

## Работа 10.1

### Электронный парамагнитный резонанс

Селюгин Михаил, 876

## 1 Теория вопроса

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

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

Резонансное значение частоты:

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

При переходе с нижнего на верхний уровень квант энергии поглощается, а при обратном переходе излучается квант той же частоты. Возбуждение электронных резонансных переходов электромагнитным полем с частотой  $\omega_0$  носит название «электронного парамагнитного резонанса»

Сигнал ЭПР наблюдается на неспаренных электронах. В работе используется образец свободного радикала ДФПГ.

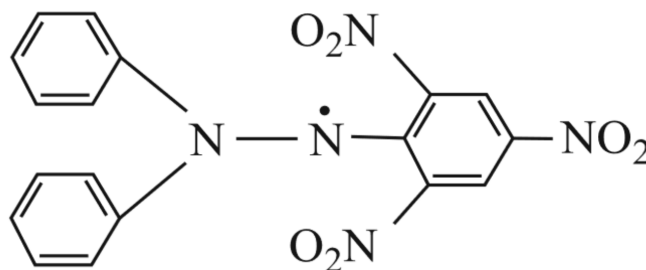


Рис. 1: Дифенилпикрилгидразил

Рассмотрим основные процессы, влияющие на ширину линии ЭПР. В отсутствие высокочастотного поля заселенность верхнего и нижнего уровней  $N_u$  и  $N_d$  определяется температурой и описывается формулой Больцмана.

$$\frac{N_u}{N_d} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (3)$$

В присутствии резонансного поля между уровнями возникают индуцированные переходы, ведущие к тому, что заселенность верхнего уровня растет, а нижнего падает. Восстановление теплового равновесия происходит двумя способами: спин-спиновой и спин-решеточной релаксацией. Отличить их друг от друга можно по температурной зависимости: спин-решеточное взаимодействие быстро возрастает с температурой (числом фононов), спин-спиновое от температуры практически не зависит.

Согласно соотношению неопределенностей:

$$\Delta E \tau \simeq \hbar \Delta \omega \tau \simeq 1 \quad (4)$$

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

$$\mu = \gamma \mathbf{M} \quad (5)$$

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

$$\frac{\mu}{\mu_B} = \frac{g \mathbf{M}}{\hbar} \quad (6)$$

Эта формула справедлива и для проекций. Можно выразить  $g$ -фактор

через определяемые экспериментально величины:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B} \quad (7)$$

Эксперимент выполняется с помощью спектроскопа.

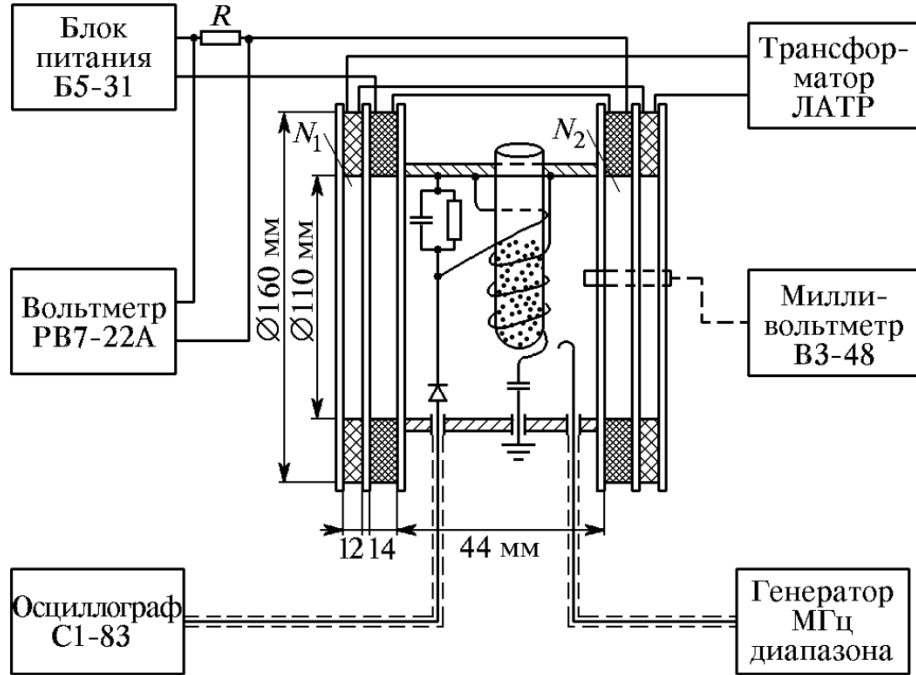


Рис. 2: Блок-схема установки для наблюдения ЭПР в молекуле ДФПГ

Параметры установки:  $N_1 = 5850$ ,  $N_2 = 1260$

## 2 Результаты измерений

### I. Измерение $g$ -фактора электрона.

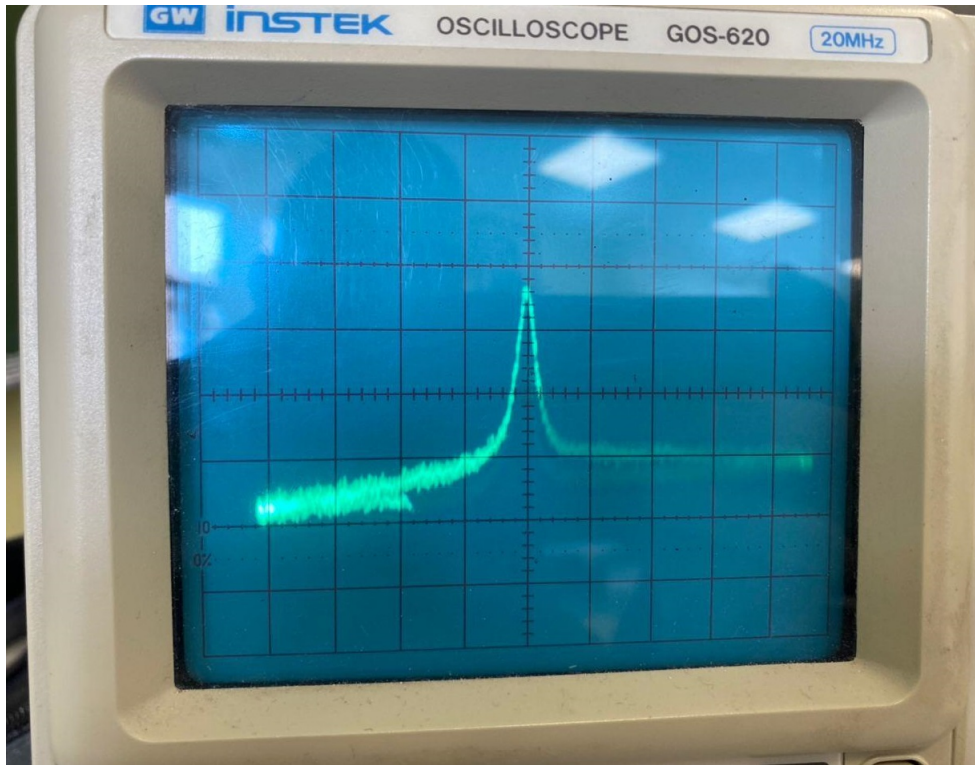
- Значение резонансной частоты измерено по лимбу генератора:  $\omega_0 = 167.7$  МГц.
- Параметры катушки, создающей постоянное магнитное поле:  $N_1 = 5850$ ,  $N_2 = 1260$ .
- Параметры пробной катушки:  $d = 14.9 \pm 0.1$  мм,  $n = N = 44$  витка.
- Угловая частота переменного тока:  $\omega = 2$  кГц.
- Значение постоянного тока в катушке:  $U = 184.3$  мВ.
- Показания лампового милливольтметра:  $V = 15.6$  мВ.

### II. Определение ширины линии ЭПР.

- Амплитуда модулирующего поля:  $A_{\text{полн.}} = 9$  дел.
- Ширина кривой резонансного поглощения на полувысоте:  $A_{1/2} = 0.8$  дел.
- ЭДС индукции в пробной катушке:  $\mathcal{E}_i = 11.2$  мВ.

На осциллографе наблюдается кривая резонансного поглощения :

Рис. 3: Наблюдаемая с помощью осциллографа линия резонансного поглощения в кристалле ДФПГ



### 3 Обработка результатов

I. Оценим  $g$  фактор электрона. Для этого с помощью пробной катушки определим индукцию магнитного поля пиз формулы:

$$V = nB_0 S \omega = \frac{\pi}{4} n B_0 d^2 \omega \implies B_0 = \frac{4V}{\pi n d^2 \omega}. \quad (8)$$

Получим результат:

$$B_0 \approx 1.02 \text{ мТл.}$$

Рассчитаем погрешность:

$$\varepsilon_d \approx 0.6\%, \quad \varepsilon_V \approx 0.5\% \implies \varepsilon_{B_0} = \sqrt{2\varepsilon_d^2 + \varepsilon_V^2} = 1.0\%.$$

Таким образом:

$$B_0 = 1.02 \pm 0.01 \text{ мТл } (\varepsilon \approx 1\%).$$

Вычислим  $g$ -фактор:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B}$$

$$g \approx 1.87.$$

Рассчитаем погрешность:

$$\varepsilon_{B_0} = 1.0\%, \quad \varepsilon_{\omega_0} \approx 0.6\% \Rightarrow \varepsilon_g = \sqrt{\varepsilon_{\omega_0}^2 + \varepsilon_{B_0}^2} \approx 1.2\%.$$

Значит:

$$g = 1.87 \pm 0.02.$$

II. Оценим ширину линии ЭПР.

Определим амплитуду моделирующего поля по формуле:

$$B_{\text{мод.}} = \sqrt{2} \frac{2\mathcal{E}_i}{\pi^2 d^2 n \nu}, \quad (9)$$

где  $\nu = 400$  Гц – частота модулирующего напряжения.

Тогда:

$$B_{\text{мод.}} \approx 0.82 \text{ мТл.}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_d = 0.7\%, \quad \varepsilon_{\mathcal{E}_i} = 0.9\% \Rightarrow \varepsilon_{B_{\text{мод.}}} = \sqrt{2\varepsilon_d + \varepsilon_{\mathcal{E}_i}} \approx 1.3\%.$$

Значит

$$B_{\text{мод.}} = 0.82 \pm 0.01 \text{ мТл } (\varepsilon = 1,3\%).$$

Далее определим полуширину линии ЭПР

$$\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн.}}} B_{\text{мод.}}. \quad (10)$$

Значит полуширина на полувысоте линии резонансного поглощения равняется :

$$\Delta B \approx 0.071 \text{ мТл } = 0.71 \text{ Гс.}$$

Расчет погрешности:  $\varepsilon_{B_{\text{мод.}}} = 1,3\%$ ,  $\varepsilon_{A_{\text{полн.}}} = \frac{0.05}{9} \approx 0.5\%$ ,  $\varepsilon_{A_{1/2}} = \frac{0.05}{0.8} \approx 6.3\%$ . Тогда

$$\varepsilon_{\Delta B} = \sqrt{\varepsilon_{A_{\text{полн.}}}^2 + \varepsilon_{A_{1/2}}^2 + \varepsilon_{B_{\text{мод.}}}^2} \approx 6.5\%.$$

Получаем результат:

$$\Delta B = 0.71 \pm 0.05 \text{ Гс } (\varepsilon = 6.5\%).$$

## 4 Вывод

В ходе эксперимента было исследовано явление ЭПР на молекуле ДФПГ и получены значения  $g$  фактора и полуширины линии ЭПР. При этом результаты оказались близки к табличным. Так, для  $g$  фактора  $g_{\text{изм}} = 1.87 \pm 0.02$ ,  $g_{\text{табл}} = 2$ . А для полуширины линии  $\Delta B_{\text{изм}} = 0.71 \pm 0.05 \text{ Гс}$ ,  $\Delta B_{\text{табл}} \approx 1$ .