

Электронный парамагнитный резонанс

Илларионов Владислав
группа В04-855

ВВЕДЕНИЕ

В ходе данной работы исследуется электронный парамагнитный резонанс в молекуле ДФПГ, определяется g -фактор электрона и из анализа пика сигнала ЭПР на осциллографе измеряется ширина линии ЭПР.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

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

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2\mu B = \hbar\omega_0 \quad (1)$$

Здесь μ — абсолютная величина проекции магнитного момента на направление поля. ω_0 — резонансная частота внешнего электромагнитного поля.

Возбуждение электронных резонансных переходов электромагнитным полем, имеющим частоту, определяемую формулой (1), носит название электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). ЭПР возникает из-за переворота спина электронов под действием высокочастотного электромагнитного поля. Однако переворот спинов возможен только у неспаренных электронов, наличие которых как раз и приводит к парамагнетизму.

Структурная формула свободного радикала ДФПГ, который исследуется в данной работе, представлена на рисунке 1.

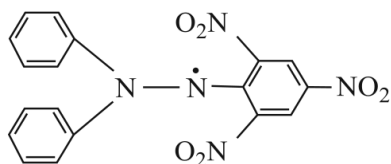


Рис. 1. Структурная формула молекулы ДФПГ

Связь между магнитным моментом μ электрона и его механическим моментом M выражается через гиромагнитное отношение γ с помощью формулы:

$$\mu = \gamma M \quad (2)$$

Если выражать магнитный момент в магнетонах Бора m_B , а механический в единицах \hbar , то:

$$\frac{\mu}{m_B} = \frac{gM}{\hbar} \quad (3)$$

g -фактор можно выразить через величины определяемые экспериментально:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{m_B B} \quad (4)$$

Чисто спиновый характер магнетизма в ДФПГ приводит к тому, что парамагнитный резонанс на неспаренных электронах происходит почти как на свободных частицах. Поэтому g -фактор, полученный из электронного парамагнитного резонанса в ДФПГ, всего на десятые доли процента отличается от g -фактора свободного электрона.

Рассмотрим основные процессы, влияющие на ширину линии ЭПР. В отсутствие высокочастотного поля заселенность верхнего и нижнего уровней описывается обычной формулой Больцмана. В присутствии резонансного поля между уровнями возникают индукционные переходы, ведущие к тому, что заселенность верхнего уровня растет, а нижнего — падает.

Восстановление теплового равновесия в заселенных уровнях осуществляется за счет передачи энергии возбуждения другим степеням свободы тела. Передача энергии в другие степени свободы осуществляется за счет спин-спинового и спин-решеточного взаимодействий.

Оба типа взаимодействия способствуют релаксации и, следовательно, укорачивают время, которое проводит электрон на верхнем уровне. Ширина уровня связана с временем релаксации соотношением неопределенностей:

$$\Delta E \simeq \frac{\hbar}{\tau} \Rightarrow \Delta\omega \simeq \tau^{-1} \quad (5)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

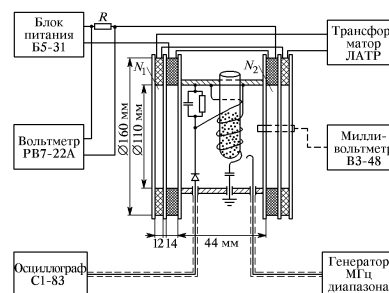


Рис. 2. Блок-схема установки

В данной работе используется радиоспектроскоп, работающий в диапазоне 100-200 МГц. Его действие

основно на уменьшении добротности контура при появлении резонансных парамагнитных потерь. Схема радиоспектроскопа изображена на рисунке 2. Основной частью радиоспектроскопа является колебательный контур. Он состоит из катушек индуктивности и плоского конденсатора. 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. Величина тока, протекающего через катушки, регулируется ручкой, расположенной на блоке питания, и измеряется с помощью вольтметра и омического сопротивления. Небольшое модулирующее поле создается при помощи дополнительных катушек. Они включены в сеть переменного тока через трансформатор.

Электромагнитные колебания в контуре возбуждаются генератором радиочастотного диапазона. Связь с генератором осуществляется с помощью петли. Через полупроводниковый диод контур подключен к вертикальному усилителю осциллографа. Колебательный контур соединен с генератором и осциллографом коаксиальным кабелем.

Параметры основных катушек установки:

$$\begin{aligned} N_1 &= 6700 & d_1 &= 0.25 \text{ м} \\ N_2 &= 5000 & d_2 &= 0.30 \text{ м} \end{aligned}$$

Параметры пробной катушки:

$$n = 45 \quad d = (15.2 \pm 1) \text{ мм}$$

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Ампула с исследуемым веществом помещается внутри катушки индуктивности радиоспектроскопа. Настроим генератор на резонансную частоту колебательного контура. Детектирование усредняет высокочастотный сигнал, а его огибающая превращается в низкочастотный переменный сигнал, легко визуализируемый на осциллографе. Для наблюдения сигнала переведем осциллограф в режим развёртки по времени. По изображению на осциллографе можно определить резонансное значение частоты (соответствуют максимуму амплитуды). Настроив генератор на резонансную частоту, переведем его на работу в режиме непрерывной генерации.

Плавное изменение реостатом величины тока, проходящего через основные катушки, найдем сигнал ЭПР. Если основное поле B подобрано точно, то на экране осциллографа сигналы ЭПР располагаются через равные промежутки (см. рис. 3).

g -фактор электрона определяем следующим образом.

Будем измерять переменное поле, поэтому заметим показания вольтметра, измеряющего постоянный ток в катушках, а затем переключим их на переменный

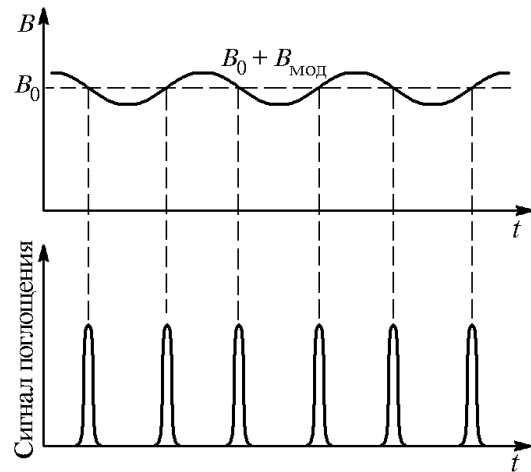


Рис. 3. Сигналы ЭПР на экране осциллографа, при точной настройке основного поля

ток, подобрав положения движков автотрансформатора так, чтобы показание вольтметра было равно замеченному ранее значению. Введем пробную катушку внутрь основных катушек поблизости от образца и снимем показания лампового милливольтметра V . Зная число витков n и площадь сечения S пробной катушки, определим величину магнитного поля из соотношения:

$$V = nB_0S\omega_{\sim} \quad (6)$$

Здесь $\omega_{\sim} = (2\pi \cdot 50 \text{ Гц})$ — угловая частота переменного тока.

Для определения ширины линии ЭПР переключим осциллограф с временной развертки на развертку от модуляционных катушек. Длина развертки будет соответствовать удвоенной амплитуде модулирующего поля (см. рис. 4). Амплитуду этого поля определим из соотношения (6) аналогичным способом.

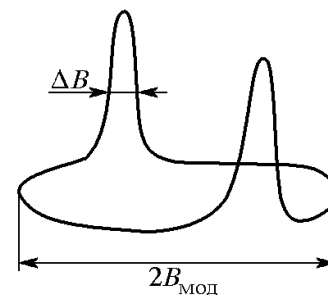


Рис. 4. Сигналы поглощения ЭПР при развертке луча осциллографа напряжением модулирующих катушек

Тогда ширину линии ЭПР можно получить из соотношения:

$$\Delta B = 2 \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн}}} B_{\text{мод}} \quad (7)$$

Здесь $A_{1/2}$ — количество делений полуширины на экране осциллографа, $A_{\text{полн}}$ — количество делений всей длины развертки.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

А. Измерение g -фактора электрона

Сперва настраиваем генератор на резонансную частоту. Её значение (по лимбу генератора):

$$f_0 = (164 \pm 2) \text{ МГц}$$

Изменяя магнитное поле в катушках так, чтобы достичь одинакового расстояния между пиками на осциллографе. Магнитное поле B_0 находим с помощью пробной катушки: запишем напряжение $V = 15.68 \text{ мВ}$ на катушках при постоянном поле, заменим его на переменное с таким же значением напряжения.

$$B_0 = \frac{V}{nS\omega_{\sim}} = (6.12 \pm 0.08) \text{ мТл}$$

Тогда g -фактор:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{m_B B_0} = 1.91 \pm 0.03$$

В. Определение ширины линии ЭПР

Переключим осциллограф на развертку модулирующих катушек. Аналогично предыдущему пункту определим действующее значение модулирующего поля:

$$B_{\text{мод}} = \frac{V}{nS\omega_{\sim}} = (0.79 \pm 0.01) \text{ мТл}$$

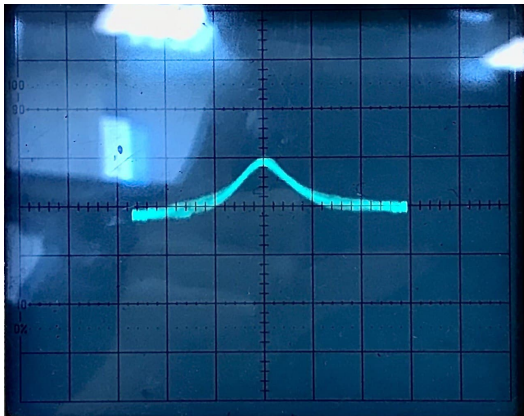


Рис. 5. Изображение на экране осциллографа при переключении на развертку модулирующих катушек

По осциллографу (см. рис. 5):

$$A_{1/2} = (0.8 \pm 0.1) \text{ дел}$$

$$A_{\text{полн}} = (5.6 \pm 0.1) \text{ дел}$$

Значит:

$$\Delta B = (0.226 \pm 0.036) \text{ мТл} = (2.26 \pm 0.36) \text{ Гс}$$

ВЫВОД

В ходе данной работы было исследовано явление электронного парамагнитного резонанса в молекуле дифенилпикрилгидразида (ДФПГ). По g -фактору этой молекулы была получена оценка g -фактора электрона:

$$g = 1.91 \pm 0.03,$$

которая близка к теоретическому значению.

Также была найдена ширина линии ЭПР по осциллографу:

$$\Delta B = (2.26 \pm 0.36) \text{ Гс}$$