

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики
Квантовая физика

Электронный парамагнитный резонанс.

Таранов Александр
Группа Б01-206

Содержание

1	Теоретическое введение	1
1.1	Основы ЭПР	1
1.2	Релаксация	1
1.3	ДФПГ	2
2	Методика эксперимента	2
2.1	ЭПР	4

1. Теоретическое введение

1.1. Основы ЭПР

В присутствии внешнего магнитного поля энергетический уровень электрона расщепляется на два подуровня, разность энергий между которыми

$$\Delta E = 2\mu B,$$

где μ – проекция магнитного момента на направление поля.

Переходы между этими двумя уровнями могут возбуждаться внешним электромагнитным полем, если его вектор магнитной индукции перпендикулярен расщепляющему полю, а энергия его квантов равна разности ΔE :

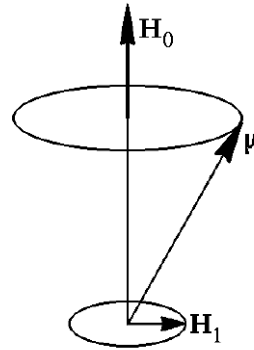


Рис. 1: Конфигурация полей и магнитного диполя.

$$\hbar\omega_0 = 2\mu B, \quad (1)$$

где ω_0 – резонансная частота. Это явление называется *электронным парамагнитным резонансом* (ЭПР).

В большинстве веществ электроны находятся в спаренном состоянии и "переворот" спина невозможен. ЭПР наблюдается только на неспаренных электронах, которые, как известно, определяют свойство парамагнетизма вещества.

Для электрона выполняется гиромагнитное соотношение:

$$\frac{\vec{\mu}}{\mu_B} = \frac{g\vec{M}}{\hbar} \Rightarrow \frac{\mu}{\mu_B} = \frac{gs\hbar}{\hbar}, \quad (2)$$

где \vec{M} – момент импульса, $s = 1/2$ – спин электрона, $\mu_B = \frac{e\hbar}{2cm_e}$ – магнетон Бора, g – g -фактор.

Тогда g -фактор выражается как:

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B}. \quad (3)$$

1.2. Релаксация

При перевороте всех спинов энергия должна прекратить поглощаться. Но этого не происходит, поскольку есть процессы безызлучательного рассеяния энергии: спин-решеточная и спин-спиновая релаксации.

В равновесном состоянии распределение электронов по уровням подчиняется распределению Больцмана:

$$\frac{N_B}{N_H} = e^{-\Delta E/k_B T}.$$

Под действием внешнего электромагнитного излучения это равновесие нарушается. За счет взаимодействия электронов с другими электронами (спин-спиновое) и решеткой вещества (спин-решеточное) они передают поглощенную энергию в кинематические степени свободы. Отметим, что термин "решетка" не ограничивает нас лишь твердым агрегатным состоянием. Любое взаимодействие спинов с термодинамически

равновесной системой является спин-решеточным взаимодействием. Поэтому термин применим и для жидкостей, газов.

Оценим время релаксации через соотношение неопределенностей:

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{\tau}. \quad (4)$$

1.3. ДФПГ

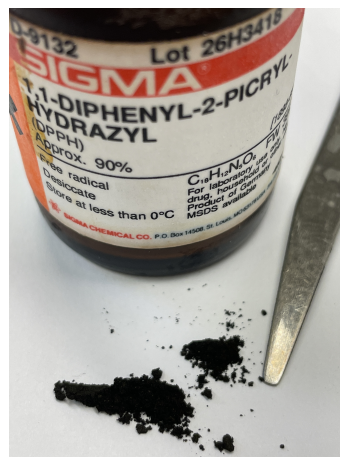
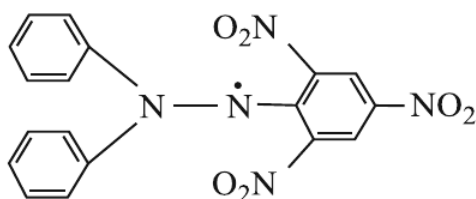


Рис. 2: Дифенилпикрилгидразил. Слева: структурная формула. Справа: образец ДФПГ.

ДФПГ представляет собой органическую молекулу с одним неспаренным электроном атома азота N . Чисто спиновый магнетизм ДФПГ (почти отсутствует орбитальный магнетизм) приводит к тому, что парамагнитный резонанс происходит почти как на свободных электронах, что дает оценку $g = 2.00$.

2. Методика эксперимента

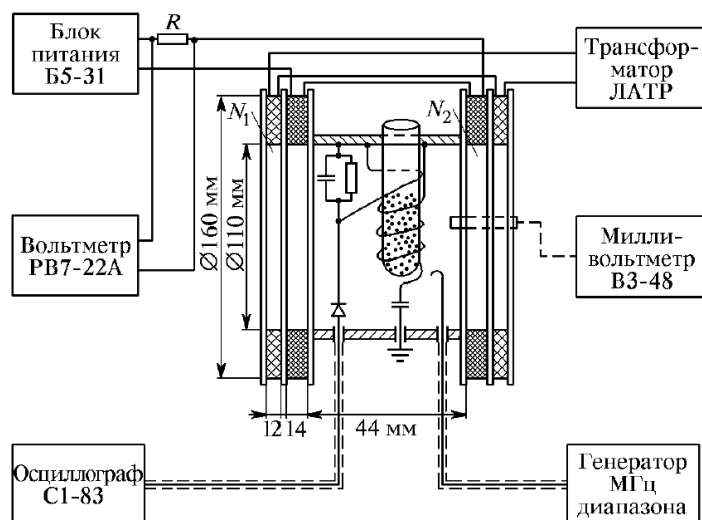


Рис. 3: Схема установки для изучения ЭПР.

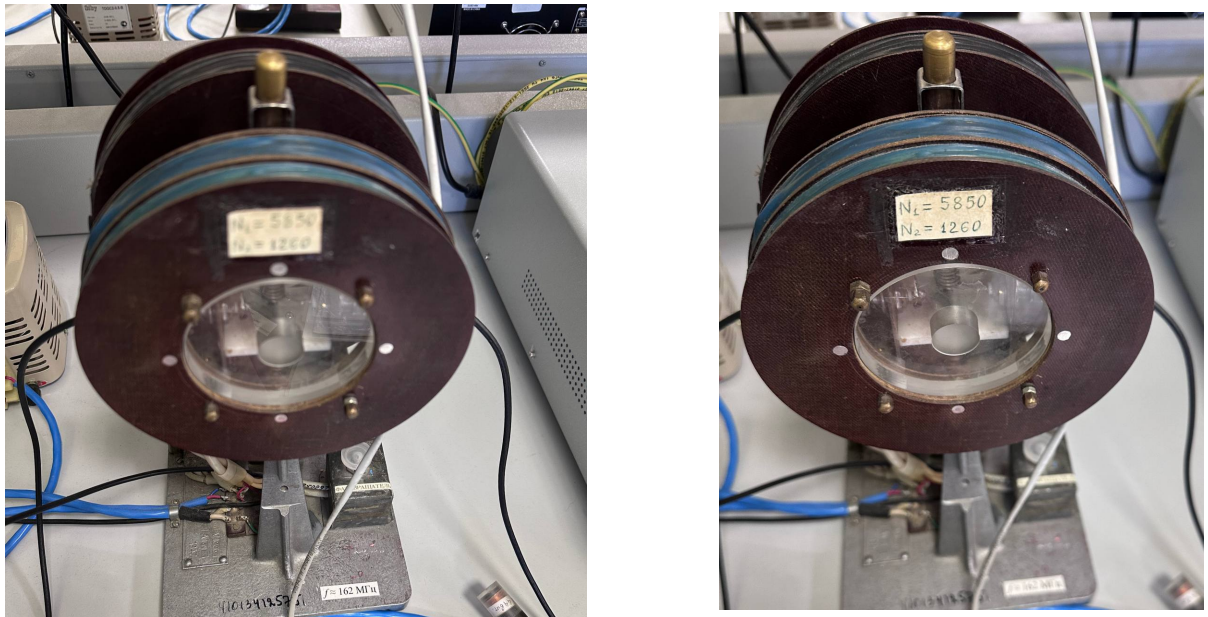


Рис. 4: Центральная часть установки.

Наблюдение ЭПР осуществляется измерением поглощения электромагнитного излучения, частота которого равна резонансной (1). Так как поглощение очень мало, необходимо сосредоточить энергию в объеме вещества. В нашей работе это достигается путем использования колебательного контура, в катушке которого расположена пробирка с веществом. Таким образом, при прохождении резонанса будет уменьшаться добротность катушки.

На рис. 3 приведена схема установки. Магнитное поле создается основными катушками, работающими от блока питания постоянного тока, и модулирующими катушками, работающими от ЛАТРа. Образец помещен в катушку колебательного контура радиоспектроскопа. Ось катушки перпендикулярна основному магнитному полю. Генератор МГц диапазона через петлю возбуждает колебания в контуре. Канал X осциллографа подключен к ЛАТРу, для получения развертки. Канал Y осциллографа через петлю связи измеряет колебания в контуре.

Частота генератора устанавливается в соответствии с (1). Емкость конденсатора колебательного контура настраивается изменением расстояния между пластинами. Таким образом частота колебательного контура уравнивается с частотой генератора. За счет модуляции основного поля два раза за период наблюдается точный резонанс, проявляющийся в увеличении сигнала на петле связи. Для удобства наблюдения измерения проводятся в режиме XY.

Наличие двух сигналов за период объясняется фазовым сдвигом между напряжением и током модулирующих катушек. Для совмещения сигналов используется фазовращатель.

Для градуировки шкалы осциллографа используем следующую технику: изменяем ток, текущий через основные катушки, пока пик ЭПР не сдвинется на две клетки вправо и влево, получая V , V_{left} , V_{right} .

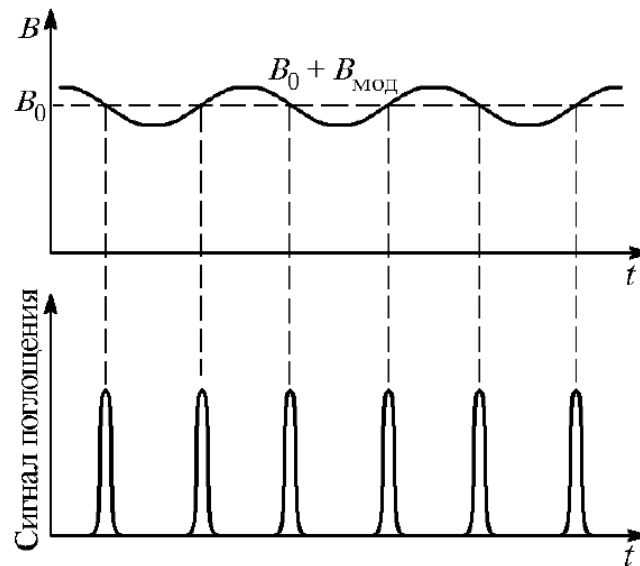
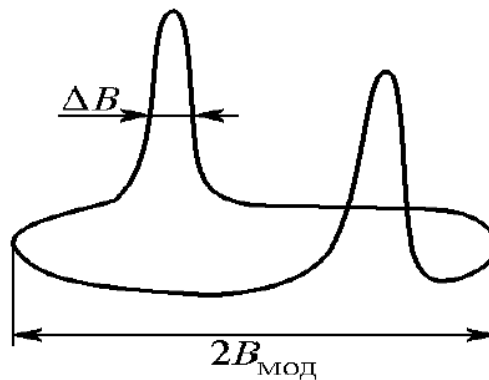


Рис. 5: Сверху: зависимость основного поля от времени.
Снизу: сигналы поглощения, снимаемые петлей связи.



Результаты

Калибровка катушек

Для получения значений основного поля проводится калибровка. Основные катушки подключаются к ЛАТРу для генерации переменного поля. Это поле снимается зондовой катушкой с известными параметрами: $N = 44$ витков, $d = (14.3 \pm 0.1)$ мм. Частота $f = 50$ Гц. Значения напряжений и поля являются действующими.

$$V_{probe} = NB_0 \frac{\pi d^2}{4} 2\pi f \quad \Rightarrow \quad B = \frac{V_{probe}}{N \frac{\pi d^2}{4} 2\pi f} = 5.8 \text{ мТл}$$

2.1. ЭПР

С помощью калибровки получим поля B и определим g фактор:

$$g = \frac{hf_0}{\mu_B B} = 2.001$$

Для ДФПГ g -фактор почти совпадает с g -фактором свободного электрона: $g_{ref} = 2.00$.

Время релаксации

Для оценки времени релаксации получим значения ширины резонансных кривых.

Воспользуемся значениями V_{left} , V_{right} и калибровкой для получения деления осциллографа в единицах измерения поля.

$$\Delta B = 1.74 \text{ Гс.}$$

Рассчитаем время релаксации (4):

$$\tau = \frac{\hbar}{2\mu\Delta B} = 32.7 \text{ нс.}$$

Справочное значение: $\tau_{ref} \sim 60$ нс, совпадает по порядку с полученным в работе.

Заключение и выводы

Работа подтверждает существование электронного парамагнитного резонанса.

Определено значение g -фактора для радикала ДФПГ: $g = 2.001$, близкое к $g_{ref} = 2.00$

По ширине резонансных кривых оценено время релаксации $\tau = 32.7$ нс, совпадающее по порядку величины со справочным $\tau \sim 60$ нс.