

Кафедра квантовой радиофизики и электроники

Отчет по лабораторной работе №1

**Исследование твердотельных структур методом
ЭПР-спектроскопии**

Выполнили студенты 440 группы
Виноградов И.Д., Понур К.А., Шиков А.П.

Нижний Новгород, 2019

1. Теоретическая часть

1.1. Условия выделения кривых и дисперсии на детекторе

Волноводный отражательный резонатор с отверстием связи можно представить в виде эквивалентного колебательного контура, импеданс которого определяется выражением

$$Z = R + i[\omega L_0 - \frac{1}{\omega C}],$$

где R , L_0 и C – эквивалентные сопротивление, индуктивность и ёмкость соответственно. При наличии парамагнетика с магнитной проницаемостью μ индуктивность резонатора будет записываться как $L = \mu L_0$. При частичном заполнении резонатора образцом магнитная проницаемость выражается через восприимчивость χ следующим образом

$$\mu = 1 + 4\pi\eta\chi,$$

где χ – коэффициент заполнения резонатора парамагнетиком. В результате получаем

$$Z = R + i\frac{L_0}{\omega}\left(\omega^2 - \frac{1}{L_0 C}\right) + i\omega L_0 \cdot 4\pi\eta\chi.$$

Величина $\frac{1}{\sqrt{L_0 C}}$ дает собственную частоту резонатора. При резонансе $\omega^2 = \frac{1}{L_0 C} = \omega_0^2$ и выражение для Z принимает вид

$$Z = R + i\omega L_0 \cdot 4\pi\eta\chi = R(1 + i4\pi\eta\chi'Q + 4\pi\eta''Q),$$

где $Q = \frac{\omega L_0}{R}$ – добротность резонатора. Если обозначить характеристическое сопротивление волновода через Z_0 , то комплексный коэффициент отражения от резонатора Γ , определяемый как отношение амплитуды падающего на резонатор поля E_n к амплитуде отраженного поля, будет равен

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

С учётом этого отраженную от резонатора сигнальную волну в точке детектирования можно записать в виде

$$E_1 = |E_n| \cdot \Gamma \cdot e^{-i4\pi \frac{L_1}{\lambda}},$$

где L_1 – длина волноводного плеча от детектора до резонатора. Кроме этой волны на детектор поступает сигнал, отраженный от балансного плеча

$$E_2 = \alpha^2 |E_n| e^{-i4\pi \frac{L_2}{\lambda}},$$

где α – коэффициент ослабления аттенюатора, а L_2 – соответствующая длина балансного плеча. Суммарное поле на детекторе получим в следующем виде:

$$E = |E_n| \cdot e^{-i4\pi \frac{L_1}{\lambda}} \cdot \left\{ \Gamma + \alpha^2 e^{-i4\pi \frac{L_2-L_1}{\lambda}} \right\}.$$

При малых уровнях СВЧ-мощности ток детектора пропорционален квадрату напряженности поля E в этом случае имеем

$$i_{\text{дет}} = S|E|^2 = SP_n \cdot \left| \Gamma + \alpha^2 e^{-i4\pi \frac{L_2-L_1}{\lambda}} \right|^2,$$

где S – коэффициент преобразования детектора, а P_n – мощность, падающая на резонатор. Используя неравенства $\chi' \ll 1$, $\chi'' \ll 1$ и условие хорошей согласованности волновода с резонатором, получаем вид сигнала ЭПР:

$$i_{\text{дет}} = SP_n \cdot 4\pi Q\eta \left[\chi'' \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}\Delta L\right) - \chi' \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda}\Delta L\right) \right] \quad (1)$$

Отсюда следует, что в зависимости от положения замыкающего поршня балансного плеча сигнал на выходе детектора может быть пропорционален либо χ' , либо χ'' . При разности $\Delta L = L_2 - L_1$, кратной $\frac{\lambda}{4}$, ток детектора будет пропорционален χ'' , а при дополнительном сдвиге на $\frac{\lambda}{8}$ – пропорционален кривой χ' .

1.2. Определение числа парамагнитных частиц в образце

Чтобы получить соотношение, позволяющее определить число парамагнитных частиц исходя из характеристики наблюдаемого сигнала ЭПР, воспользуемся выражением (1). При $\Delta L \simeq \frac{\lambda}{4}$ имеем

$$i_{\text{дет}} \simeq SP_n \cdot 4\pi Q\eta \chi''.$$

Введем технический коэффициент A , характеризующий коэффициент усиления тракта «детектор-усилитель-осциллограф». Его величину можно измерить, подавая известный по величине модулированный СВЧ-сигнал на детекторную головку и измеряя при этом амплитуду видеосигнала на экране осциллографа. Если обозначить через L_M высоту видеосигнала модуляции на экране, а P_M – величину модулированной компоненты СВЧ-мощности, то коэффициент усиления A будет равен $\frac{L_M}{P_M}$. Если учесть такого рода амплитудную калибровку, высота сигнала ЭПР на экране осциллографа может быть записана как

$$L_C = AP_n \cdot 4\pi Q\eta \chi''(\omega_0) \quad (2)$$

Коэффициент заполнения η определяется как отношение двух интегралов вида $\int H_1^2 d\nu$ по объему образца и резонатора соответственно. В условиях данной ЭПР-установки с

достаточной степенью точности можно считать

$$\eta \simeq \frac{2V_{\text{обр}}}{V_{\text{рез}}}.$$

Значение χ'' для малых полей H_1 при $\omega = \omega_0$ можно записать в виде

$$\chi''(\omega_0) = \frac{N_0 \mu^2}{3KT} \omega_0 T_2^*$$

Отсюда количество парамагнитных частиц можно оценить как

$$N_0 = 3KT \frac{\chi''(\omega_0)}{\mu^2 \omega_0 T_2^*}. \quad (3)$$

Сопоставляя (2) и (3) получаем окончательно

$$N_0 = \frac{3KT}{8\pi Q \mu^2 \omega_0 T_2^*} \cdot \frac{L_C}{L_M} \cdot \frac{P_M}{P_n} \cdot \frac{V_{\text{рез}}}{V_{\text{обр}}} \quad (4)$$

2. Экспериментальная часть

3. Исследование ЭПР в молекулах дифенила

Получение на экране осциллографа кривых поглощения и дисперсии сигнала ЭПР. Для получения необходимой картины необходимо произвести следующие действия:

1. Вставить образец в резонатор.
2. Включить ВЧ-генератор и прогреть его в течение 5-ти минут; включить модулирующее поле.
3. Подключить к выходу детектора измеритель мощности и при полностью выведенном аттенуаторе ($\alpha = 0$) настроить клистронный генератор по частоте на центр одной из зон по максимуму мощности, контролируемой измерительным прибором. В эксперименте, для дифенила максимум частоты пришелся на $\nu = 8.99$ ГГц.
4. Ввести волноводный аттенуатор балансного плеча ($\alpha = 100\%$) и настроить его в резонанс (соответствует минимуму сигнала на выходе детектора.)
5. Подключить выход детектора с соблюдением полярности на вход с соблюдением полярности на вход усилителя.

6. Включить источник постоянного тока и, меняя величину тока через катушки магнита (зависимость $H(I)$ на рис.1), вывести на резонансное значение поле H , определяя момент по появлению на экране осциллографа пары сигналов, соответствующих резонансному переходу.
7. Вывести волноводный аттенюатор ($\alpha = 0$) и, перемещая плунжер балансного плеча, получить кривые χ' и χ'' . (рис. 2) Кривой χ' соответствует значение тока $I' = 159$ мА, а кривой $\chi'' - I'' = 169$ мА, что эквивалентно полю в 3550 и 3750 Гс соответственно.

Измерение ширины линий поглощения сигнала ЭПР в единицах поля.

Расчет ширины линии в единицах частоты.

Определение числа парамагнитных частиц в образце. Для вычисления числа парамагнитных частиц, воспользуемся пунктом 1.2 теории и формулой (4).

$$N_0 = \frac{3KT}{8\pi Q\mu^2\omega_0 T_2^*} \cdot \frac{L_C}{L_M} \cdot \frac{P_M}{P_n} \cdot \frac{V_{\text{рез}}}{V_{\text{обр}}},$$

где T_2^* – время поперечной релаксации, K – постоянная Больцмана, μ – магнитная проницаемость дифенила,

Свыше нам даны следующие величины:

$$Q = 5000, \quad \frac{V_{\text{рез}}}{V_{\text{обр}}} \simeq 200, \quad \frac{P_M}{P_n} = 1$$

Из эксперимента остается определить собственную частоту резонатора ω_0 (нашли в 3.3), время поперечной релаксации T_2^* и отношение L_C/L_M (нашли двумя параграфами выше).

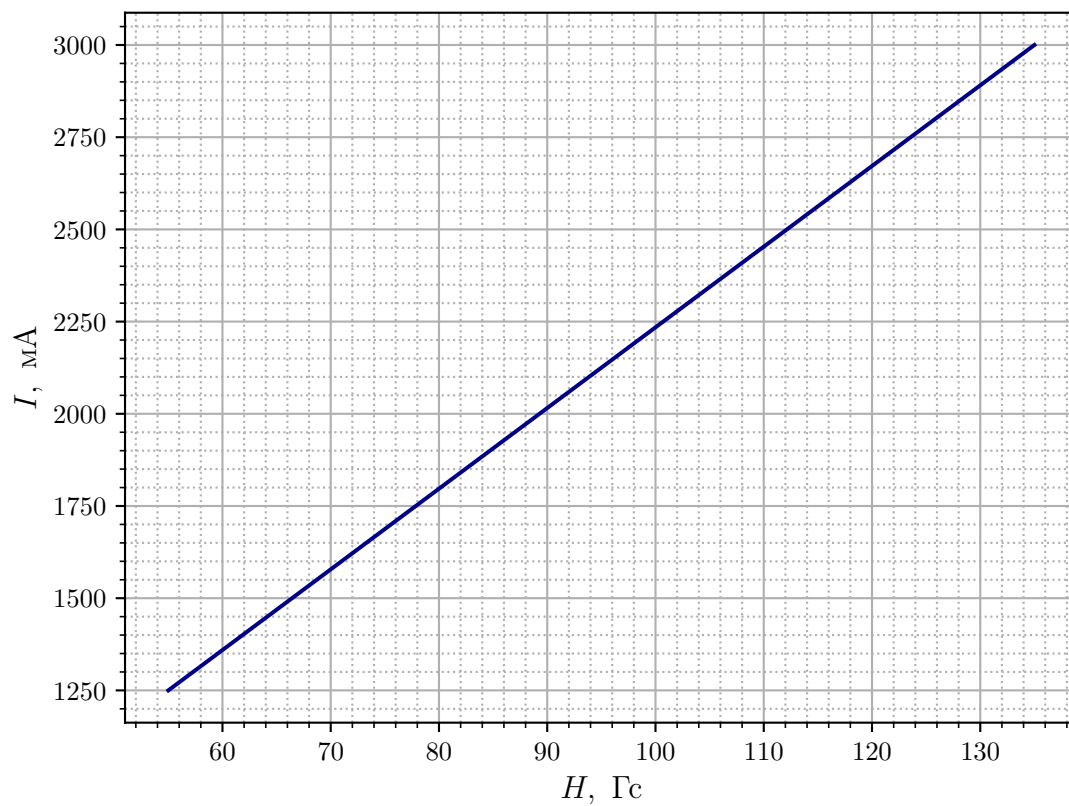


Рис. 1: Градуировочный график зависимости магнитного поля H от тока I

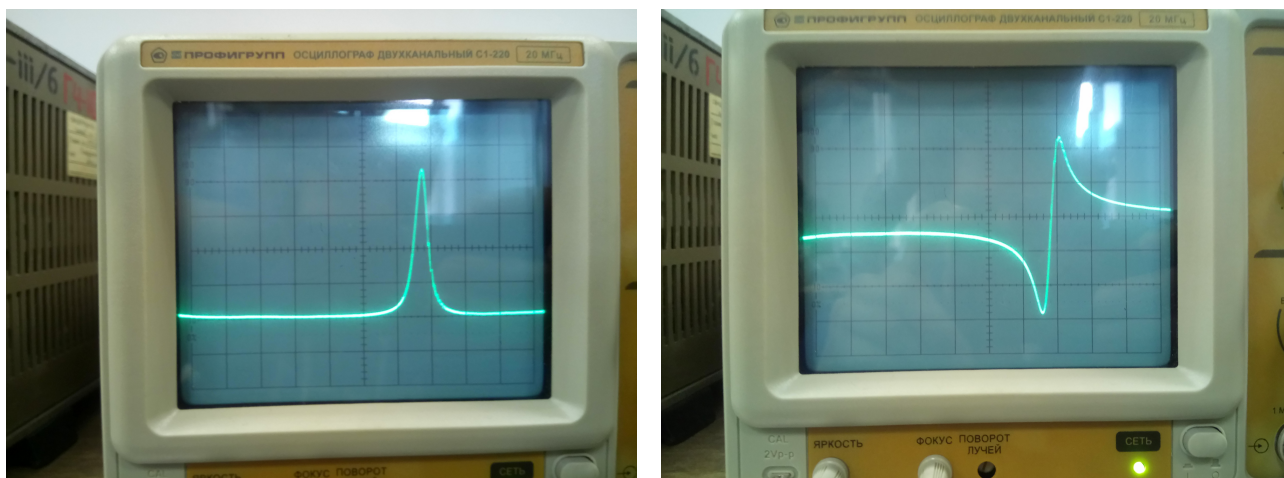


Рис. 2: Кривые χ' и χ'' на экране осциллографа