

5.10.1 Электронный парамагнитный резонанс.

Тимофей Черников
Группа Б05-902

В работе: исследуется электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) в молекуле дифенилпикрилгидразила (ДФПГ), определяется g -фактор электрона, измеряется ширина линий ЭПР.

Теория

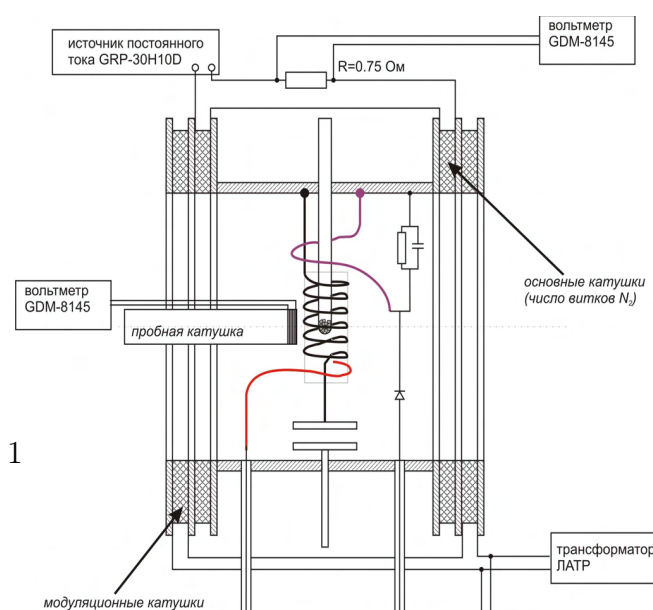
С помощью метода ЭПР изучается резонансное поглощение электромагнитного поля поля в образце в зависимости от условий, задаваемых экспериментатором: постоянного магнитного поля, частоты колебаний переменного поля, температуры и других. Простейшей моделью для рассмотрения ЭПР является система из невзаимодействующих частиц со спином $S = 1/2$, помещённая во внешнее магнитное поле. В отсутствие магнитного поля энергии состояний с проекцией спина $S_Z = \pm 1/2$ совпадают. Из-за эффекта Зеемана происходит расщепление линий атомных спектров и энергии состояний с различными проекциями спина начинают различаться. Если направить на нашу систему поток излучения с энергией, равной разнице энергий этих состояний

$$h\nu = g\mu_B B, \quad (1)$$

то станут возможны индуцированные переходы между состояниями. Эти переходы происходят с поглощением или испусканием фотона в зависимости от того, в каком из состояний была система до взаимодействия с излучением. В состоянии теплового равновесия нижний энергетический уровень более заселён, поэтому наблюдается поглощение электромагнитного излучения.

Описание установки

Схема установки представлена на Рис. 1. Образец (порошок ДФПГ) в стеклянной ампуле помещается внутрь катушки индуктивности, входящей в состав колебательного контура. Входящий в состав контура конденсатор состоит из двух пластин, разделённых воздушным зазором, одна из пластин может перемещаться поворотом штока. Колебания в контуре возбуждаются антенной, соединённой с генератором высокой частоты (ВЧ) Г4-116. Амплитуда коле-



баний 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 пропуском 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, подключённая к вольтметру. Пусть поток через неё $\Phi_{\text{проб}}$, тогда ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_{\text{проб}}}{dt}.$$

Если $I_{\text{осн}}$ – ток через основную катушку, а M – взаимная индуктивность основной и пробной катушек, то

$$\Phi_{\text{проб}} = MI_{\text{осн}}.$$

Тогда амплитудное значение ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_{\text{амп}} = -\frac{dMI_{\text{осн}}}{dt} = M\omega I_{\text{амп}}.$$

Учитывая, что $I_{\text{амп}} = \sqrt{2}I_{\text{действ}} = \frac{V_r}{R}$, где V_r , R – напряжение на резисторе с сопротивлением R в цепи основных катушек, а также $\mathcal{E}_{\text{амп}} = \sqrt{2}\mathcal{E}_{\text{ср}}$, получим

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = M\omega \frac{V_R}{R} = kV_R.$$

Тогда, зная, что

$$\Phi_{\text{проб}} = B_0 N_{\text{проб}} \frac{\pi d_{\text{проб}}^2}{4} = \frac{MU_R}{R} = \frac{kU}{\omega},$$

где U – напряжение на R в резонансе, получим

$$B_0 = \frac{4kU}{\pi\omega d_{\text{проб}}^2 N_{\text{проб}}}. \quad (2)$$

Характеристики катушек: пробная катушка $N_{\text{проб}} = 49$, $d_{\text{проб}} = 14.5 \pm 0.1$ мм, основная катушка $N_{\text{осн}} = 5500$, $d_{\text{осн}} = 0.25 \pm 0.01$ м, модулирующая катушка $N_{\text{мод}} = 1500$, $d_{\text{мод}} = 0.30 \pm 0.01$ м.

Ход работы

Настройка ВЧ генератора.

Настроим генератор на частоту колебательного контура $f_0 = 125.3 \pm 0.2$ МГц. Определим добротность

$$Q = \frac{f_0}{f_{+\frac{1}{2}} - f_{-\frac{1}{2}}}$$

Измерим $f_{+\frac{1}{2}} = 162.4 \pm 0.2$ МГц, $f_{-\frac{1}{2}} = 161.6 \pm 0.2$ МГц, тогда

$$Q = 140 \pm 20,$$

Наблюдение сигнала резонансного поглощения.

Подключим основные катушки к источнику постоянного тока, а модуляционные катушки к трансформатору ЛАТР. ВЧ-генератор переведём в режим непрерывной генерации, на канале осциллографа, подключённому к детектору, установим максимальную чувствительность. Подадим на модуляционные катушки напряжение ~ 50 В, и, плавно увеличивая постоянное напряжение на основных катушках, добьёмся возникновения на экране резонансного поглощения. Добьёмся того, чтобы наблюдаемые пики были на равном расстоянии друг от друга. Зафиксируем напряжение $U = 125.7 \pm 0.7$ мВ напряжение на резисторе R .

Точная настройка резонансного поля и определение ширины линии.

Для более точной настройки и определения ширины линии резонансного поглощения удобно подать на X-канал осциллографа напряжение, прикладываемое к модуляционным катушкам и наблюдать сигнал в XY-режиме. Фактически при этом на экране наблюдается зависимость поглощения в образце от приложенного переменного поля. Наблюдаемая картина симметрична относительно средней вертикальной оси. Из-за набегающей в электрической схеме расфазировки напряжений на экране наблюдаются два пика, соответствующие прохождению резонансного поглощения на растущем и падающем полупериодах модулирующего напряжения, поэтому пики совмещаем подстройкой фазовращателя.

Для определения ширины линии ЭПР определим по экрану осциллографа полный размах модулирующего поля $A_{\text{полн}}$ и полную ширину кривой резонансного поглощения на полувысоте $A_{1/2}$. Не изменяя настроек, возьмём пробную катушку и внесём её внутрь соленоида максимально близко к образцу. Переменное поле модуляционных катушек наводит в пробной катушке ЭДС индукции \mathcal{E} , по которой можно определить величину поля. ЭДС индукции: $\mathcal{E} = 0.90 \pm 0.04$ мВ (погрешность измерения вольтметра $0.03\% + 4$ единицы последнего знака). Размах и ширина кривой резонансного поглощения $A_{\text{полн}} = 5.0 \pm 0.2$ дел, $A_{1/2} = 1.2 \pm 0.2$ дел (погрешность – размер минимального деления осциллографа). Тогда амплитуда модулирующего поля

$$B_{\text{мод}} = \frac{2\sqrt{2}\mathcal{E}}{\pi^2 d_{\text{проб}}^2 N_{\text{проб}} \nu} = 0.50 \pm 0.02 \text{ мТл},$$

где $\nu = 50$ Гц – частота модулирующего напряжения. Полуширину на полувысоте линии резонансного поглощения посчитаем по формуле

$$\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн}}} B_{\text{мод}} = 0.12 \pm 0.01 \text{ мТл},$$

Определение g-фактора.

Найдём связь между падением напряжения на резисторе в цепи основной катушки и магнитным полем. Переключим основные катушки на ЛАТР, переведём вольтметр, измеряющий падение напряжения на резисторе V_R в цепи основных катушек, в режим измерений на переменном токе, установим ток через катушки, близкий к значению тока при наблюдении резонансного поглощения, измерим в этих условиях ЭДС индукции в пробных катушках $U_0 = 12.2 \pm 0.1 \text{ мВ}$.

Теперь мы можем посчитать индукцию основного магнитного поля по (2)

$$B_0 = \frac{4kU}{\pi\omega d_{\text{проб}}^2 N_{\text{проб}}} = 4.2 \pm 0.2 \text{ мТл},$$

Тогда g -фактор электрона будет по формуле (1) равен

$$g = \frac{hf_0}{\mu_B B_0} = 1.88 \pm 0.15,$$

Истинное значение g -фактора электрона $g = 2.0036$ (значение взято из [?]) лежит в пределах погрешности.

Расчёт погрешностей

Погрешности измерений:

$$\sigma_{U_0} = 0.1 \text{ мВ}, \sigma_{f_0} = 0.2 \text{ МГц}, \sigma_{d_{\text{проб}}} = 0.1 \text{ мм}$$

Рассчитываем погрешности для основного магнитного поля и потом, с помощью этой погрешности уже для g -фактора.

$$\sigma_{B_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial B_0}{\partial U_0}\right)^2 \sigma_{U_0}^2 + \left(\frac{\partial B_0}{\partial d_{\text{проб}}}\right)^2 \sigma_{d_{\text{проб}}}^2} = 0.2 \text{ мТл}$$

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial f_0}\right)^2 \sigma_{f_0}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial B_0}\right)^2 \sigma_{B_0}^2} = 0.15$$

Заключение

В данной работе был исследован ЭПР в молекуле ДФПГ, итоговый результат $g = 1.88 \pm 0.15$.