

Лабораторная работа 10.1

Электронный парамагнитный резонанс

Дещеня Владимир, группа Б02-825

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

Теоретическая справка

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

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

Между этими двумя уровнями возможны переходы. Эти переходы могут возбуждаться внешним высокочастотным электромагнитным полем, если оно имеет нужную частоту. Резонансное значение частоты определяется из формулы

$$h\nu_0 = \Delta E = 2\mu B \quad (2)$$

Поворот спина могут осуществлять только неспаренные электроны образца, поэтому ЭПР является важным методом исследования парамагнетиков. В данной работе исследуется свободный радикал ДФПГ, имеющий неспаренные электроны.

В присутствии резонансного поля между уровнями возникают индуцированные переходы, ведущие к тому, что заселенность верхнего уровня растет, а нижнего — падает. Восстановление теплового равновесия в заселенностях уровней осуществляется благодаря передаче энергии возбуждения другим степеням свободы тела. Ширина уровня связана со временем релаксации соотношением неопределенности

$$\Delta E \simeq \frac{h}{\tau} \rightarrow \Delta\nu \simeq \frac{1}{\tau} \quad (3)$$

Связь между магнитным моментом электрона и его механическим моментом M выражается через гиромагнитное отношение

$$\mu = \gamma M$$

Для проекций M и μ на любое выбранное направление тогда справедливо

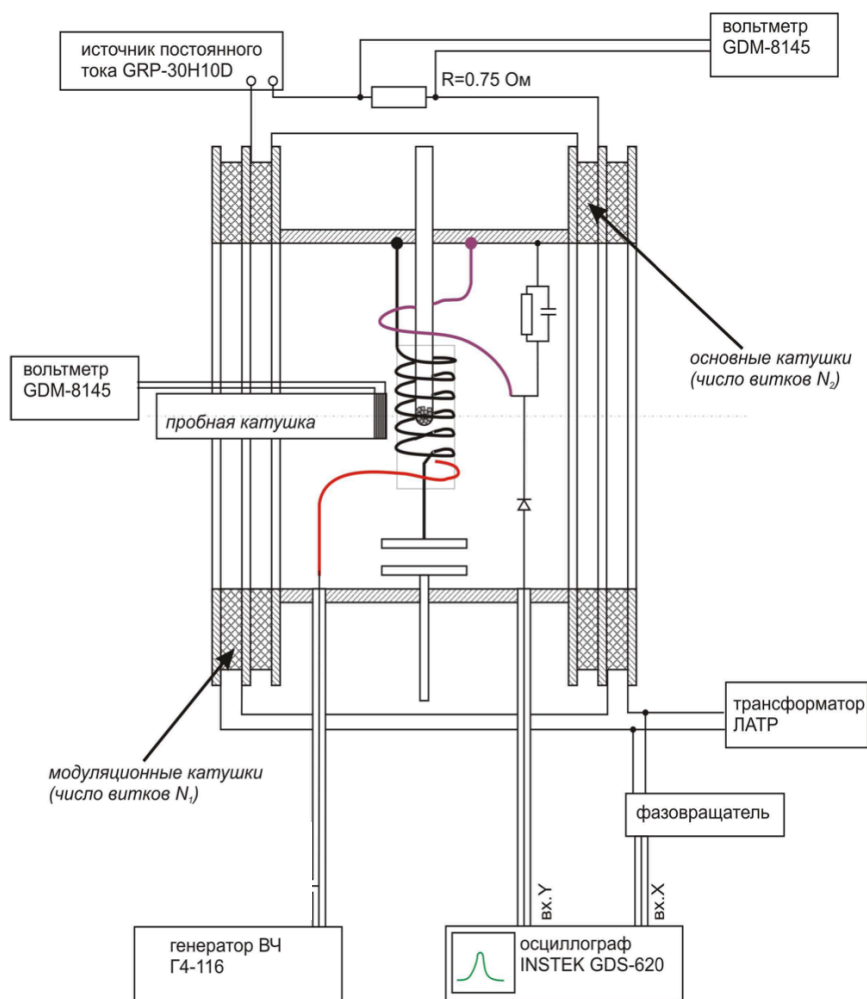
$$\frac{\mu}{\mu_B} = \frac{gs\hbar}{\hbar}$$

где $s = 1/2$ - спин электрона, μ_B - магнетон Бора.

Тогда g-фактор выражается как $g = \frac{h\nu}{\mu_B B}$. (4)

Чисто спиновый характер магнетизма в ДФПГ (у него практически отсутствует орбитальный магнетизм) приводит к тому, что парамагнитный резонанс на неспаренных электронах происходит почти как на свободных частицах.

Экспериментальная установка



Для наблюдения электронного парамагнитного резонанса нужно поместить исследуемое вещество в магнитное поле и измерить поглощение электромагнитного излучения, частота которого удовлетворяет соотношению (2). Применяются устройства, сосредоточивающие энергию электромагнитного поля в объеме образца, например, колебательный контур, в катушку которого помещено исследуемое вещество. Наблюдение электронного парамагнитного резонанса состоит в сравнении добротности катушки в условиях резонанса и при расстройке, когда условие резонанса не выполняется. В нашей установке для наблюдения ЭПР применяется модуляция магнитного поля.

Основной частью радиоспектроскопа является колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и плоского конденсатора. Основное магнитное поле в образце создается с помощью двух соосно расположенных катушек, модулирующее поле создается с помощью дополнительных катушек. Общая ось основных и дополнительных катушек перпендикулярна оси катушки индуктивности контура. Электромагнитные колебания в контуре возбуждаются генератором радиочастотного диапазона. Сигнал с контура наблюдается на осциллографе.

Ход работы

1. Настройка резонансного поля

Резонансная частота $\nu_0 = 126 \pm 0.1$ МГц.

Частоты, при которых амплитуда понижается в 2 раза:

$$\nu_{+1/2} = 126.4 \pm 0.1 \text{ МГц}, \quad \nu_{-1/2} = 125.6 \pm 0.1 \text{ МГц}$$

Погрешность частоты определяется из паспорта генератора ВЧ Г4-116[1]: 0.1% при измерении дольше 15ти минут.

Добротность определяется как $Q = \frac{\nu_0}{\nu_{+1/2} - \nu_{-1/2}} = 94 \pm 21$, а ее погрешность рассчитана

по формуле
$$\sigma_Q = Q \sqrt{\frac{\sigma_{\nu_0}^2}{\nu_0^2} + \frac{\sigma_{\nu_{+1/2}}^2 + \sigma_{\nu_{-1/2}}^2}{(\nu_{+1/2} - \nu_{-1/2})^2}}$$

Напряжение на вольтметре, измеряющего падение напряжения на резисторе в цепи основных катушек $V_R = 63.62 \pm 0.23$ мВ.

Погрешность измерения напряжения определена из паспорта вольтметра GDM-8145[2]: 0.3% + 4ед младшего разряда

2. Определение амплитуды модуляции магнитного поля и ширины линии ЭПР.

$A = (6.4 \pm 0.3)$ дел - размах резонансного пика в X – Y развертке

$A_{1/2} = (1.8 \pm 0.3)$ дел - ширина на полувысоте

Погрешность рассчитывается как $\sigma_A = \sqrt{2}\sigma_x$, где $\sigma_x = 0.2$ дел - погрешность определения точки на экране осциллографа.

Поднесем пробную катушку к образцу и определим ЭДС индукции ε , возникающую в ней. Параметры пробной катушки: $D = 14.6 \pm 0.1$ мм, $N_k = 46$ витков. Погрешности из [2].

ε_i , мВ	0,936	0,935	0,929	0,943	0,929	0,941
σ_{ε_i} , мВ	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007

Тогда $\varepsilon = 0.935 \pm 0.008$ мВ, где погрешность посчитана как корень суммы квадратов систематической и случайной погрешностей ($N = 6$ - количество точек)

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_{\text{сл}}^2 + \sigma_{\text{сист}}^2}, \quad \sigma_{\text{сл}} = \frac{1}{\sqrt{N(N-1)}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \varepsilon)^2}, \quad \sigma_{\text{сист}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{\varepsilon_i}^2}$$

Тогда амплитуда модулирующего поля $B_{\text{mod}} = \frac{2\sqrt{2}\varepsilon}{\pi^2 D^2 N_k \nu} = 0.547 \pm 0.016$ мТл, где $\nu = 50$ Гц -

частота модулирующего напряжения, а погрешность $\sigma_{B_{\text{mod}}} = B_{\text{mod}} \sqrt{4 \frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\varepsilon^2} + \frac{\sigma_\nu^2}{\nu^2}}$

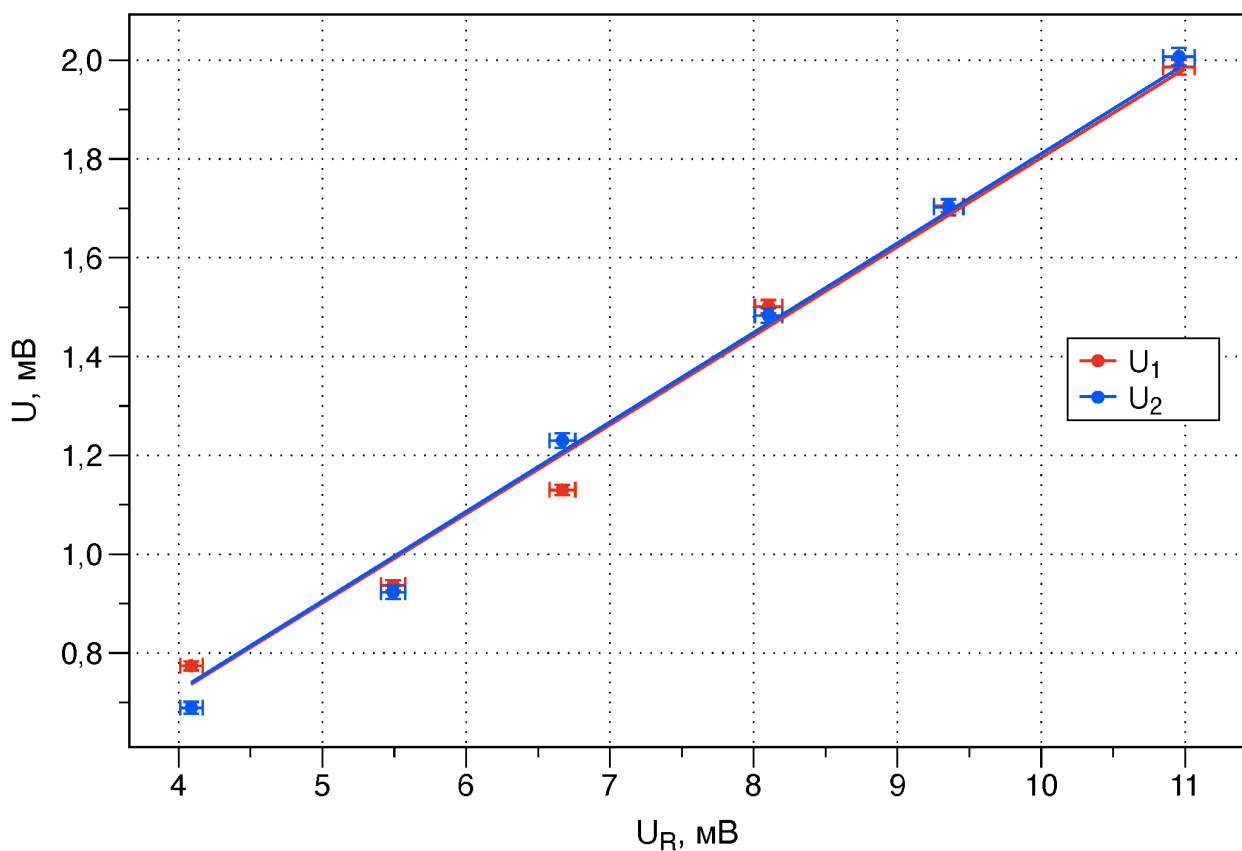
Полуширина линии ЭПР: $\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A} B_{\text{mod}} = 0.15 \pm 0.03$ мТл, где погрешность

$$\sigma_{\Delta B} = \Delta B \sqrt{\frac{\sigma_{B_{\text{mod}}}^2}{B_{\text{mod}}^2} + \frac{\sigma_{A_{1/2}}^2}{A_{1/2}^2} + \frac{\sigma_A^2}{A^2}}$$

3. Калибровка поля ЭМ

Найдем коэффициент пропорциональности k между падением напряжения на резисторе U_R и величиной ЭДС на пробной катушке U . Для контроля однородности поля будем делать измерения при вносе катушки спереди (U_1) и сзади (U_2) установки. Погрешности взяты из паспорта прибора[2].

U_R , мВ	4,09	5,49	6,67	8,10	9,36	10,96
σ_{U_R} , мВ	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
U_1 , мВ	0,774	0,937	1,131	1,501	1,705	1,986
σ_{U_1} , мВ	0,006	0,007	0,007	0,009	0,009	0,010
U_2 , мВ	0,689	0,923	1,230	1,483	1,702	2,007
σ_{U_2} , мВ	0,008	0,009	0,010	0,010	0,011	0,012



Калибровочные прямые для пробной катушки

Используем МНК такой, что зависимость $U = k \cdot U_R$ проходит через ноль (так как

$$U|_{U_R=0} = 0): k_i = \frac{\langle U_i U_R \rangle}{\langle U_R^2 \rangle}, \quad \sigma_{k_i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle U_i^2 \rangle}{\langle U_R^2 \rangle} - k^2}$$

Здесь $N = 6$ - число точек. Коэффициенты наклона получившихся калибровочных прямых:

$$k_1 = 0.180 \pm 0.002$$

$$k_2 = 0.181 \pm 0.002$$

Тогда $k = 0.180 \pm 0.002$

Индукция основного магнитного поля $B_0 = \frac{4kV_R}{\pi\omega D^2 N_k} = 4.65 \pm 0.08$ мТл, где $\omega = 2\pi\nu$

погрешность $\sigma_{B_0} = B_0 \sqrt{\frac{\sigma_k^2}{k^2} + \frac{\sigma_{V_R}^2}{V_R^2} + 4 \frac{\sigma_D^2}{D^2}}$

Тогда g-фактор электрона $g = \frac{h\nu_0}{\mu_B B_0} = 1.95 \pm 0.06$, где $\sigma_g = g \sqrt{\frac{\sigma_{\nu_0}^2}{\nu_0^2} + \frac{\sigma_{B_0}^2}{B_0^2}}$

Вывод

В ходе лабораторной работы было исследовано явление электронного парамагнитного резонанса. Резонанс был обнаружен на частоте $\nu_0 = 126 \pm 0.1$ МГц при значении индукции магнитного поля $B_0 = 4.65 \pm 0.08$ мТл. Рассчитанное значение спина электрона $g = 1.95 \pm 0.06$ хорошо соотносится с теоретическим $g_{th} = 2.0036$ [3].

Ссылки

[1] <http://www.spectr-sks.ru/product/25086>

[2] <http://printsip.ru/radioizmeritelnye-pribory/voltmetry/voltmetry-universalnye-v7/item/gdm-8145>

[3] https://mipt.ru/upload/medialibrary/1f0/esr_description2016-2-opisanie.pdf