

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ № 10.1

## Электронный парамагнитный резонанс

Выполнила студентка Б01-907

Юлия Прохорова

## Содержание

<b>1. Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2. Оборудование</b>	<b>2</b>
<b>3. Теория</b>	<b>2</b>
<b>4. Экспериментальная установка</b>	<b>3</b>
<b>5. Ход работы</b>	<b>4</b>
5.1. Получение сигнала ЭПР на свободном радикале ДФПГ и измерение $g$ -фактора электрона. . . .	4
5.2. Определение ширины линии ЭПР . . . . .	5
<b>6. Вывод</b>	<b>5</b>
<b>7. Литература</b>	<b>5</b>

## 1. Цель работы

Исследуется электронный парамагнитный резонанс в молекуле ДФПГ, определяется  $g$ -фактор электрона, измеряется ширина линии ЭПР.

## 2. Оборудование

Блок питания, вольтметр, трансформатор ЛАТР, милливольтметр, осциллограф, генератор МГц диапазона.

## 3. Теория

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

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

Здесь  $\mu$  - абсолютная величина проекции магнитного момента на направление поля. Между уровнями возможны переходы - в случае, если внешнее электромагнитное поле имеет нужную частоту и направление.

Резонансное значение частоты:

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

возбуждение электронных резонансных переходов электромагнитным полем, имеющим частоту 2, называется электронно парамагнитного резонанса (ЭПР). ЭПР возникает из-за переворота спина электронов под действием под действием высокочастотного электромагнитного поля. Сигнал электронного парамагнитного резонанса наблюдается лишь на неспаренных электронных образцах.

В свободных атомах электрические поля, действующие на атомные электроны, - центральные, и момент количества движения электрона  $J$  сохраняются. Здесь орбитальное квантовое число  $L$  является квантовым, сохраняется и оказывается практически точным  $J$ .

Рассмотрим структурную формулу ЭПР свободного радикала ДФПГ (дифенилприкрилгидразил):

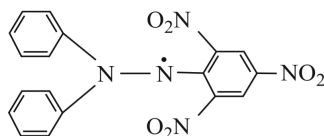


Рис. 1: Структурная формула молекулы ДФПГ

Неспаренные электроны радикалов приводят к их повышенной химической активности.

В отсутствие высокочастотного поля заселенность уровней определяется температурой и описывается формулой Больцмана:

$$\frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{н}}} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_{\text{Б}} T}\right) \quad (3)$$

В присутствии поля - соотношение 3 нарушается. Восстановление теплового равновесия осуществляется благодаря передаче энергии возбуждения другим степеням свободы тела (благодаря спин-спиновому и спин-решеточному взаимодействиям).

Оба типа взаимодействия способствуют релаксации - переходу из возбужденного состояния в основное. Ширина уровня связана со временем релаксации соотношением неопределенностей:

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{\tau}, \quad \Delta\omega \approx \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

В работе требуется получить сигнал ЭПР на кристаллах ДФПГ и определить значение  $g$ -фактора для электрона.

Связь магнитного  $\mu$  и механического  $M$  моментов:

$$\mu = \gamma M \quad (5)$$

$$\frac{\mu}{\mu_{\text{Б}}} = \frac{gM}{\hbar} \quad (6)$$

Запишем 6 в проекциях на любое направление:

$$\frac{\mu}{\mu_{\text{Б}}} = \frac{gs\hbar}{\hbar}, \quad (7)$$

где  $s = 1/2$  - спин электрона. Используя соотношение 2 выразим  $g$ -фактор:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B} \quad (8)$$

Тк у ДФПГ практически отсутствует орбитальный магнетизм - ЭПР на неспаренных электронах происходит почти как на свободных частицах.

#### 4. Экспериментальная установка

Для наблюдения ЭПР необходимы чувствительные радиоспектр. Охлаждая ДФПГ, можно исследовать зависимость ширины линии поглощения от температуры и установить характер уширения: спин-спиновый или спин-решеточный. Для наблюдения ЭПР нужно поместить исследуемое вещество в магнитное поле и измерить поглощение электромагнитного излучения. Заметный эффект получается получить, применяя устройства, сосредотачивающие энергию электромагнитного поля в объеме образца, например, колебательный контур, в катушку которого помещено исследуемое вещество. Наблюдение ЭПР состоит в сравнении добротности катушки в условиях резонанса и при расстройке, когда условие резонанса не выполняется. Удобнее менять магнитное поле, так как при этом в измерительной цепи не происходит никаких изменений и меняются только потери, связанные с ЭПР.

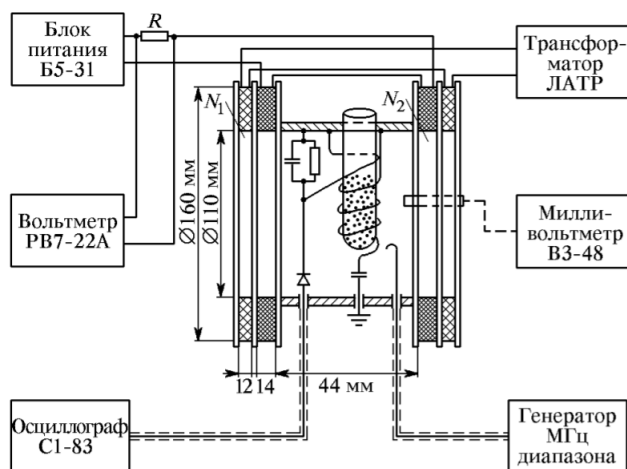


Рис. 2: Блок-схема установки для наблюдения ЭПР. Измерение постоянного и переменного токов через катушки  $N_2$  производится с помощью вольтметра РВ7 – 22А и сопротивления  $R = 10\text{Ом}$ , включенного в цепь катушек.

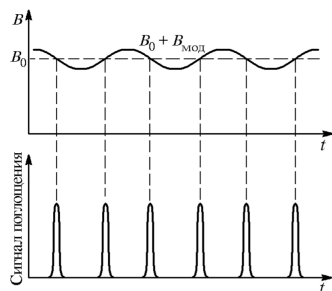


Рис. 3: Сигналы поглощения электронного парамагнитного резонанса при переменной развертке луча осциллографа, когда основное магнитное поле точно подобрано.

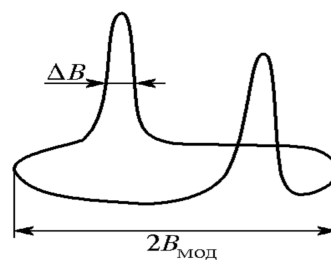


Рис. 4: Сигналы поглощения ЭПР при развертке луча осциллографа напряжением модулирующих катушек.

Контур заключен в латунный посеребренный изнутри контейнер. Ампула с исследуемым образцом вставляется в катушку индуктивности контура. Основное магнитное поле в образце создается с помощью двух соосно расположенных катушек, питаемых от источника постоянного тока. Небольшое модулированное поле создается при помощи дополнительных катушек. При наступлении ЭПР поглощение энергии в образце увеличивается, добротность колебательного контура падает, и амплитуда колебаний в контуре уменьшается.

Если основное поле  $B$  подобрано точно, то на экране осциллографа с временной разверткой сигналы электронного парамагнитного резонанса располагаются через равные промежутки.

Удобно наблюдать сигнал электронного парамагнитного резонанса, подавая горизонтальную развертку усилителя сигнал с модулирующих катушек. Наличие двух сигналов объясняется сдвигом фаз между напряжением и током модулирующих катушек.

## 5. Ход работы

### 5.1. Получение сигнала ЭПР на свободном радикале ДФПГ и измерение $g$ -фактора электрона.

- 1) Настроим генератор на резонансную частоту контура  $\nu_{\text{рез}} = (128,5 \pm 0,4) \text{ МГц}$ . При точной настройке генератора на частоту контура амплитуда колебаний на экране осциллографа - наибольшая.
- 2) Включим питание основных катушек от источника постоянного тока и питание модулирующих катушек. Установим а модулирующей катушке напряжение около 50В.
- 3) Включим временную развертку осциллографа.
- 4) Плавню меняя реостатом величину тока, проходящего через основные катушки, найдём сигнал ЭПР. Отрегулировали величину тока так, чтобы расстояние между пиками резонанса на экране осциллографа было одинаковым.

$V_R$ , мВ	$V_{\text{пр}}$ , мВ
24,65	$4,56 \pm 0,15$
30,85	$5,63 \pm 0,16$
37,18	$6,78 \pm 0,19$
43,35	$7,84 \pm 0,21$
49,61	$9,01 \pm 0,27$
55,50	$10,07 \pm 0,25$
61,60	$11,20 \pm 0,28$
68,10	$12,21 \pm 0,28$
74,28	$13,48 \pm 0,31$

Таблица 1:  $V_{\text{пр}}(V_R)$

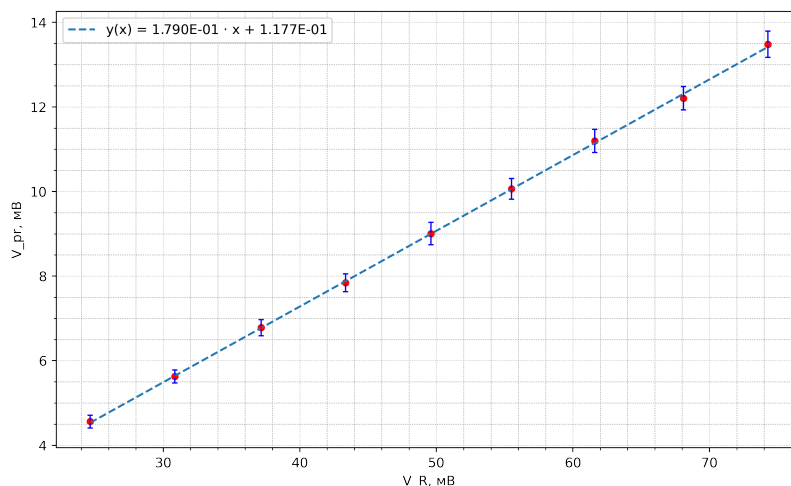


Рис. 5: Колебровка

- 5) Из графика получаем  $V_{pr} = (11,1 \pm 0,1) \text{ мВ}$
- 6) Посчитаем индукцию основного магнитного поля :

$$B_0 = \frac{V_{\text{пр}}}{N_{\text{пр}} S_{\text{пр}} \omega_0}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{пр}} = 46$ ,  $S_{\text{пр}} = \pi d^2$ ,  $d = 14,6 \pm 0,1$  мм.

$$B_0 = (4,5 \pm 0,1) \text{ мТл}, \quad (10)$$

где

$$\sigma_{B_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial B_0}{\partial V_{\text{пр}}}\right)^2 \sigma_{V_{\text{пр}}}^2 + \left(\frac{\partial B_0}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2} \quad (11)$$

- 7) Для измерения  $g$ -фактора электрона, нашли резонансные значения частоты  $\omega_0$  и индукции  $B_0$ . Определим  $g$  по формуле:

$$g = \frac{h\nu_0}{\mu_B B_0} = 2.00 \pm 0.09, \quad (12)$$

где

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \nu_0}\right)^2 \sigma_{\nu_0}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial B_0}\right)^2 \sigma_{B_0}^2} \quad (13)$$

- 8) Полученный значение  $g$  – фактора электрона отлично сходится с теоретическим в пределах погрешности -  $g = 2.004$ .

## 5.2. Определение ширины линии ЭПР

- 1) Переключим осциллограф на развертку от модуляционных катушек. Длина развертки соответствует удвоенной амплитуде модулирующего поля  $2L = (7,5 \pm 0,25)$  дел.
- 2) На полувысоте  $\Delta L = (1,5 \pm 0,3)$  дел. Значение  $V_{\text{пр}} = (1,13 \pm 0,02)$  мВ.
- 3) Рассчитаем  $B_{\text{мод}}$  по формуле:

$$B_{\text{мод}} = \frac{\sqrt{2} V_{\text{пр}}}{S N \omega_0} = (0,165 \pm 0.004) \text{ мТл}, \quad (14)$$

где

$$\sigma_{B_{\text{мод}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial B_{\text{мод}}}{\partial V_{\text{пр}}}\right)^2 \sigma_{V_{\text{пр}}}^2 + \left(\frac{\partial B_{\text{мод}}}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2} \quad (15)$$

- 4) Полуширину на полувысоте линии резонансного поглощения рассчитаем по формуле:

$$\Delta B = \frac{2B_{\text{мод}} \Delta L}{L} = (0.066 \pm 0.013) \text{ мТл} \quad (16)$$

где

$$\sigma_{\Delta B} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta B}{\partial \Delta L}\right)^2 \sigma_{\Delta L}^2 + \left(\frac{\partial \Delta B}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial \Delta B}{\partial B_{\text{мод}}}\right)^2 \sigma_{B_{\text{мод}}}^2} \quad (17)$$

## 6. Вывод

В ходе работы исследовали ЭПР в молекуле ДФПГ, определили  $g$ -фактор электрона  $g = 2.00 \pm 0.09$  и измерили ширину линии ЭПР  $\Delta B = 0.165 \pm 0.004$  мТл.

## 7. Литература

Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М. - Лабораторный практикум по общей физике: Учеб. пособие для вузов. Т. 3 Квантовая физика.