

# Работа 10.1

## Электронный парамагнитный резонанс

Подлесный Артём  
группа 827

11 декабря 2020 г.

### Краткая теория

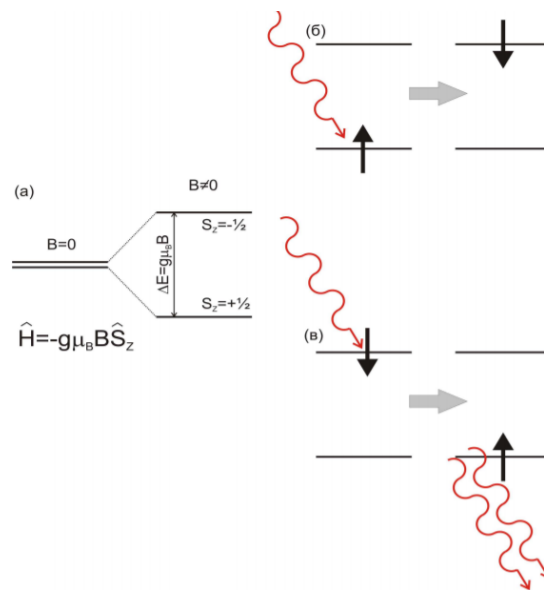


Рис. 1: Схема резонансного поглощения электромагнитного излучения для изолированного спина  $S = 1/2$ . (а) Зеемановское расщепление спиновых уровней в магнитном поле. (б) Переход между подуровнями снизу-вверх с поглощением фотона резонансной частоты  $h\nu = g\mu_B B$ . (в) Переход между подуровнями сверху-вниз с излучением дополнительного фотона резонансной частоты.

В состоянии теплового равновесия нижний энергетический уровень более заселён, поэтому наблюдается поглощение электромагнитного излучения.

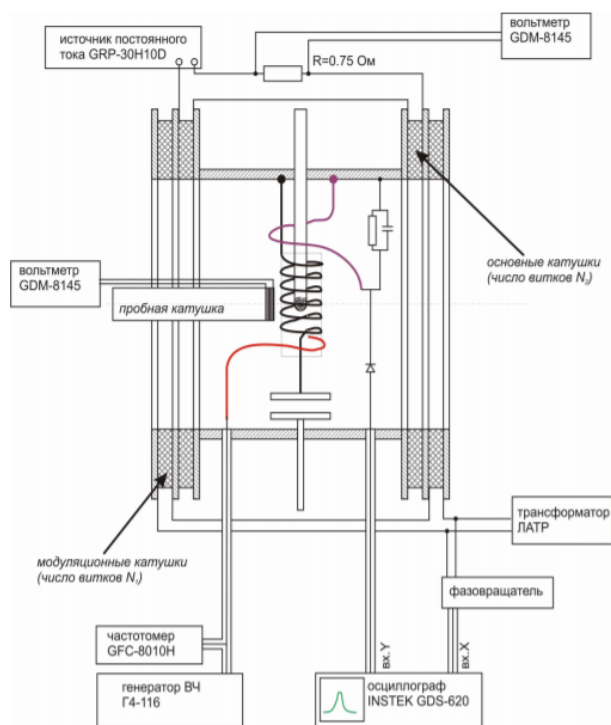
Расщепление терма свободного иона по проекции спина определяется  $g$ -фактором Ланде:

$$E(m_s) = g\mu_B B m_s \quad (1)$$

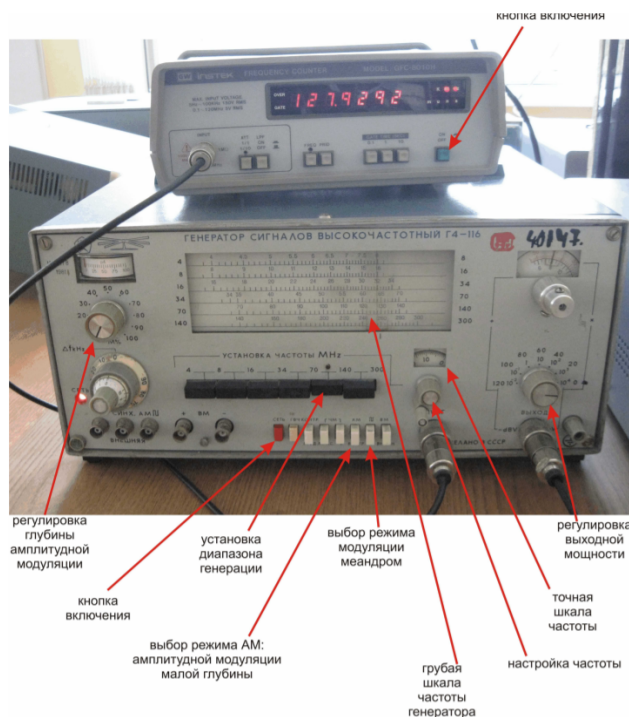
В данном случае расщепление происходит в кристалле, поэтому формулу нужно изменить, введя вместо  $g$  эффективный фактор -  $g_{\text{эфф}}$ . Тогда его можно измерить по следующей формуле:

$$g_{\text{эфф}} = \frac{h\nu}{\mu_B B}. \quad (2)$$

## Экспериментальная установка



(а)



(б)

Рис. 2: а) Схема установки для наблюдения электронного парамагнитного резонанса. б) Генератор ВЧ и частотомер.

Для проведения эксперимента использовалась установка на рис. 2. Частотомер обладал ручкой тонкой настройки, однако она не отображала действительные значения десятых долей, а была относительной шкалой. Поэтому результаты измерений резонансных частот были нормированы, используя показания тонкой шкалы на 2 соседних показаниях грубой шкалы.

Параметры установки для дальнейших измерений были известны.

## Наблюдение сигнала ЭПР. Определение $g$ -фактора и ширины линии ЭПР.

Данный эксперимент включал в себя 2 подготовительных этапа:

**Настройка ВЧ генератора:** необходимо было настроить генератор на резонансную частоту, что наблюдалось как резкое увеличение амплитуды сигнала на осциллографе. Полученное значение частоты резонанса составило:

$$f_0 = 132.45 \text{ МГц}.$$

Тогда, с помощью частот, на которых амплитуда сигнала уменьшается в 2 раза по сравнению с резонансным, можно оценить добротность схемы как:

$$Q = \frac{f_0}{f_{+\frac{1}{2}} - f_{-\frac{1}{2}}} \approx 631.$$

**Наблюдение сигнала резонансного поглощения.** Основные катушки были подключены к источнику постоянного тока, а модуляционные катушки к трансформатору ЛАТР.

Поле на образце является суммой постоянного поля от основных катушек и переменного поля от модуляционных катушек  $B(t) = B_{\text{пост}} + B_{\text{мод}} \sin(\omega_{\text{мод}} t)$ . Резонансное поглощение наступает при совпадении поля катушек с полем поглощения  $B_0 = \frac{hf_0}{\mu_B g_{\text{эфф}}}$ . Необходимо настроить поле  $B_{\text{пост}}$  на резонансное  $B_0$ . Тогда на осциллографе будут видны эквидистантные пики, изображенные на рис.3.

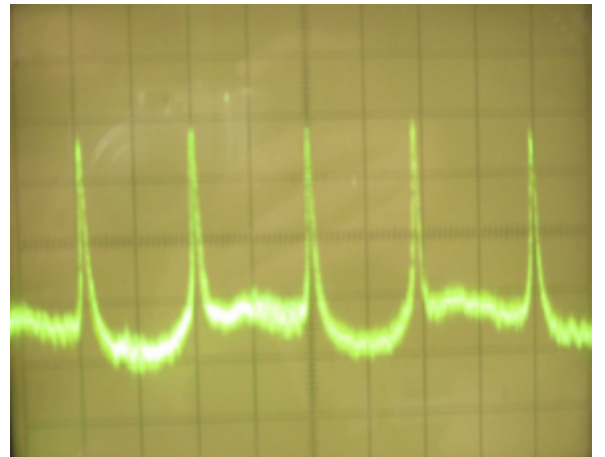


Рис. 3: Осциллограмма сигнала когда постоянное поле близко к резонансному, пики практически эквидистантны.

## Точная настройка резонансного поля и определение ширины линии

Подав на X-канал осциллографа напряжение с модуляционных катушек, можно увидеть в режиме X-Y линию ЭПР. После тонкой настройки, можно получить точную линию ЭПР, изображенную на рис. 4.

По полученной картине можно найти полный размах модулирующего поля (в делениях шкалы)  $A_{\text{полн}} = 40$  и полную ширину кривой резонансного поглощения на полувысоте  $A_{\frac{1}{2}} = 5$ . Тогда, внося внутрь соленоида пробную катушку, можно определить амплитуду модулирующего поля как:

$$B_{\text{мод}} = \sqrt{2} \frac{2\xi}{\pi^2 d^2 N_{\text{пробн}} \nu} = 0.98 \pm 0.03 \text{ мТл},$$

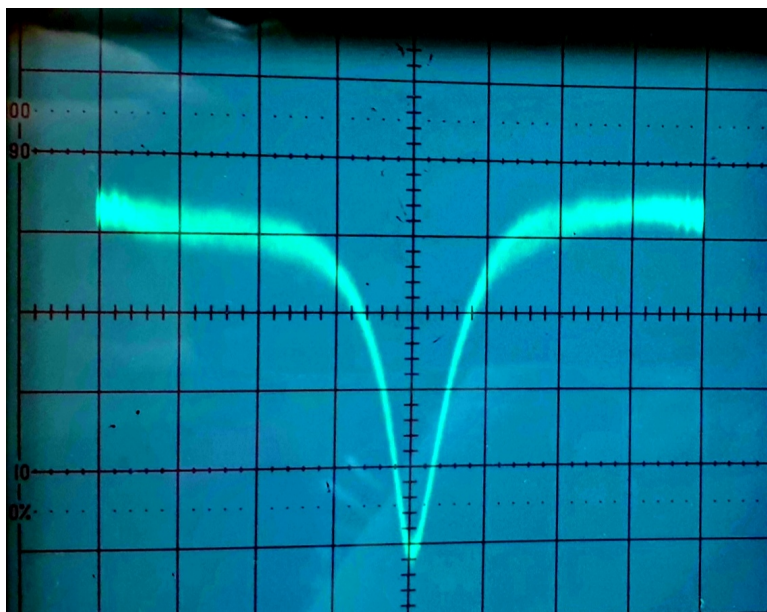


Рис. 4: Линия поглощения ЭПР в режиме XY-развёртки при практически точной настройке.

где  $\xi = 1.61$  – ЭДС индукции в пробной катушке.

Полуширина на полувысоте линии резонансного поглощения (в единицах поля) может быть тогда получена как

$$\Delta B = \frac{A_{\frac{1}{2}}}{A_{\text{полн}}} B = 0.12 \pm 0.02 \text{ мТл.}$$

## Калибровка поля электромагнита и определение g-фактора

Чтобы определить связь между падением напряжения на резисторе в цепи основных катушек и магнитным полем в центре магнита, в соленоид спереди и сзади вносилась пробная катушка. Проводилось несколько калибровочных измерений ЭДС пробной катушки и напряжения на соленоиде. Результаты представлены на таблице.

По полученным данным построен график (рис.5).

Теперь необходимо связать эти данные со значением магнитного поля в образце. Для магнитного потока через пробную катушку получаем:

$$\Phi = B_0 N_{\text{пробн}} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\text{Slope} \cdot U \cdot 2\pi}{\nu} \quad (3)$$

Тогда для магнитного поля в условиях резонанса получим:

$$B_0 = \frac{4 \cdot \text{Slope} \cdot U}{\omega \pi N_{\text{пробн}} d^2} = 4.5 \pm 0.1 \text{ мТл.} \quad (4)$$

	спереди	сзади
$U$ , mV	$\xi$ , mV	$\xi$ , mV
50	4.19	4.26
70	5.89	5.95
80	6.75	6.8
100.3	8.47	8.5
110.6	9.34	9.38
131	11.08	11.09
150.4	12.72	12.71

Таблица 1: Результаты измерения зависимости  $U(\xi)$  при поднесении катушки к образцу спереди и сзади установки.

Тогда, используя значение для резонансной частоты получаем результат для  $g$ –фактора по формуле (2):

$$g_{\text{эфф}} = 2.10 \pm 0.14.$$

Результат в описании к лабе составляет  $g = 2.0036$  для ДФПГ, так что с учетом погрешности результаты вполне совпадают с действительностью.

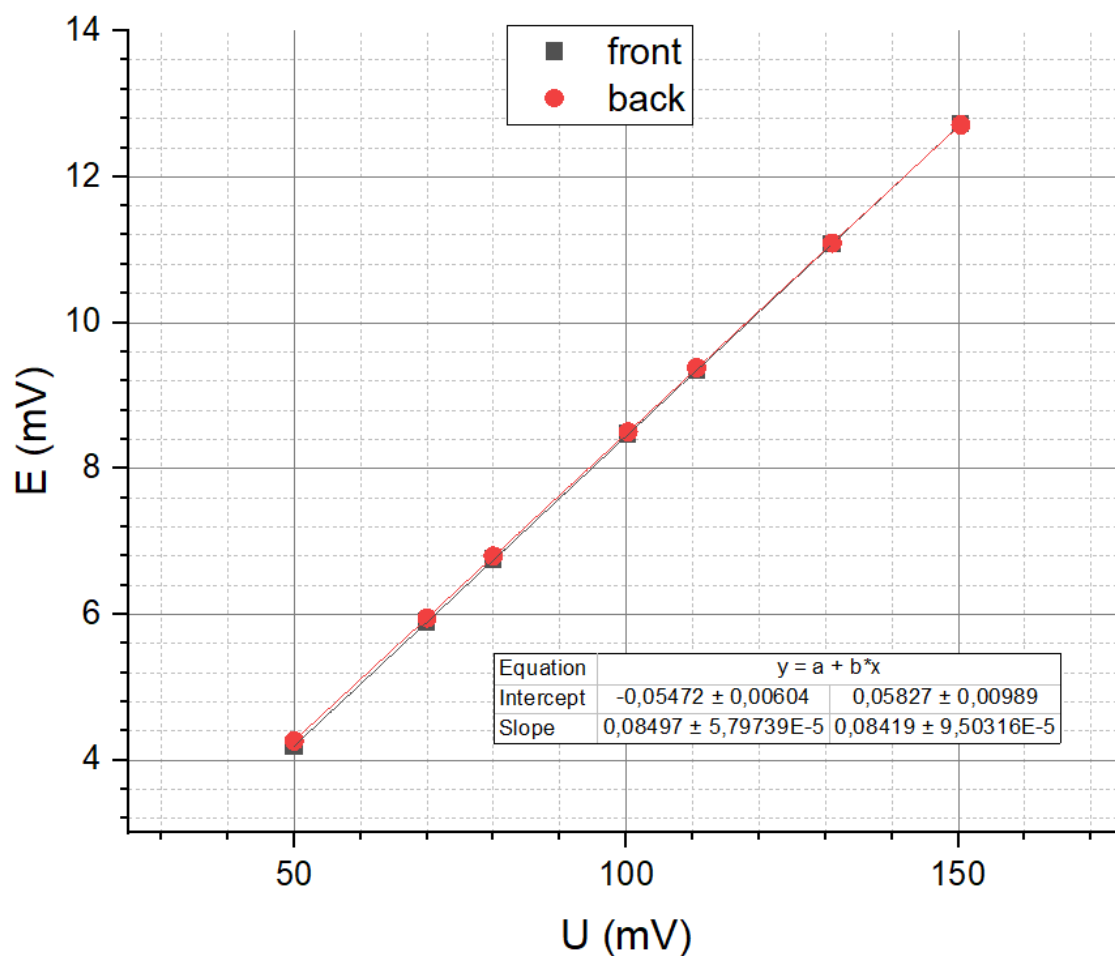


Рис. 5: Зависимость ЭДС индукции пробной катушки от напряжения на резисторе основных катушек. На графике нанесены точки, измеренные середи и сзади образца, однако они совпадают, как графически, так и их коэффициенты наклона. Это говорит о хорошей геометрии установки и симметричном распределении поля.

## Измерение на нескольких частотах

Изменяя зазор в конденсаторе схемы, можно изменять параметры установки, тогда резонансное напряжение для поглощения будет отличаться. Результаты таких измерений представлены на таблице 2.

По этим данным был построен график, изображенный на рис.6.

Как видно, график неплохо аппроксимируется линейной зависимостью, что показывает, что в пределах точности эксперимента он соответствует линейному расщеплению спиновых подуровней.

Используя формулу (2), уточняем  $g$ -фактор:

$$g_{\text{эфф}} = 2.07 \pm 0.06$$

$f$ , MHz	$U$ , mV
135.74	134.82
88.46	88.19
94.85	92.65
100.00	98.43
108.00	108.06
114.00	113.85
120.00	119.73
125.36	124.88

Таблица 2: Зависимость резонансной частоты контура  $f(U)$  от напряжения поглощения.

## Вывод

В работе был измерен  $g$ –фактор ДФПГ с хорошей точностью, был продемонстрирован электронный парамагнитный резонанс, а так же был подтвержден линейный характер Зеемановского расщепления спиновых подуровней.

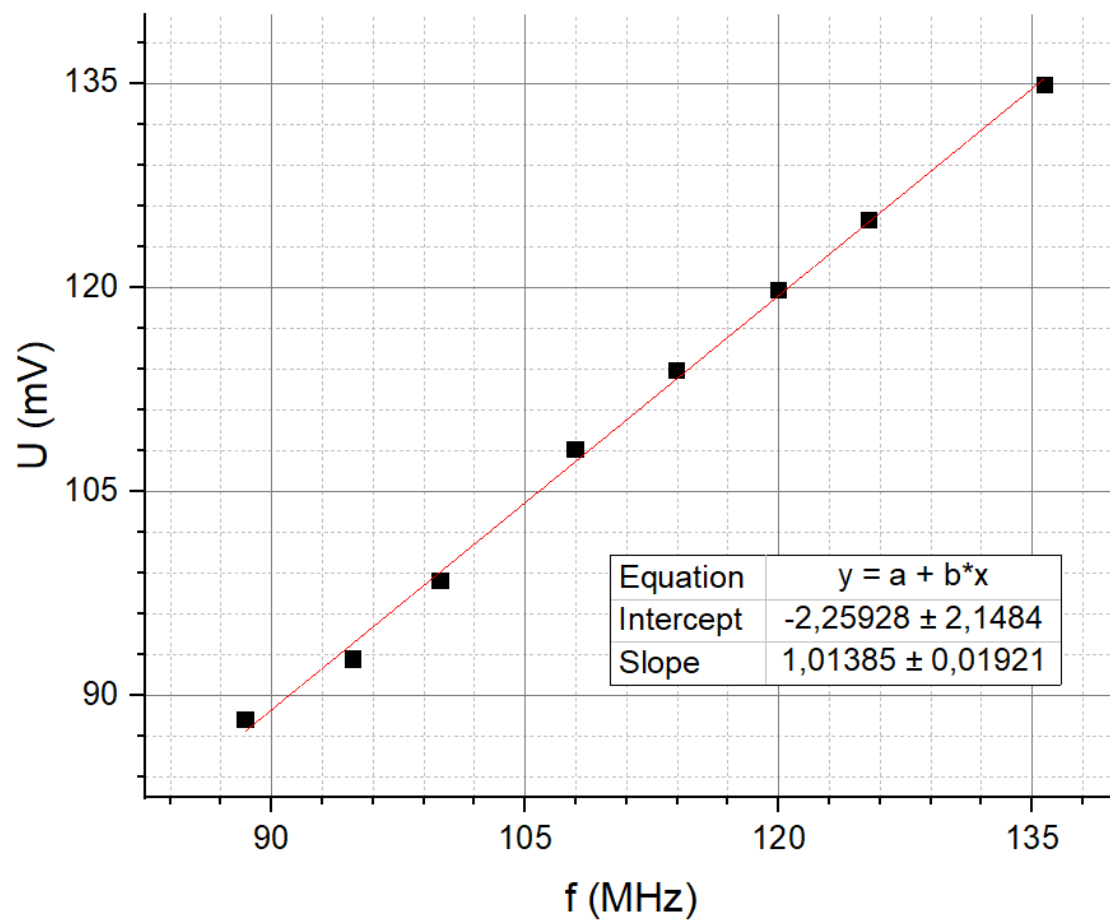


Рис. 6: График зависимости резонансной частоты контура  $f(U)$  от напряжения поглощения. Он вполне неплохо аппроксимируется линейной зависимостью.