

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 5.5.5
« γ -спектроскопия»

Шумаков Иван Игоревич
студент группы Б01-009
3 курс ФРКТ

г. Долгопрудный
2022 г.

Цель работы: Исследовать электронный парамагнитный резонанс в молекуле дифенилпикрилгидразила $C_{18}H_{12}N_5O_6$, определить g -фактор электрона.

1 Теоретические сведения

В квантовой теории проекция момента импульса M на заданную ось (обычно ее принимают за ось z) может принимать лишь дискретные значения

$$M_z = m\hbar \quad m = 0, \pm 1, \dots, \pm l \quad (1)$$

Поскольку операторы проекций момента импульса на оси не коммутируют, они не могут быть одновременно точно определены. Таким образом одновременно только проекция на одну ось и длина вектора момента импульса могут быть точно определены.

Квадрат момента импульса (а следовательно, и его модуль) квантуется в соответствии с формулой

$$M^2 = \hbar^2 l(l+1) \quad (2)$$

Число l , определяющее возможные значения квадрата момента и равное максимальному значению числа m , называется орбитальным квантовым числом.

В магнитном поле H_0 магнитный диполь μ_m обладает потенциальной энергией

$$E = -(\mu_m, H_0) \quad (3)$$

Следовательно, для «магнитной» частицы, характеризуемой квантовым числом J , в магнитном поле возникает $2J + 1$ энергетических уровней — зеемановских уровней.

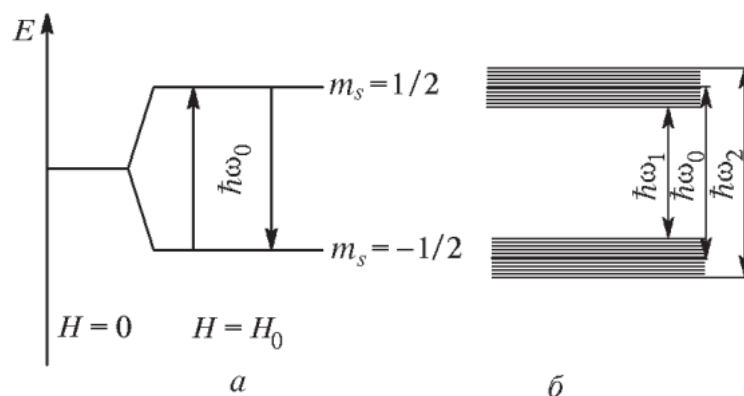


Рис. 1. Схема расщепления уровней

Простейшей моделью рассмотрения ЭПР является система из невзаимодействующих частиц со спином $S = 1/2$, помещенная во внешнее магнитное поле. В отсутствии поля проекции спинов на ось совпадают, как и энергии. При подаче магнитного поля и эффекта Зеемана энергии с различными направлениями спина начинают различаться. А если мы в систему направим поток фотонов с этой энергией разности этих энергий, то станут возможны индуцированные переходы между этими состояниями. Для наблюдения этого поглощения необходимо резонансное совпадение частоты излучения с зеемановским расщеплением спиновых подуровней. Измеряемой в эксперименте величиной является поглощаемая в образце мощность излучения. Для увеличения точности измерения желательно увеличить эту поглощаемую мощность. Поглощение переменного магнитного поля в образце описывается мнимой частью магнитной восприимчивости

$$P_{\text{полгл}} = \frac{1}{2} \omega b^2 \chi''(\omega, B) \quad (4)$$

где ω — частота переменного поля, b — амплитуда однородного по малому образцу переменного поля, B — постоянное магнитное поле, χ'' — мнимая часть высокочастотной магнитной восприимчивости. Магнитная восприимчивость связывает намагниченность \vec{m} с подмагничивающим магнитным полем \vec{b} : $\vec{m} = \chi \vec{b}$. Комплексное представление восприимчивости имеет смысл для описания отклика на переменное поле $\vec{b} = \vec{b}_0 \cdot e^{-i\omega t}$. Тогда $\vec{m} = \chi \vec{b} = (\chi' + i\chi'') \vec{b}_0 e^{-i\omega t} = \chi' \vec{b}_0 e^{-i\omega t} + \chi'' \vec{b}_0 e^{-i\omega t + \frac{\pi}{2}}$. Таким образом, действительная часть высокочастотной восприимчивости описывает вклад в намагниченность, находящийся в фазе с подмагничивающим полем, а мнимая часть — вклад, сдвинутый относительно подмагничивающего поля по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Естественно, при $\omega = 0$ мнимая часть восприимчивости $\chi'' = 0$. Сдвиг по фазе отклика (намагниченности) относительно вынуждающей силы (переменного поля) связан с потерями энергии, поэтому мнимая часть восприимчивости является мерой диссипации энергии в системе. Простейшей системой для изучения методом ЭПР является парамагнетик — система слабо взаимодействующих атомов, ионов или молекул, обладающих собственным магнитным моментом. Пренебрегая взаимодействием, можно рассмотреть поведение магнитного диполя в постоянном и переменном магнитном поле. В «классическом» подходе рассматривается прецессия магнитного момента во внешнем поле при отклонении магнитного момента от равновесия. Классический магнитный диполь стремится выровняться вдоль силовых линий магнитного поля, при отклонении от равновесия возникает возвращающий механический момент $\vec{T} = \vec{M} \times \vec{B}$. Так как магнитный и механический момент иона связаны друг с другом гиромагнитным отношением γ как $\vec{M} = \gamma \vec{I}$, где \vec{I}

- это полный момент импульса, то с учётом уравнения динамики $\frac{d\vec{I}}{dt} = \vec{T}$ получим уравнение прецессии магнитного момента $\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B}$. Аналогично с известной задачей о прецессии гироскопа можно заметить, что при отклонении магнитного момента от направления магнитного поля возникает незатухающая прецессия вокруг направления поля с угловой скоростью $\vec{\Omega} = -\gamma \vec{B}$, частота этой прецессии $\Omega_L = \gamma B$ называется ларморовской. При совпадении частоты переменного поля с ларморовской частотой возможно возникновение резонансного поглощения. Расщепление терма свободного иона (или молекулы) определяется спектроскопическим фактором Ланде (g -фактором Ланде): $E(m_J) = g\mu_B B m_J$.

$$g_{\text{эфф}} = \frac{h\nu}{\mu_B B} \quad (5)$$

2 Экспериментальная установка

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 частоты (ВЧ) Г4-116. Амплитуда колебаний 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 пропусканием 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, подключенная к вольтметру.

Катушка	N	D , см
Основная	6700	25 ± 1
Модуляционная	5000	30 ± 1
Пробная	45	1.52 ± 0.01

Таблица 1. Параметры катушек.

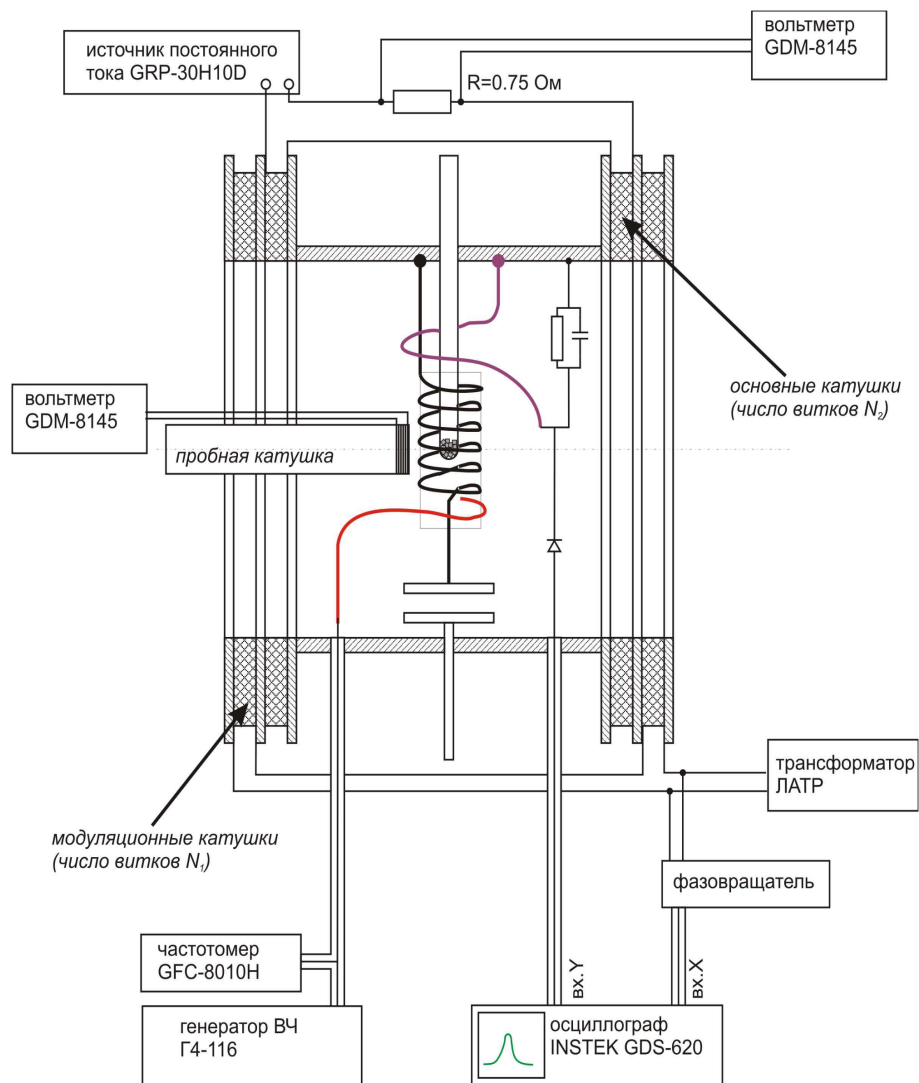


Рис. 2. Схема установки

3 Ход работы

В данной работе измерялось поглощение э-м поля на резонансной частоте. Первоначально генератор был настроен на частоту колебательного контура:

$$f_0 = (164 \pm 1) \quad (6)$$

Подберем величину постоянного магнитного поля в катушках так, чтобы наблюдался сигнал резонансного поглощения. Для этого подадим на катушки достаточное напряжение. При резонансе напряжение на резисторе в цепи основных катушек:

$$U_0 = (130 \pm 1) \text{ мВ.} \quad (7)$$

По осциллографу была определена ширина линии ЭПР. Погрешность ширины линии в основном обусловлена погрешностью измерений ампли-

туд по экрану осциллографа:

$$A_{\text{полн}} = 10 \pm 0.2 \text{ дел}, \quad A_{1/2} = 3 \pm 0.2 \text{ дел} \quad (8)$$

$$B_{\text{мод}} = \sqrt{2} \frac{2\varepsilon}{\pi^2 d^2 N \nu} = 0.75 \pm 0.05 \text{ мТл},$$

$$\Delta B = \frac{A_{1/2}}{A_{\text{полн}}} B_{\text{мод}} = 0.22 \pm 0.02 \text{ мТл}, \quad (9)$$

где $A_{\text{полн}}$ – полный размах модулирующего поля, $A_{1/2}$ – ширина кривой на полувывоте, $B_{\text{мод}}$ – амплитуда модулирующего поля, ε – ЭДС индукции при внесении пробной катушки, N – число витков катушки, d – диаметр катушки, ν – частота модулирующего напряжения (50 Гц).

Для определения связи падения напряжения на резисторе в цепи основных катушек и магнитным полем в центре магнита была использована пробная катушка. По полученным данным была построен график зависимости напряжения на катушке (V) от напряжения на сопротивлении (V_R): Значение коэффициента наклона

\	V_R мВ	V мВ
1	3.52	0.44
2	5.35	0.65
3	7.14	0.85
4	8.90	1.07
5	10.53	1.25

Зависимость напряжения на пробной катушке от напряжения в цепи

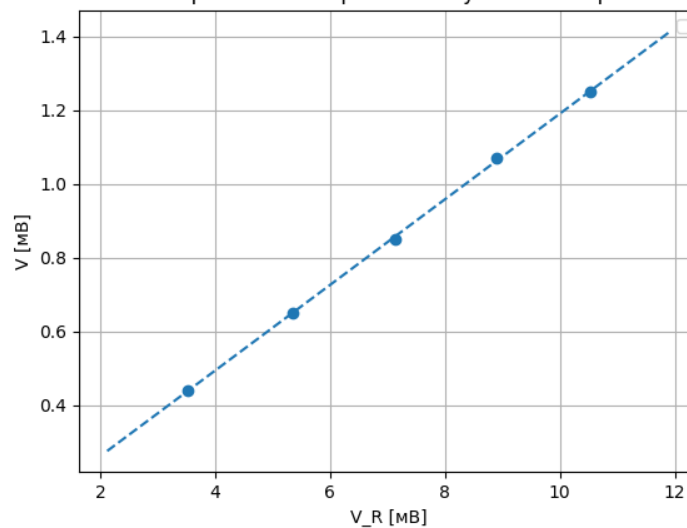


Рис. 3. Калибровочный график

$$k = (11.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-2}$$

Рассчитав поле, создаваемое основными катушками,

$$B_0 = \frac{4kU_0}{2\pi\nu N\pi d^2} = (6.1 \pm 0.1)\text{мТл}.$$

Найдем g -фактор электрона:

$$g = \frac{hf_0}{\mu_B B_0} = 1.9 \pm 0.1$$

Вывод

В данной работе был исследован ЭПР в молекуле ДФПГ, определяется g -фактор электрона **$g = 1.9 \pm 0.1$** , а также измерена ширина линий ЭПР $\Delta B = 0.22 \pm 0.2$ мТл. Измеренный g -фактор электрона совпадает с табличным значением для свободного электрона: **$g_{free} = 2,0$** . Это обусловлено тем, что ПР происходит на неспаренных электронах так же, как на свободных.