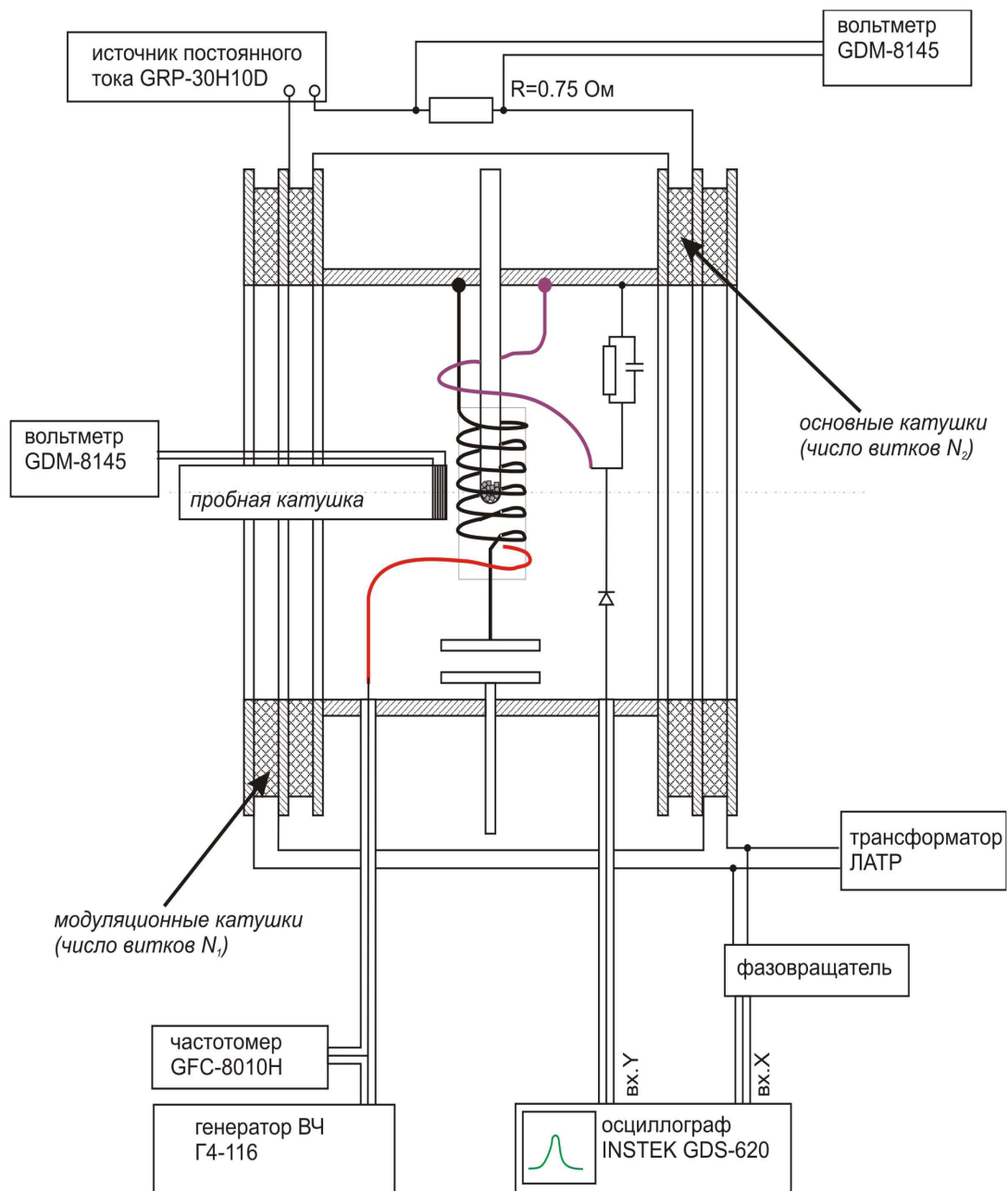


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

3 Ход работы

Настроим ВЧ генератор на частоту колебательного контура. В режиме непрерывной генерации ВЧ генератор выдаёт переменный (частота ~ 100 МГц) сигнал постоянной амплитуды, который после детектирования превращается в постоянное напряжение. Наблюдение постоянного напряжения на экране осциллографа неудобно, поэтому для удобства настройки сигнал дополнительно амплитудно модулируется на низкой (~ 1 кГц) частоте.

Детектирование усредняет высокочастотный сигнал, а его огибающая превращается в низкочастотный переменный сигнал, легко визуализуемый на осциллографе.

$$f_{\text{рез}} = (162.1 \pm 0.1) \text{ МГц}$$

Подключим основные катушки к источнику постоянного тока, а модуляционные катушки к трансформатору ЛАТР. Подадим на модуляционные катушки напряжение ~ 50 В (по вольтметру на ЛАТР).

Увеличивая постоянное напряжение, подаваемое на основные катушки, добьёмся возникновения на экране осциллографа картины резонансного поглощения.

Подадим на X-канал осциллографа напряжение, прикладываемое к модуляционным катушкам и будем наблюдать сигнал в XY-режиме.

При точной настройке постоянного поля наблюдаемая картина должна быть симметрична относительно средней вертикальной оси.

Совмещаем пики с помощью фазовращателя и подстроим немного частоту, добиваясь возникновения симметричного сигнала максимальной амплитуды.

Запишем напряжение на резисторе в цепи основных катушек и подстроенную частоту:

$$U_0 = (179 \pm 1) \text{ мВ}$$

$$f_0 = (162.1 \pm 0.1) \text{ МГц}$$

Для определения поля резонансного поглощения необходимо найти связь между падением напряжения на резисторе в цепи основной катушки и магнитным полем. Это можно сделать, если подать в основные катушки переменный ток и измерить при помощи пробной катушки ЭДС индукции. Подключим основные катушки на ЛАТР.

$U_r, \text{ мВ}$	$\epsilon_{\text{спереди}}, \text{ мВ}$	$\epsilon_{\text{сзади}}, \text{ мВ}$
10.1	0.09	0.07
29.8	2.59	2.05
70.0	5.88	4.78
120.3	10.13	8.27
160.5	13.42	10.91
180.1	15.03	12.28
199.2	16.61	13.53

Таблица 1: Результаты измерений при помощи пробной катушки

Построим график зависимости ЭДС индукции в пробных катушках от напряжения на резисторе в цепи основных катушек.

ЭДС индукции в пробной катушке от падения напряжения на резисторе

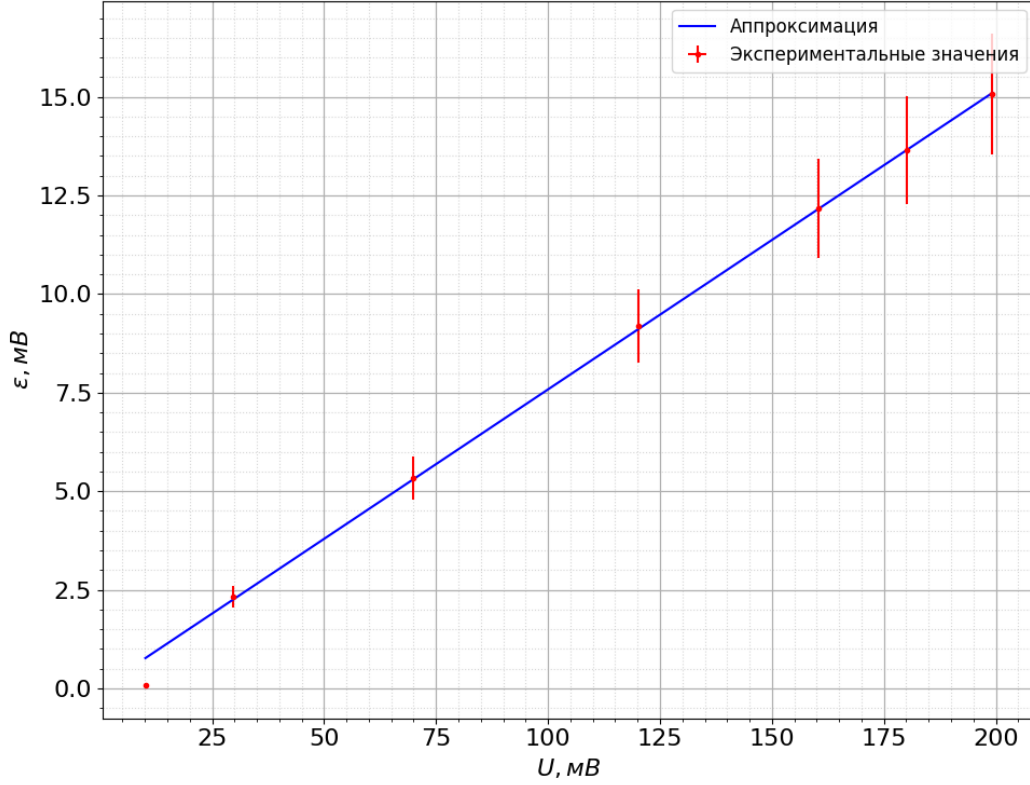


Рис. 2: График зависимости ЭДС индукции в пробной катушке от напряжения на резисторе в цепи основных катушек

Проведём прямую по МНК. Коэффициент наклона прямой равен $k = (0.0758 \pm 0.0008)$.

Для определения ширины линии ЭПР определим по экрану осциллографа полный размах модулирующего поля (в делениях шкалы) $A_{\text{полн}}$ и полную ширину кривой резонансного поглощения на полувысоте $A_{1/2}$.

$$A_{\text{полн}} = 6.8 \pm 0.2, \quad A_{1/2} = 0.5 \pm 0.2$$

При этом определим ЭДС индукции, создающееся в центре катушки:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = (4.4 \pm 0.1) \text{ мВ}$$

Параметры пробной катушки: $N = 44$, $d = (14.5 \pm 0.1)$ мм, частота модулирующего напряжения $\nu = (50 \pm 5)$ Гц.

$$B_{\text{мод}} = \sqrt{2} \frac{2\varepsilon_{\text{инд}}}{\pi^2 d^2 N \nu} = (1.8 \pm 0.2) \text{ мТл}$$

Полуширина на полувысоте линии резонансного поглощения может быть тогда получена как

$$\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн}}} B_{\text{мод}} = (0.13 \pm 0.06) \text{ мТл}$$

Посчитаем индукцию постоянного магнитного поля

$$B_0 = \frac{2\varepsilon_{\text{инд}}(U_0)}{\pi^2 d^2 N \nu} = (5.6 \pm 0.6) \text{ мТл}$$

где $\varepsilon_{\text{инд}}(U_0) = (13.6 \pm 0.6) \text{ мВ}$

Формула для g -фактора имеет следующий вид:

$$g = \frac{hf_0}{\mu_B B_0} = 2.1 \pm 0.2$$

4 Заключение

В данной работе был исследован ЭПР в молекуле ДФПГ, определяется g -фактор электрона $g = 2.1 \pm 0.2$, а также измерена ширина линий ЭПР $\Delta B = (0.13 \pm 0.06)$ мТл.