



**«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра ФН-4 «Физика»

О.Ю. Дементьева, С.Л. Тимченко, В.В. Филатов.

Электронный спиновый резонанс
(ЭПР на ДФПГ)

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Ф-81

Под редакцией Б.Е. Винтайкина

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Москва, 2014

ЭЛЕКТРОННЫЙ СПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС. (ЭПР на ДФПГ).

Цель лабораторной работы:

Изучение явления электронного спинового резонанса в парамагнетике.

Экспериментальные задачи.

1. Определение фактора Ланде для спиновых моментов электрона в парамагнитном веществе.
2. Определение полуширины спектральной линии *электронного спинового резонанса*.
3. Измерение индукции магнитного поля, требуемого для *электронного спинового резонанса* в парамагнетике, с помощью магнитометра.

Введение

У атомов, помещенных в магнитное поле, происходит расщепление их энергетических уровней на несколько подуровней. Спонтанные переходы с нижних подуровней одного и того же уровня на верхние невозможны. Однако такие переходы могут происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля. Необходимым условием этого является совпадение частоты электромагнитного поля с частотой фотона, соответствующего разности энергий между расщепленными подуровнями.

При этом можно наблюдать явление поглощения энергии электромагнитного поля, которое называют магнитным резонансом.

В зависимости от типа частиц, которые являются носителями магнитного момента, различают *электронный парамагнитный (спиновый) резонанс* (ЭПР или ЭСР) и *ядерный магнитный резонанс* (ЯМР).

Под электронным парамагнитным резонансом понимают резонансное поглощение электромагнитной энергии веществами, содержащими парамагнитные частицы. Известны следующие разновидности парамагнитных частиц:

- 1) атомы и молекулы с нечётным числом электронов (например, атомы азота, водорода, молекулы NO);
- 2) свободные радикалы химических соединений с неспаренными электронами (например, CH_3);
- 3) ионы с частично заполненными внутренними оболочками (например, ионы переходных элементов);
- 4) центры окраски в кристаллах;
- 5) электроны проводимости в металлах и полупроводниках.

Явление электронного парамагнитного резонанса было открыто в 1944 г. Евгением Константиновичем Завойским, который обнаружил, что монокристалл, помещенный в постоянное магнитное поле 4 мТл, поглощает микроволновое излучение с частотой около 133 МГц. Поглощение электромагнитного излучения имело избирательный (резонансный) характер, т. е. наблюдалось лишь при определенном соотношении между напряженностью постоянного магнитного поля и частотой излучения. Открытое явление получило название *электронного парамагнитного резонанса* (ЭПР).

ЭПР - резонансное поглощение (излучение) электромагнитных (ЭМ) волн радиочастотного диапазона (10^9 - 10^{12} Гц) парамагнетиками в присутствии постоянного внешнего магнитного поля.

Метод ЭПР нашел широкое применение в физике, химии, биологии и медицине. В частности, электронный парамагнитный резонанс - один из основных прямых методов обнаружения и определения свободных радикалов и нестабильных комплексов металлов

переменной валентности (Fe, Cu, Co, Ni...), имеющих неспаренный электрон на молекулярной орбитали.

Использование электронного парамагнитного (спинового) резонанса в твердых телах приобрело большое значение в связи с тем, что ЭПР открывает новые возможности для изучения строения вещества, в частности материалов, применяемых в микроэлектронике, нано-инженерии. В квантовой электронике этот метод используется при накачке рабочей среды лазеров на парамагнитных кристаллах.

Спектр спинового резонанса неспаренных электронов, связанных с примесными центрами в полупроводнике, позволяет получить ряд весьма ценных сведений не только о состоянии самих атомов примеси (зарядовое число примесного атома, его изолированность в решетке и др.), но также и о взаимодействии связанного электрона с ближайшими соседними атомами.

По интенсивности резонансного поглощения электромагнитного излучения можно определить концентрацию парамагнитных центров. Изучение процессов спиновой релаксации позволяет, кроме того, выяснить природу взаимодействия связанных электронов с решеткой. Из анализа g - и A -тензоров можно определить симметрию парамагнитных центров и построить их модель.

Метод электронного парамагнитного резонанса позволяет в ряде случаев получить сведения о примесном центре даже в присутствии других посторонних примесей или дефектов решетки, что неосуществимо при использовании обычных способов, основанных на эффекте Холла или измерениях проводимости.

Физические основы явления ЭСР.

Магнитные свойства атомов и молекул определяются магнитными моментами их составляющих: электронов и атомных ядер, состоящих из протонов и нейтронов. Магнитные моменты атомных ядер существенно меньше магнитных моментов электронов, поэтому магнитные свойства вещества определяются, главным образом, магнитными моментами электронов.

В зависимости от электронного строения атомов и молекул вещества имеют различные магнитные свойства (могут различаться своими магнитными характеристиками). В зависимости от магнитного момента молекул, вещества подразделяют следующим образом.

Вещества, молекулы которых имеют магнитный момент равный нулю - называются *диамагнетиками*.

Вещества, молекулы которых обладают отличными от нуля магнитными моментами, называются *парамагнетиками*. В парамагнитных веществах магнитные моменты соседних атомов или молекул практически не взаимодействуют.

Вещества, молекулы которых обладают отличными от нуля магнитными моментами, могут называться также *ферромагнетиками*. В ферромагнетиках магнитные моменты соседних атомов или молекул, взаимодействуют друг с другом. Для таких веществ характерна остаточная намагниченность, то есть такой образец может оставаться намагниченным даже в отсутствии внешнего магнитного поля.

Магнитный момент атома (или молекулы) обусловлен следующими причинами:

- 1) магнитным моментом замкнутого тока за счет орбитального движения всех электронов, входящих в состав атома;
- 2) наличием собственного механического момента (спина) у электронов и связанного с ним спинового магнитного момента;

3) наличием собственного механического момента (спина) ядер. За счет доминирующей массы ядра и небольших скоростей движения, ядерный момент намного меньше электронного, и в первом приближении его можно не учитывать. Однако, в некоторых случаях именно магнитным моментом ядер пренебрегать нельзя. Например, в условиях ЯМР можно получить приоритетную информацию о строении вещества.

Согласно представлениям квантовой механики, состояние электрона в *водородоподобном* атоме задается набором четырех квантовых чисел. Они определяют значения основных физических величин для электрона в атоме (таблица 1).

Таблица 1.

Квантовое число	Возможные значения	Определяет:	По формуле:
Главное	$n = 1, 2, 3 \dots$	Энергию электрона в атоме	$E_n = -\left(\frac{13,6 \cdot Z^2}{n^2}\right) \text{эВ}$
Орбитальное	$l = 0, 1, \dots, n-1$	Орбитальный механический момент	$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}$
		Орбитальный магнитный момент	$\vec{P}_l^m = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$
Магнитное	$m = 0, \pm 1, \dots, \pm l$	Проекцию орбитального механического момента	$L_z = m\hbar$
		Проекцию орбитального магнитного момента	$P_{l_z}^m = \mu_B m$
Магнитное спиновое	$m_s = \pm 1/2$	Проекцию собственного механического момента	$S_z = \hbar m_s$
		Проекцию собственного магнитного момента	$P_{sz}^m = g_s \mu_B m_s$

Здесь g_s - фактор Ланде для спиновых моментов; μ_B - магнетон Бора (см. ниже).

Орбитальный магнитный момент.

Из курса электродинамики известно, что если заряженная частица (например, электрон) обладает орбитальным механическим моментом, то у нее имеется также и магнитный момент. Величину этого магнитного момента проще всего вычислить для случая плоской круговой орбиты.

В теории Бора рассматривается круговое движение электрона по орбите радиуса r с угловой скоростью ω . Магнитный момент замкнутого орбитального тока определяется как:

$$\vec{p}_l^m = I \cdot S \cdot \vec{n} = \frac{e}{T} \cdot \pi R^2 \cdot \vec{n} = \frac{e \cdot \omega \cdot R^2}{2} \cdot \vec{n}. \quad (1)$$

$I = \frac{e}{T}$ - ток орбитального движения электрона; $S = \pi R^2$ - площадь замкнутого орбитального тока, \vec{n} - вектор положительной нормали к этой площади (ее направление определяется направлением тока), $T = \frac{2\pi}{\omega}$ - период обращения электрона по орбите.

Магнитный момент \vec{p}_l^m оказывается пропорциональным орбитальному моменту электрона \vec{L} , который определяется как:

$$\vec{L} = m_e \cdot [\vec{r} \times \vec{v}] = -m_e \cdot \omega \cdot R^2 \cdot \vec{n}, \quad (2)$$

где m_e - масса электрона.

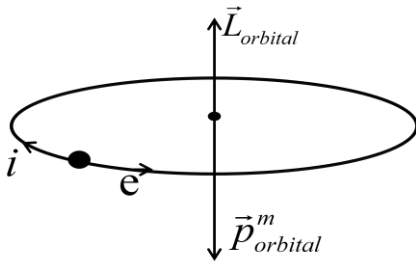


Рис.1. Орбитальный и магнитный момент электрона в атоме водорода.

Вектор магнитного момента \vec{p}_l^m образует с направлением тока правовинтовую систему, а вектор механического момента \vec{L} - с направлением движения электрона. Так как заряд электрона отрицателен, вектор \vec{p}_l^m направлен противоположно вектору механического момента \vec{L} (рис. 1).

Из соотношений (1) и (2) следует, что орбитальный магнитный момент электрона можно представить в виде:

$$\vec{p}_l^m = -\frac{e}{2m} \vec{L} = \gamma \cdot \vec{L}. \quad (3)$$

Коэффициент $\gamma = -\frac{e}{2m}$ называют *гиромагнитным отношением*.

Собственный магнитный момент.

Собственный магнитный момент электрона также пропорционален его собственному механическому моменту \vec{S} :

$$\vec{p}_s^m = g_s \cdot \gamma \cdot \vec{S}. \quad (4)$$

Коэффициент g_s - называют *фактором Ланде* для спиновых моментов (для орбитальных моментов $g_l = 1$).

Одной из целей экспериментальной части данной лабораторной работы является определение фактора Ланде g_s для спиновых моментов.

Полный магнитный момент.

В сложном многоэлектронном атоме каждый электрон обладает орбитальным механическим моментом \vec{L}_i и собственным механическим моментом \vec{S}_i . Рассмотрим, как образуется полный магнитный момент атома. Наиболее распространенным является случай, когда орбитальные моменты электронов взаимодействуют между собой сильнее, чем со спиновыми моментами. Аналогично ведут себя и спиновые моменты. Возникает так

называемая нормальная связь или связь Рассель-Саундерса. Вследствие этого все орбитальные моменты складываются в результирующий орбитальный момент: $\vec{L}_\Sigma = \sum \vec{L}_i$, а спиновые – в результирующий спиновый: $\vec{S}_\Sigma = \sum \vec{S}_i$.

Полный механический момент атома определяется как:

$$\vec{L}_J = \vec{L}_\Sigma + \vec{S}_\Sigma.$$

Его значение:

$$L_J = \hbar \sqrt{J(J+1)}.$$

Квантовое число J может принимать значения $|J| = |L-S|, |L-S+1|, \dots, |L+S|$. Квантовые числа L и S определяют полный орбитальный и полный спиновый моменты атома.

Фактор Ланде для полного магнитного момента вычисляется по формуле:

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}. \quad (5)$$

А сам магнитный момент:

$$P_J^m = g_J \gamma L_J = -g_J \frac{e}{2m_e} L_J. \quad (6)$$

Если полный орбитальный момент атома равен нулю $L = 0$, то $g_J = 2$. Этот случай относится к нашему эксперименту.

Магнитный момент молекулы ДФПГ.

При обсуждении магнитных характеристик атома или молекулы, соответственно, нужно рассматривать все его электроны, т.е. электроны, входящие в состав атомных оболочек, а также электроны, участвующие в образовании химических связей. Магнитный момент полностью заполненных электронных оболочек равен нулю. Так как спины электронов, образующих химическую связь, всегда антипараллельны, их полный механический момент тоже равен нулю. В этом случае мы имеем дело с диамагнитной молекулой.

Но встречаются вещества, у которых электроны не имеют пары с антипараллельным спином – это так называемые неспаренные электроны. Вещество, которое имеет такие электроны, будет парамагнитным.

В данной работе рассматривается вещество, молекулы которого имеют один неспаренный электрон. Центральной целью работы является определение фактора Ланде для этого электрона.

Молекула ДФПГ (дифинилпикрилгидразила) из которого состоит исследуемый образец имеет только один неспаренный электрон. Орбитальный момент этого электрона равен нулю $L = 0$ (s -состояние). Поэтому магнитный момент молекулы ДФПГ определяется только собственным моментом неспаренного электрона \vec{S} – его спином. Следовательно, фактор Ланде молекулы $g_J = g_s$. Он будет примерно такой же, как фактор Ланде свободного электрона. Теоретически фактор Ланде ДФПГ может быть получен в соответствии с выражением (5), считая значения $L = 0$ и $S = \frac{1}{2}$. При этом получаем:

$$g_J = 2.$$

Однако в действительности (на практике), g оказывается, немного превышает это значение. В частности, это может быть связано с тем, что в эксперименте мы не учитываем влияния магнитного поля земли и окружающих установку тел.

Эффект Зеемана и магнитный резонанс.

Для того, чтобы понять основные принципы эксперимента, поговорим о эффекте Зеемана и выясним в чем заключается магнитный резонанс.

Из таблицы 1 следует, что проекции орбитального и собственного магнитных моментов электрона квантуются так, что имеем:

$$P_{L_z}^m = g_l \gamma L_z = \mu_B m \quad (m = l, l-1, \dots, -l), \quad (7)$$

$$P_{S_z}^m = g_s \gamma S_z = g_s \mu_B m_s \quad \left(m_s = \pm \frac{1}{2} \right). \quad (8)$$

Константу $\mu_B = \frac{e}{2m} \hbar$ называют магнетоном Бора.

Также квантуется проекция полного магнитного момента многоэлектронного атома:

$$P_{J_z}^m = g_J \mu_B m_J \quad (m_J = J, J-1, \dots, -J). \quad (9)$$

Эффект Зеемана заключается в расщеплении атомной спектральной линии (энергетического уровня) на несколько подуровней при внесении атома или молекулы во внешнее магнитное поле. При помещении магнитного момента \vec{P}_J^m в магнитное поле с индукцией \vec{B} он приобретает дополнительную энергию W за счет магнитного взаимодействия:

$$W = -(\vec{P}_J^m \cdot \vec{B}) = -P_{J_z}^m B. \quad (10)$$

Если атом попадает в магнитное поле, то его энергия E изменяется. Это изменение зависит от взаимной ориентации магнитного момента атома \vec{P}_J^m и направления магнитного поля \vec{B} . В системе атомов, помещенных в магнитное поле появятся атомы с различными энергиями исходного уровня. В простейшем случае энергетический уровень с энергией E расщепится на $2J+1$ эквидистантных подуровня, расстояние между которыми (см.(9)):

$$\Delta E = P_{J_z}^m B = g_J \mu_B m_J B \quad (m_J = J, J-1, \dots, -J).$$

Причем, эти дискретные подуровни энергии расположены на одинаковом расстоянии:

$$\Delta E = g_J \mu_B B.$$

Обычно различают два эффекта Зеемана: «нормальный» (результатирующий собственный механический момент атома или молекулы $S=0$) и «аномальный» (результатирующий спин электронов $S \neq 0$).

В исследуемом веществе ДФПГ наблюдается аномальный эффект Зеемана - магнитный момент молекулы определяется собственным моментом неспаренного электрона. Его проекция на направление магнитного поля может принимать лишь два значения ($m_s = \pm 1/2$):

$$P_{S_z}^m = \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B.$$

В магнитном поле \vec{B} состояниям с разными проекциями спинов соответствуют два разных значения энергии E электрона (рис.2):

$$E_I = -\frac{1}{2} g_s \mu_B B \quad (11),$$

и

$$E_2 = +\frac{1}{2}g_S\mu_B B \quad (12).$$

На рис.2 изображено расщепление исходной линии на два подуровня в магнитном поле:

N_1, N_2 – число атомов на нижнем и верхнем подуровнях соответственно с противоположным направлением спинов;

E_1, E_2 – энергии подуровней.

Переход с более низкого подуровня на более высокий подуровень возможен при поглощении кванта излучения, если энергия кванта $h\nu$ в точности равна разности энергий ΔE между подуровнями:

$$h\nu = \Delta E = g_S\mu_B B \quad (13)$$

Переход электрона с одного подуровня на другой происходит с одновременным изменением направления спина:

$$\Delta m_s = \pm 1.$$

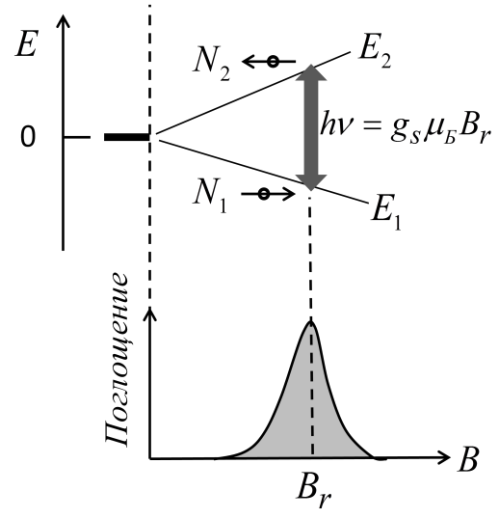


Рис.2 Поглощение энергии излучения свободным электроном в постоянном магнитном поле B .

На рисунке также изображена зависимость коэффициента поглощения излучения заданной частоты ν от индукции магнитного поля B . При значении B_r , удовлетворяющем (12), излучение сильно поглощается. Значение B_r называется резонансным. А само явление поглощения излучения образцом - парамагнитным резонансом.

В данной работе исследуемый образец помещается в магнитное поле B и в поле излучения с заданной частотой ν .

Условия для резонансного поглощения излучения (определенной частоты) парамагнитным веществом можно создать, изменяя внешнее магнитное поле вблизи его резонансного значения B_r (с помощью переменного напряжения). Регистрируя значение индукции магнитного поля B_r , при котором излучение максимально поглощается веществом и используя формулу (13), можно определить фактор Ланде:

$$\begin{aligned} \mu_B \cdot g_S \cdot B_r &= h\nu \\ \Leftrightarrow g_S &= \frac{h\nu}{\mu_B \cdot B_r} \end{aligned} \quad (14)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $\nu = 146 \cdot 10^6$ Гц, $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ А·м².

После соответствующих подстановок, имеем:

$$g_S = 10,43 \cdot 10^{-3} [Tл] \cdot \frac{1}{B_r} \quad (15)$$

В ЭСР резонаторе магнитное поле в образце B создается двумя катушками Гельмгольца с числом витков $N = 241$ и радиусом $R = 0,048 \text{ см}$. Тогда их магнитное поле определится по формуле:

$$B = \mu_0 \frac{8 \cdot I \cdot N}{\sqrt{125} R},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$ а I - ток в катушках. Однако, из геометрических соображений, в данном резонаторе магнитные катушки не являются в точности катушками Гельмгольца. И поэтому реальное магнитное поле между этими двумя катушками (магнитное поле в образце) определяется следующим выражением:

$$B = 0,6445 \cdot \mu_0 \frac{I \cdot N}{R}.$$

После соответствующих вычислений, можно получить:

$$B = 4,07 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{Тл}}{\text{А}} \right] \cdot I [\text{А}]. \quad (16)$$

Теперь можно вычислить фактор Ланде g , зная значение резонансного тока I_r и используя соотношения (15) и (16).

Полуширина линии поглощения.

Основываясь на экспериментальной части работы, получив линию резонансного поглощения, можно определить полуширину линии резонансного поглощения ЭМ излучения веществом. Полушириной линии поглощения принято называть полную ширину линии, измеренную по половине ее высоты (рис. 3). Уширение спектральной линии ΔE , в частности, возникает за счет конечного времени пребывания микрочастицы в возбужденном состоянии и непосредственно связано с соотношением Гейзенберга: $\Delta E \approx \frac{\hbar}{\tau}$, где τ - среднее время жизни частицы в возбужденном состоянии, \hbar - постоянная Планка. В этом случае τ можно оценить:

$$\tau \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{\mu_B \cdot g_J \cdot \Delta B_r}. \quad (17)$$

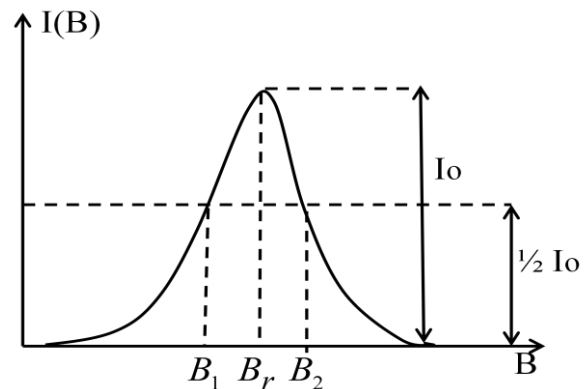


Рис.3 Спектральная линия ЭПР.

Спектры ЭПР, как правило, имеют сложную форму, которая описывается функцией $I(B)$, где B - магнитное поле. В общем случае $I(B)$ не может быть задана аналитически. На рис. 3 изображен наиболее простой спектр ЭПР, представляющий собой одиночную линию

поглощения, на примере которой показано, что вкладывается в понятие интенсивности I_0 и ширины линии ЭПР. Форма линии ЭПР в нашем эксперименте близка к изображенной на рисунке.

Количественно ширина линии поглощения пропорциональна индукции магнитного поля ΔB и, может быть измерена разностью полей $\Delta B = B_2 - B_1$ между точками линии, взятыми на середине высоты. Величина $I(B)$, соответствующая максимальному поглощению сигнала называется пиковой интенсивностью спектра, а площадь под кривой, задаваемая:

$$J_{\text{инт}} = \int_{-\infty}^{+\infty} I(B) dB$$

называется интегральной интенсивностью спектра. Последняя связана с *концентрацией парамагнитных частиц в образце*.

Функция $I(B)$ определяет форму спектра и зависит от характера взаимодействия парамагнитной частицы с окружающими частицами. Во многих случаях $I(B)$ довольно хорошо описывается гауссовой функцией. Однако, так как в общем случае она не может быть задана аналитически, интеграл $J_{\text{инт}}$ рассчитывается численно.

II. Экспериментальная часть.

1. Методика эксперимента.

Внешний вид экспериментальной установки для изучения ЭС резонанса показан на рис. 1.

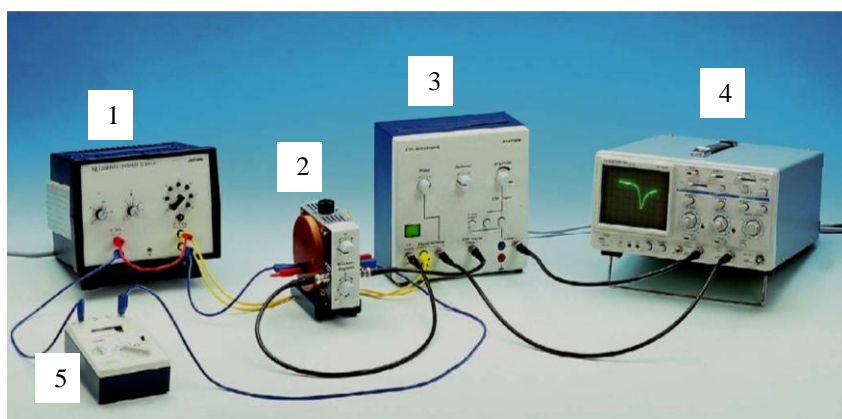


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки.

Экспериментальная установка (рис. 4) содержит:

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1 – универсальный источник питания с двумя выходами; | 3 – источник питания ЭС – резонатора; |
| 2 – ЭСР резонатор с катушками Гельмгольца (магнитными катушками); | 4 – осциллограф; |
| | 5 – универсальный мультиметр. |

Принципиальная схема ЭС резонатора изображена на рис.2.

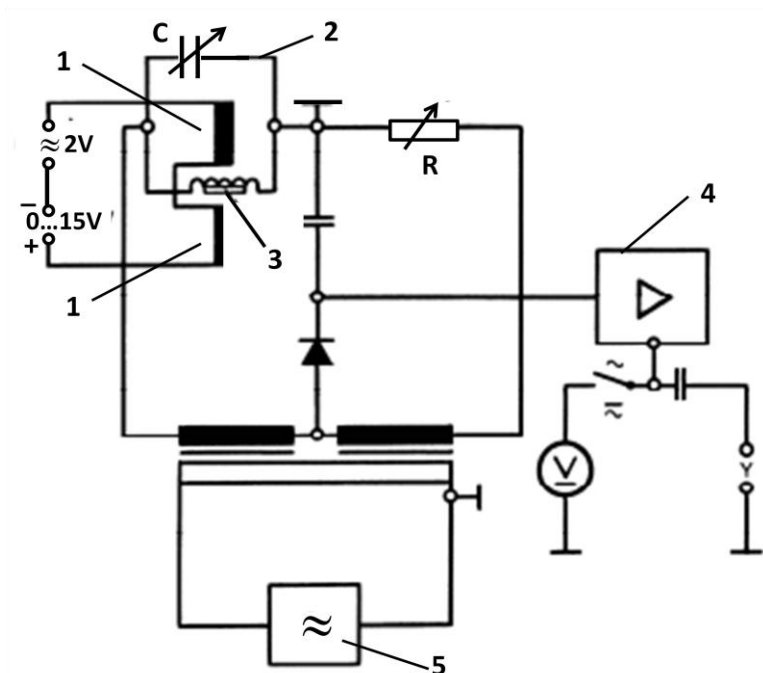


Рис. 5. Принципиальная схема резонатора.

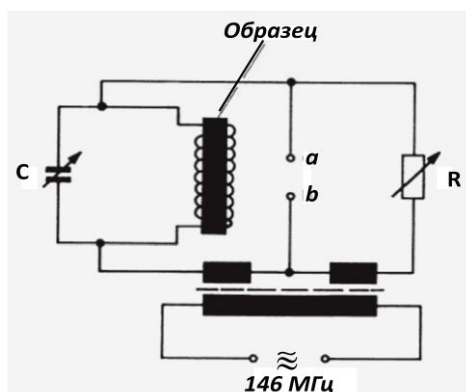
1 – катушки Гельмгольца; 2 – колебательный контур; 3 – катушка индуктивности, в которой располагается образец; 4 – осциллограф; 5 - кварцевый генератор (осциллятор).

ЭСР резонатор содержит два основных узла.

1. *Кварцевый-стабилизированный осциллятор* или кварцевый генератор. Кварцевый генератор вырабатывает высокочастотные колебания частотой 146 МГц (4) и передает их на мостовую схему резонатора.

2. *Мостовая схема*. Ветви моста содержат переменное сопротивление R и настраиваемый LC колебательный контур высокой частоты. Резонансную частоту колебаний LC – контура можно изменять, при этом меняется также полное сопротивление контура. Внутри катушки индуктивности находится образец – парамагнитное вещество.

Описание мостовой схемы резонатора.



В центре катушки индуктивности настраиваемого, высокочастотного LC - контура располагается образец (примерно 1 г дифенилпикрилгидразила). ДФПГ – это парамагнитное вещество.

При электронном спиновом резонансе, излучение контура сильно поглощается образцом. Сам парамагнитный образец

Рис. 6 Мостовая схема резонатора.

находится в изменяющемся с частотой 50 Гц магнитном поле, создаваемом катушками Гельмгольца (на рисунке 6 - отсутствуют – см. рис.5).

В обычном состоянии мостовая схема сбалансирована так, что сопротивление обеих ветвей моста одинаковое и напряжение на серединной ветви моста, между точками a и b равно нулю.

Если возникает резонансное поглощение излучения в парамагнитном образце, то полное сопротивление LC контура изменяется, следовательно, нарушается баланс моста и на серединной ветви моста (между a и b) появляется напряжение, которое и определяет ЭСР сигнал. Это напряжение U_{signal} передается на Y пластины осциллографа, а также может быть измерено вольтметром.

Резонансное поглощение излучения высокой частоты (146 МГц) веществом происходит при определенном (резонансном) значении магнитного поля B_r . Магнитное поле в образце создается катушками Гельмгольца.

Для определения B_r **без использования осциллографа**, на катушки Гельмгольца подают постоянное напряжение от источника питания 1 (рис. 1). Изменяя силу тока на магнитных катушках, добиваются максимального показания вольтметра, измеряющего напряжение между a и b (рис.6). Теперь, определив силу тока в катушках I_r , можем получить резонансное значение магнитного поля B_r .

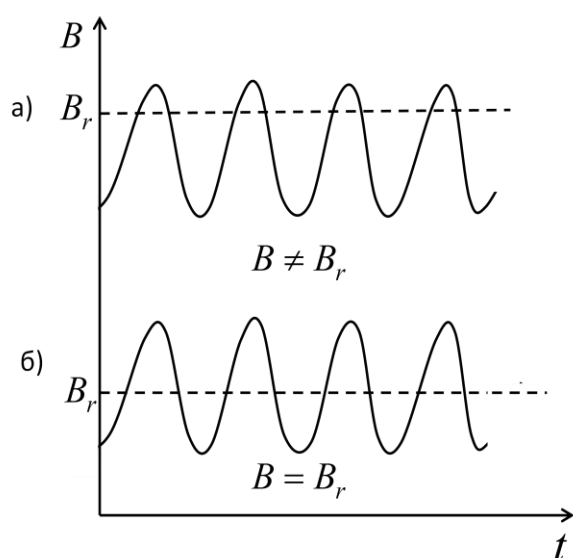


Рис. 7. Временная развертка индукции магнитного поля на катушках Гельмгольца:

а) $B \neq B_r$; б) $B = B_r$.

Для наблюдения этого явления **на дисплее осциллографа**, на катушки Гельмгольца от источника (1 на рис. 4) подается постоянное напряжение порядка $16B$, на которое накладывают небольшое по амплитуде переменное напряжение U ($U = 1...2$ В) частотой $\nu = 50$ Гц. В этом случае магнитное поле на образце изменяется, как показано на рис.7. Изменяя значение постоянного напряжения на катушках Гельмгольца, используя ручку регулировки напряжения на источнике (1, рис. 4), можно добиться, что переменная составляющая магнитного поля B будет симметрично осциллировать около постоянной составляющей B_r (рис. 7 б). При

этом через катушки Гельмгольца протекает модулированный ток $I = I_r + I_{\sim}$. Значение резонансного тока, соответствующее ЭСР при этом лежит посередине между крайним нижним и верхним значениями. В этом случае, значение среднего тока $\langle I \rangle = I_r$, регистрируемое с помощью амперметра 5, установленного в цепи постоянного тока универсального источника питания 1 (рис. 4) и катушек Гельмгольца 2 (рис. 4) или (1,рис. 5) соответствует I_r .

Соотношения между $U_{signal}(t)$ и $B(t)$ могут быть выведены на экран осциллографа. Если на X - отклоняющие пластины осциллографа подать переменное напряжение частота и фаза которого соответствует переменному напряжению на катушках Гельмгольца, а на пластины Y - напряжения U_{signal} , соответствующее резонансному поглощению ЭМ энергии LC- контуром с парамагнитным веществом, то на экране осциллографа появится ЭСР сигнал колоколообразной формы (рис. 8).

Эта кривая получается при прохождении электронного луча в одну сторону и в другую. Дважды за период магнитное поле проходит значение B_r - один раз во время возрастания,

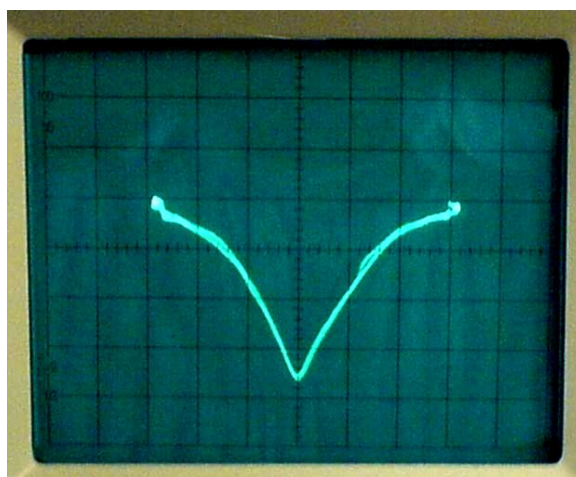


Рис. 8. Кривая резонансного поглощения в парамагнитном веществе (ДФПГ).

другой раз во время падения. Всякий раз, когда $B = B_r$, на серединной ветви моста появляется ЭСР сигнал U_{signal} . Эти два сигнала (в одну сторону и в другую) могут слегка отличаться по форме и амплитуде. Для определения I_r , пики этих сигналов должны быть совмещены и установлены в центре экрана. Тогда мультиметр, работающий в режиме амперметра (5 на рис.4) покажет величину резонансного тока I_r .

ЭСР сигнал можно регистрировать с помощью вольтметра, однако, использование осциллографа позволяет произвести более точную балансировку моста, а также делает возможным визуальное наблюдение линии резонансного поглощения и измерения ее

параметров. При этом форма сигнала должна быть максимально симметричной и значения U_{signal} в центре экрана для обоих сигналов (в ту и другую сторону) должны совпадать.

2. Внешний вид панелей приборов и описание функциональных кнопок.

1. Источник питания ЭСР резонатора.

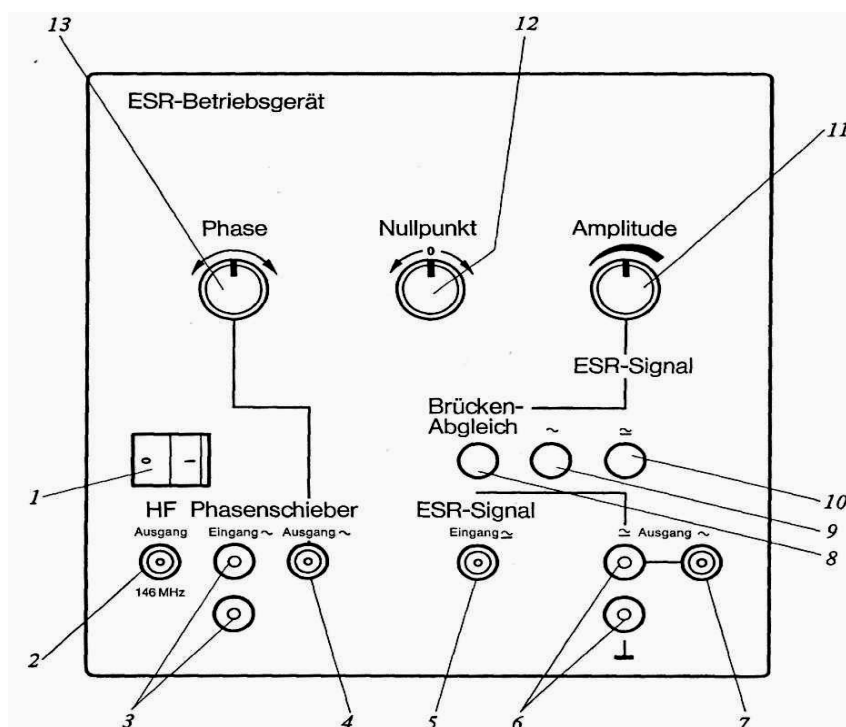


Рис. 9. Внешний вид панели источника питания ЭС – резонатора, содержащий кварцевый генератор высокочастотных колебаний ($\nu = 146$ МГц).

Источник ЭС - резонатора питается от сети 220 В.

1. Переключатель ВКЛ / ВЫКЛ с подсветкой.
2. Коаксиальный выход генератора ($\nu = 146$ МГц).
3. Вход для переменного сигнала (в данной работе используется сигнал $\nu = 50$ Гц от универсального источника питания).
4. Выход переменного сигнала.
5. Вход для модулированного сигнала.
6. Выход модулированного сигнала.
7. Коаксиальный выход для переменного сигнала, который подается на пластины X осциллографа.
8. Кнопка "Brückenabgleich" - балансировка моста.

Внимание: при балансировке моста (рис. 5), которую необходимо провести перед измерениями, кнопка 8 должна быть нажата.

9. Кнопка должна быть нажата, при выводе сигнала на экран осциллографа.
10. Кнопка должна быть нажата, если используется осциллограф и вольтметр одновременно.

11. Кнопка «Amplitude» вращается для регулировки уровня ЭСР сигнала.

12. Кнопка «Nullpunkt» - регулировка нуля.

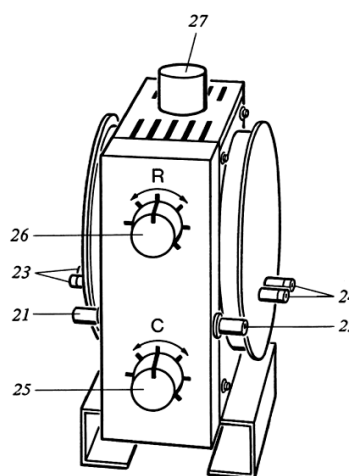
С помощью этой кнопки рабочая область усиленного ЭСР сигнала может быть скорректирована должным образом при условии нажатых кнопок 9 или 10. Эта область должна находиться в пределах измерения вольтметра. Если она выходит за пределы измерения в положительных или отрицательных значениях, то усилитель в таких условиях не пригоден для работы.

13. Кнопка «Phase» используется для согласования фаз сигналов при резонансе.

Вращая кнопку 13 можно изменять сдвиг фазы переменного сигнала, идущего к X - пластинам осциллографа.

2. ЭСР резонатор.

Рис. 10. ЭС – резонатор с парамагнитным образцом ДФПГ.



21 – коаксиальный вход для сигнала, подаваемого с выхода высокочастотного генератора ЭС – резонатора.

22 – коаксиальный выход для соединения с каналом 5 (на рис. 9) источника питания ЭС - резонатора.

23 – штыревой вход для подачи переменного напряжения от универсального источника питания (1 на рис. 4).

24 – штыревые входы. На один подается постоянное напряжение от универсального источника питания (1 на рис. 4), а другой соединен с одним из входов 23.

25 – ручка «С» предназначена для плавной регулировки ёмкости колебательного контура мостовой схемы.

26 - ручка «R» предназначена для плавной регулировки переменного сопротивления мостовой схемы.

27 – капсула, содержащая исследуемое парамагнитное вещество. Капсула с исследуемым веществом зафиксирована с помощью блокирующей кнопки. Для извлечения капсулы с ДФПГ необходимо слегка нажать на крышку колбы и повернуть колбу против часовой стрелки, до совпадения выступов на крышке колбы с пазами на корпусе. Для позиционирования капсулы с

ДФПГ необходимо совместить пазы на корпусе с выступами на колбе и повернуть колбу по часовой стрелке.

3. Проведение измерений.

Если мостовая схема резонатора уже сбалансирована, то можно приступить к выполнению части I эксперимента. При нарушении баланса мостовой схемы необходимо провести ее балансировку. Описание балансировки мостовой схемы резонатора (рис.6) приведено в приложении экспериментальной части IV (стр. 23).

Часть I. Определение g фактора Ланде с помощью осциллографа.

Регуляторы «R», «C» не трогать до появления сигнала на осциллографе!

1. Соберите установку, как показано на рисунке 11. На рис. 11 указаны следующие блоки установки:

- **I ЭПР резонатор:**

1- выходы катушек Гельмгольца;

2 – вход ВЧ сигнала 146 МГц;

3 – выход ЭСР сигнала.

- **II Источник питания ЭП резонатора**

4 – выход ВЧ сигнала 146 МГц;

5 – коаксиальный вход ЭСР сигнала

6 – коаксиальный выход ЭСР сигнала;

7 – коаксиальный выход сигнала 50 Гц;

8 – вход переменного сигнала 50 Гц;

- **III Осциллограф:**

9 – вход на X пластины;

10 – вход на Y пластины.

- **IV Источник питания:**

11 – переменное напряжения;

12 – постоянное напряжения.

13 – Мультиметр, работающий в режиме амперметра.

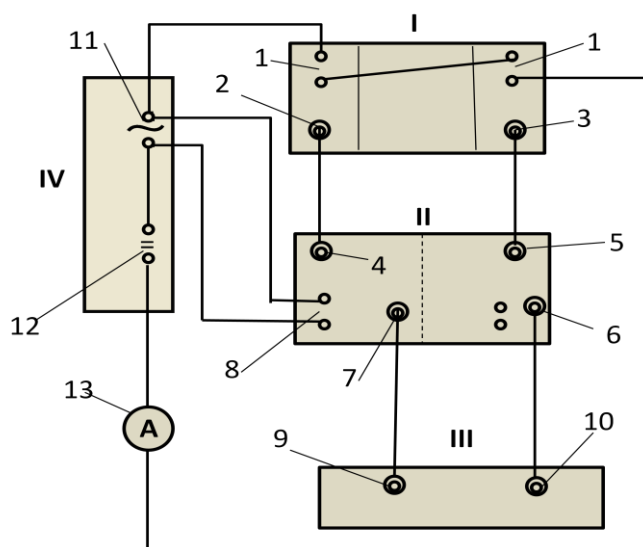


Рис.11 Схема установки для наблюдения ЭСР сигнала.

Мультиметр измеряет средний ток на катушках Гельмгольца (переключатель диапазона измерений должен быть установлен в положении 20 А; кнопкой «mode» установить режим «DC»).

2. На выходе *переменного* напряжения универсального источника питания установить значение напряжения 2 В.

3. Перед включением источника питания убедитесь, что

- поворотный выключатель *постоянного* напряжения V на универсальном источнике питания установлен в положение “0”;
- поворотный выключатель постоянного тока (помечен знаком “А”) – повернут вправо до упора, что соответствует значению тока 6 А.

4. Включить универсальный источник питания, источник питания ЭСР, осциллограф и в следующем порядке нажать на кнопки:

- нажать кнопку “Баланс моста”, расположенную на источнике питания ЭСР (8 рис. 9);
- нажать кнопку «DISPLAY» на осциллографе, затем клавишей «F3» установить режим XY;
- нажать $\frac{CH1}{MENU}$, затем клавишей «F1» установить режим «заземление» для X-канала;
- нажать $\frac{CH2}{MENU}$, затем кнопкой «F1» установить режим «DC»; для Y канала.
- регуляторами CH1 и CH2 установить чувствительность обоих каналов 1 в/см;
- наблюдайте сигнал в виде точки на осциллографе;
- расположить светящуюся точку в начале координат;
- после этого нажмите кнопку (~) (9 рис.9) на источнике питания ЭСР.
- выберите «DC» режим для X-канала осциллографа;
- наблюдайте горизонтальную линию на экране осциллографа;
- увеличивайте постоянное напряжение на универсальном источнике питания, до тех пор, пока не увидите на экране ЭСР сигнал. На цифровом мультиметре сигналу резонансного поглощения ЭМ энергии должно соответствовать значение тока 1,2-1,3 А.

5. После этого следует дополнительно настроить форму сигнала, сделав ее как можно более симметричной:

- а) регулятором “Phase”, нужно необходимо добиться четкого совмещения пиков линий резонансного поглощения;
- б) регулируя *постоянное* напряжение V на источнике питания добиться расположения резонансного пика в центре электронной развертки;
- в) регулируя емкость колебательного контура «С», необходимо придать сигналу колокообразную форму, с ярко выраженным минимумом и максимально симметричным по форме.

Сигнал резонансного поглощения должен выглядеть как на рис. 8.

Следует показать наблюдаемый ЭСР сигнал преподавателю.

6. Сила тока, измеряемая при этом мультиметром, и есть резонансный ток. Запишите его значение в табл.1

7. Значения резонансного тока необходимо измерить 5 раз, каждый раз настраивая ЭС-резонатор, выполнив последовательно п.1-7 экспериментальной части I. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№ опыта	Резонансный ток - I_r , А	Индукция магнитного поля - B_r , мТл, Расчетное значение.	Среднее значение индукции магнитного поля $\langle B_r \rangle$, мТл	Значение фактора Ланде, g	Среднее значение фактора Ланде, $\langle g \rangle$	$\langle g \rangle \pm \Delta g$
1						
2						
3						
4						
5						

Часть II. Определение полуширины линии резонансного поглощения ДФПГ.

Полуширина ЭПР сигнала ΔB определяется, как показано на рис.3 – она равна ширине линии на середине ее высоты:

$$\Delta B = B_2 - B_1.$$

1. На амперметре, используя кнопку «mode» установить режим измерения - «АС». При этом он показывает действующее значение переменного тока. Записать показания амперметра:

$$I_\delta = \dots [A].$$

2. Измерить *ширину развертки* электронного луча (так называемую, ширину «подошвы» сигнала) вдоль горизонтальной оси в малых делениях шкалы. Записать получившийся результат:

$$N_{\text{развертка}} = \dots [\text{мал.дел.}].$$

3. Рассчитайте цену малого деления шкалы в амперах:

$$\alpha = \frac{2 \cdot I_{\text{ампл}}}{N_{\text{развертка}}} = \frac{2,8 I_\delta}{N_{\text{развертка}}} = \dots \left[\frac{A}{\text{мал.дел.}} \right].$$

4. Масштабный коэффициент по оси ОХ указан в нижнем левом углу экрана, например: CH1 5V/дел. Запишите его:

$$k_1 = \dots [V / \text{дел}].$$

5. Измерить *ширину резонансной линии на середине ее высоты* (см.рис.3) как можно точнее в малых делениях шкалы осциллографа. Записать получившийся результат:

$$n_{\text{сигнал}} = \dots [\text{мал. дел.}].$$

Если линия очень узкая так, что затруднительно померить ее полуширину, можно изменить масштаб развертки по оси ОХ, вращая регулятор СН1 на осциллографе. Добейтесь, чтобы полуширина линии (ее ширина на середине высоты) была примерно 3-7 малых делений шкалы. Запишите масштабный коэффициент, например, 500 мВ/дел.:

$$k_2 = \dots [V / \text{дел}].$$

6. Определите полуширину резонансной линии в амперах:

$$\Delta I = n_{\text{сигнал}} \cdot \alpha \cdot \frac{k_1}{k_2} = \dots [A].$$

Если масштаб шкалы не изменялся, то $k_1 = k_2$ и

$$\Delta I = n_{\text{сигнал}} \cdot \alpha = \dots [A].$$

7. Теперь, по формуле (16) рассчитайте полуширину сигнала в Теслах. Запишите полученный результат:

$$\Delta B = \dots [Tл].$$

8. Сравните получившийся результат с литературными данными ($\Delta B_{\text{лит}} = 2,8 \cdot 10^{-4} Tл$).

Рассчитайте относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|\Delta B_{\text{лит}} - \Delta B|}{\Delta B_{\text{лит}}} \cdot 100\%.$$

Обработка экспериментальных данных таблицы 1.

1.Используя измеренные значения резонансного тока I_r , провести расчет индукции магнитного поля B_r по формуле (16). Результаты расчета занести в таблицу 1.

2.Рассчитать среднее арифметическое значение индукции магнитного поля $\langle B_r \rangle$, а результаты расчета занести в таблицу 1.

3.Используя формулу (15), рассчитать значение фактора Ланде, g – фактора, а результаты расчета занести в таблицу 1.

4.Рассчитать среднее арифметическое значение g – фактора. Полученное значение $\langle g \rangle$ занести в таблицу 1.

5.Рассчитать абсолютную погрешность ΔB по формуле: $\Delta B_r = t_{p,f} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \langle B \rangle)^2}{n(n-1)}}$.

Использовать для числа измерений $n = 5$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ следующее значение коэффициента Стьюдента $t_{p,f} = 2,78$.

Записать получившийся результат в виде: $B_r = \langle B_r \rangle \pm \Delta B_r$.

6. Рассчитать абсолютную погрешность $\Delta g = \langle g \rangle \frac{\Delta B}{\langle B \rangle}$.

7.Результаты расчета представить в виде: $\langle g \rangle \pm \Delta g$ и занести их в таблицу 1.

Часть III Измерение индукции магнитного поля B_r с помощью тангенциального датчика Холла.

Отключите осциллограф. Отключите источник питания ЭСР.

I ЭПР резонатор:

1- выходы катушек

Гельмгольца;

II Источник питания:

2 – постоянное напряжение;

3 – амперметр.

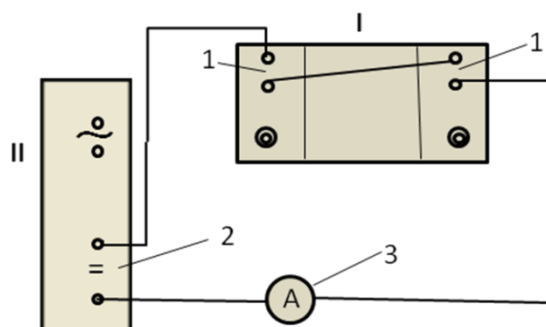


Рис.12 Подключение катушек Гельмгольца к источнику постоянного напряжения.

А. Подайте на катушки Гельмгольца постоянное напряжение. Для этого соберите установку, как показано на рис.12:

- Выключить переменное напряжение, вынув переключатель переменного напряжения из гнезда.
- Отключить кабель, соединяющий последовательно выходы постоянного и переменного напряжения на универсальном источнике питания.
- Оба выходных кабеля с катушек Гельмгольца должны быть подключены к «+» и «-» постоянного напряжения.

Б. Провести независимые измерения индукции резонансного магнитного поля $B_r^{изм}$ с помощью тангенциального датчика Холла. Для этого следует использовать измеритель магнитной индукции (магнитометр).

Порядок измерений:

- Включить магнитометр с подключенным датчиком Холла.
- Установить диапазон измерений в мТл.
- Ручкой «установка нуля» выставить ноль.
- Убрав образец из резонатора, поместить датчик Холла в центральную часть катушки индуктивности LC – контура.
- Подать на катушки Гельмгольца резонансный ток I_r .
- Вращая датчик Холла вокруг его оси, зафиксировать максимальное значение магнитной индукции, записать его:

$$B_r^{изм} = \dots \text{мТл}.$$

Провести пять независимых измерений индукции магнитного поля $B_r^{изм}$ при пяти разных значениях резонансного тока (взятых из таблицы 1).

2. Определить среднее значение индукции магнитного поля $\langle B_r^{изм} \rangle$, мТл.

3. Определить абсолютную погрешность измерений по формуле $\Delta B = t_{p,f} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \langle B \rangle)^2}{n(n-1)}}$.

Использовать для числа измерений $n = 5$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ следующее значение коэффициента Стьюдента $t_{p,f} = 2,78$.

Записать получившийся результат в виде: $B_r^{изм} = \langle B_r^{изм} \rangle \pm \Delta B$.

4. Используя получившееся значение $B_r^{изм}$, рассчитать значение фактора Ланде $g^{изм}$ по формуле (15). Сравнить полученное значение $g^{изм}$ и значение, полученное в таблице 1 с теоретически ожидаемым. Сделать вывод.

Контрольные вопросы.

1. Механический и магнитный момент электрона. Гиромагнитное отношение.
2. Магнитный момент атома. Квантовые числа.
3. Квантование магнитного момента.
4. Атом во внешнем поле.
5. Электронный спиновый резонанс, сущность явления.
6. Физический смысл фактора Ланде.
7. Физическая сущность метода измерения фактора Ланде при помощи электронного парамагнитного резонатора.
8. Основные узлы и принцип действия резонатора.
9. Область применения ЭСР.
10. Вывод расчетной формулы для фактора Ланде.
11. Принцип действия датчика Холла.
12. Чем определяется ширина линии резонансного поглощения.

Часть IV. Дополнительная. Баланс мостовой схемы.

1. Соберите установку, как показано на рис. 13, не подключая резонатора к осциллографу и источнику питания магнитных катушек.

Мультиметр работает в режиме вольтметра (переключатель в положении $\simeq V$, кнопкой «mode» установить режим DC) - измеряет напряжения между точками а и б (рис. 6). Напряжение снимается с выхода 6 (рис.9) источника питания ЭС резонатора.

2. В начале настройки регулятор 26 «R» переменного сопротивления должен находиться примерно в среднем положении; регулятор 25 «C» следует повернуть против часовой стрелки до упора.

I ЭПР резонатор:

- 1- выходы катушек Гельмгольца;
- 2 – вход ВЧ сигнала 146 МГц;
- 3 – выход ЭПР сигнала;
- 4 – коаксиальные кабели.

II Источник питания ЭПР резонатора:

- 5 – выход ВЧ сигнала 146 МГц;
- 6 – вход ЭСР сигнала;
- 7 – выход ЭСР сигнала (со средней ветви моста);
- 8 – вольтметр измеряет напряжение на средней ветви моста.

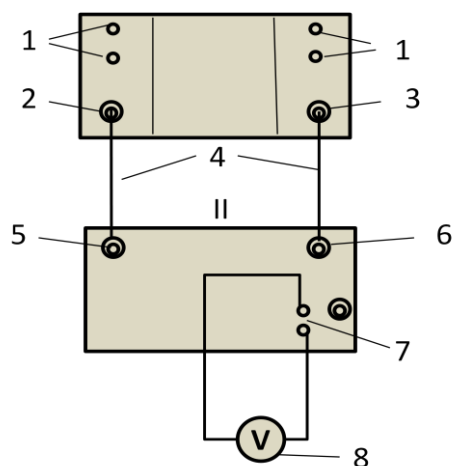


Рис.13 Схема установки при балансировке моста.

3. В начале настройки при нажатой кнопке 8 ручки 12 «Нулевая точка» операционного блока должна быть отрегулирована так, чтобы показания вольтметра оказались в диапазоне 0 ... 0,4 V шкалы.
4. Настройка моста колебательного контура выполняется с помощью ручки настройки "С" (25 на рис. 10) резонатора. Для этого:
 - а) Вращением ручки «С» на резонаторе по часовой стрелке зарегистрируйте сначала небольшое возрастание (возможно), а затем резкое падение напряжения на вольтметре. Для нахождения острого минимума необходимо повернуть регулятор «С» примерно на 3-4 оборота или 10 оборотов (в зависимости от установки) по часовой стрелке.
 - б) Плавным вращением регулятора «С» необходимо добиться экстремального показания вольтметра (примерно от -0,200 до -0,700 В).
 - в) После этого ручкой «Nullpunkt» (12 на рис.9) установите показания вольтметра близкое к нулю.

Список литературы

- 1.Л.К. Мартинсон, Е.В. Смирнов. Квантовая физика: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 496 с.: ил. (Физика в техническом университете/ под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н. Морозова)
- 2.Б.Е. Винтайкин Физика твердого тела: Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.: ил. (Физика в техническом университете/ под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н. Морозова)