

## Работа 7 ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В СЛАБЫХ ПОЛЯХ

*Цель работы* Наблюдение явления электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в слабых полях. Исследование зависимости величины сигнала ЭПР от взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей. Исследование зависимости резонансной частоты ЭПР от индукции постоянного магнитного поля. Определение g-фактора электрона. Измерение горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля Земли.

### 7.1 Физическая природа магнитного резонанса

В магнитном поле происходит расщепление вырожденных уровней энергии атомов на невырожденные подуровни вследствие того, что магнитные моменты атомов могут ориентироваться по отношению к магнитному полю разными способами. Это приводит, во-первых, к магнитному расщеплению спектральных линий, соответствующих переходам между различными уровнями энергии и, во-вторых, к появлению вынужденных излучательных переходов между подуровнями данного уровня энергии.

Явление расщепления спектральных линий и уровней энергии в магнитном поле называют *явлением Зеемана*.

Вынужденные переходы между зеемановскими подуровнями данного уровня энергии называют *магнитным резонансом*. Эти переходы происходят под действием электромагнитного излучения боровской частоты  $\nu = (E_n - E_m) / h$ , т.е. при наличии резонанса. Частоты данных переходов лежат в радиочастотной области спектра и изучаются радиоспектроскопическими методами.

Впервые магнитный резонанс наблюдали в 1938 г. Раби и его сотрудники в молекулярных пучках. Сначала были обнаружены резонансные переходы, обусловленные ядерными магнитными моментами протона и дейтрона, а затем (в 1940г.) резонансные переходы, обусловленные электронными магнитными моментами атомов.

Наблюдение магнитного резонанса в молекулярных пучках является очень сложным по своей экспериментальной технике. Поэтому исследования этого явления стали широко развиваться лишь после открытия Е. Завойским (1944 г., г.Казань) *электронного парамагнитного*

резонанса (ЭПР) – поглощения микроволнового излучения веществом за счёт переходов между зеемановскими подуровнями, связанными с электронными магнитными моментами частиц вещества (определяющими парамагнитные свойства вещества, откуда и название "парамагнитный резонанс").

В 1945 г. американские исследователи (Парселл и другие) открыли ядерный парамагнитный резонанс (ЯМР) – поглощение веществом излучения в области коротких радиоволн, обусловленное ядерными магнитными моментами.

## 7.2 Расщепление уровня энергии частицы с электронным магнитным моментом

Как отмечалось, частица с магнитным моментом  $\vec{\mu}$  приобретает в магнитном поле дополнительную энергию  $E_{\text{маг}}$ , величина которой определяется формулой (В.5). Если ось  $Z$  выбрать в направлении вектора  $\vec{B}$ , то эту формулу можно переписать так:

$$E_{\text{маг}} = -\mu_z B. \quad (7.1)$$

Так как проекция магнитного момента квантуется, то и энергия  $E_{\text{маг}}$  приобретает ряд дискретных значений, которые добавляются к энергии  $E$  невозмущённой частицы. Таким образом, происходит расщепление энергетического уровня  $E$  на ряд подуровней  $E + E_{\text{маг}}$ .

Пусть частица (атом или молекула) обладает лишь электронным магнитным моментом. Тогда (с учётом формулы (В.37)) её дополнительная энергия окажется равной

$$E_{\text{маг}} = g\mu_B B m_J, \quad (7.2)$$

причём магнитное квантовое число  $m_J$  принимает значения, определяемые формулой (В.38). Следовательно, происходит расщепление уровня  $E$  на  $2J+1$  эквидистантных подуровней энергии. Пример такого расщепления приведён на Рис.7.1 для случая атома с квантовым числом полного момента  $J=3/2$ .

Спонтанные излучательные переходы между магнитными подуровнями энергии маловероятны из-за ограничений, связанных с законом сохранения чётности. Однако могут происходить вынужденные переходы между соседними подуровнями под действием внешнего

электромагнитного поля, если частота этого поля удовлетворяет правилу частот Бора  $\hbar\omega = g\mu_B B |\Delta m_J|$

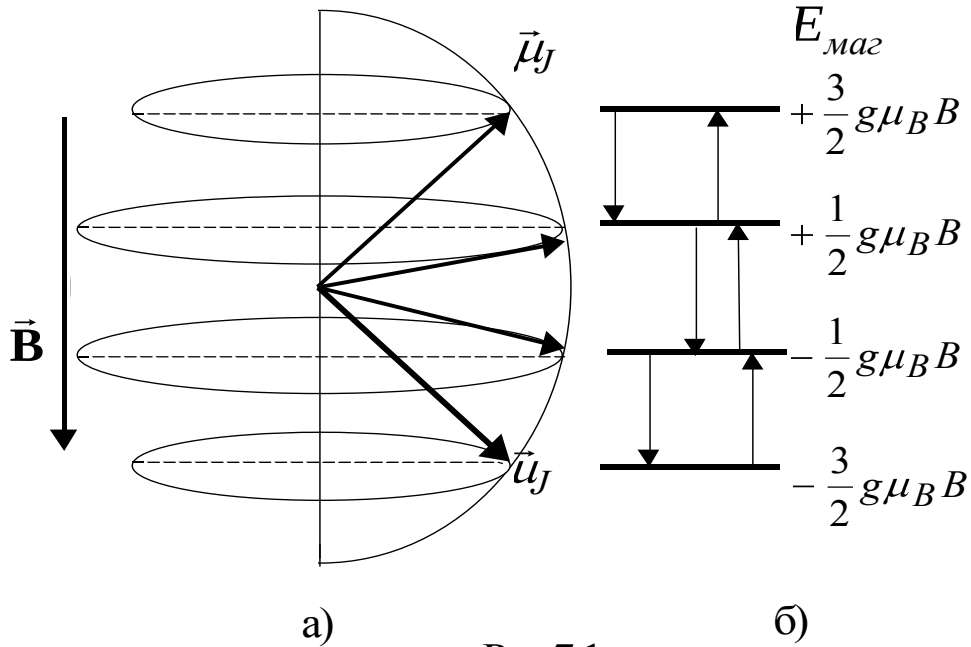


Рис.7.1

Каждому подуровню энергии соответствует определенная ориентация магнитного момента  $\vec{\mu}_J$  по отношению к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ . При этом вектор  $\vec{\mu}_J$  совершает прецессию, описывая коническую поверхность, ось которой совпадает с направлением  $\vec{B}$ . Поскольку набор углов между векторами  $\vec{\mu}$  и  $\vec{B}$  составляет дискретный ряд из  $2J+1$  значений, то об этом говорят как о *пространственном квантовании*.

Поскольку для соседних подуровней  $|\Delta m_J|=1$ , условие вынужденного перехода приобретает вид

$$\omega_{ЭПР} = g \frac{\mu_B}{\hbar} B, \quad (7.3)$$

которое и определяет циклическую частоту электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). При этом следует иметь в виду, что с равной вероятностью реализуются обе разновидности вынужденных переходов, соответствующие как испусканию, так и поглощению фотона. Излучательные переходы между более далёкими уровнями не

происходят: они запрещены правилом отбора по магнитному квантовому числу.

Частота ЭПР, выражающаяся в герцах, может быть легко получена из формулы (7.3)

$$\nu_{\text{ЭПР}} = g \frac{\mu_B}{h} B \quad (7.4)$$

Нетрудно убедиться, что при типичном значении магнитной индукции  $B = 0,1$  Тл частота ЭПР имеет порядок  $10^4$  МГц, что соответствует длине волны  $\lambda = 3$  см. В этом диапазоне работает большинство ЭПР-спектрометров. При магнитной индукции около 1 Гс ( $10^{-4}$  Тл) частота ЭПР имеет порядок 10 МГц. Именно этот случай исследуется в данной лабораторной работе.

### 7.3 Классическая модель гироскопа применительно к ЭПР

Для более детального описания магнитного резонанса можно воспользоваться классической моделью гироскопа. В постоянном магнитном поле момент импульса частицы, обладающей магнитным моментом, совершает прецессию, аналогичную прецессии волчка под действием силы тяжести.

Эта прецессия возникает в результате появления "опрокидывающего" момента силы

$$|\vec{N}| = \mu_J B \sin \alpha \quad (7.5)$$

и состоит в том, что вектор магнитного момента  $\vec{\mu}_J$ , а также связанный с ним вектор момента импульса  $\vec{J}$  описывают коническую поверхность, ось которой направлена вдоль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ , причём угол  $\alpha$  между осью и вектором  $\vec{J}$  остаётся неизменным (Рис.7.2). Угловая скорость  $\omega_{np}$  этого движения и является частотой прецессии.

Частоту прецессии легко найти. За малый промежуток времени  $\Delta t$  вектор момента импульса  $\vec{J}$  повернётся на угол  $\omega_{np} \cdot \Delta t$ , а его изменение окажется равным (см. Рис.7.2)  $|\Delta \vec{J}| = (J \sin \alpha) \omega_{np} \cdot \Delta t$ . Отсюда для скорости изменения момента импульса получаем

$$\frac{|\Delta \vec{J}|}{\Delta t} = \omega_{np} J \sin \alpha,$$

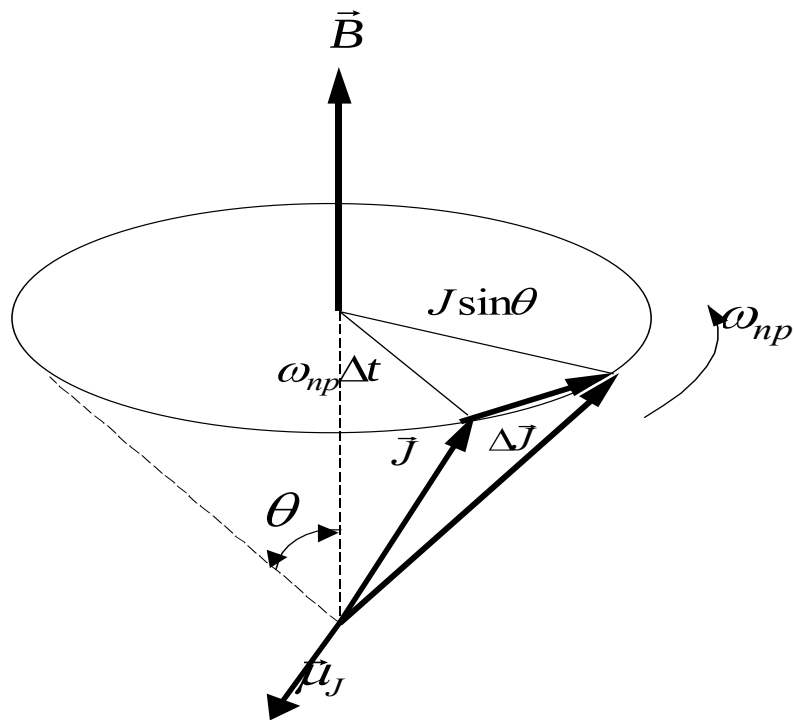


Рис.7.2

что в соответствии с законами динамики для вращательного движения должно равняться моменту силы (7.5). Следовательно, циклическая частота прецессии (с учётом формулы (26)) равна

$$\omega_{np} = \frac{\mu_J}{J} B = g \frac{\mu_B}{\hbar} B. \quad (7.6)$$

Подвергнем теперь прецессирующий магнитный момент действию слабого циркулярно поляризованного переменного электромагнитного поля, магнитный вектор которого  $\vec{B}_v$  вращается в плоскости, перпендикулярной оси прецессии (Рис.7.3).

Такое переменное поле  $\vec{B}_v$  способно изменить ориентацию магнитного момента лишь в том случае, если частота поля (а, следовательно, и частота вращения вектора  $\vec{B}_v$ ) совпадает с частотой прецессии  $\omega_{np}$ . Это напоминает хорошо известное явление резонанса, происходящее при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы. В данном случае собственной частотой является частота прецессии, а вынуждающую силу

создаёт магнитная компонента переменного электромагнитного поля.

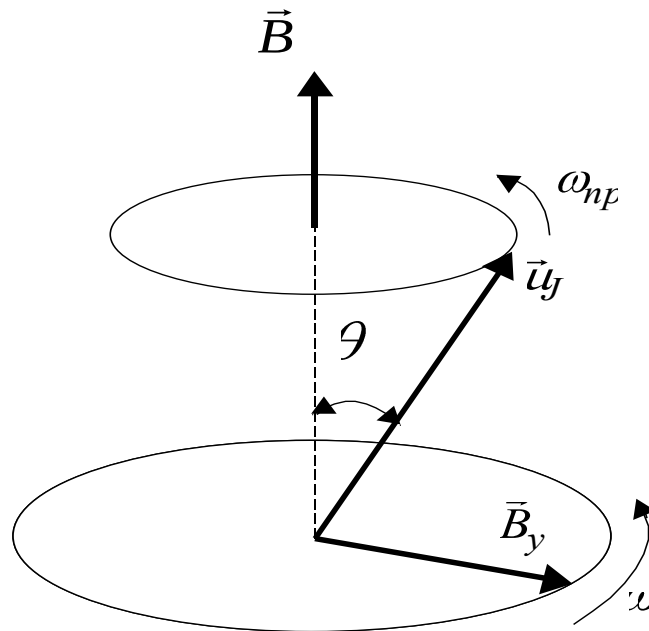


Рис.7.3

Отсюда следует, что термин. "магнитный резонанс" физически вполне оправдан, а резонансная частота  $\omega_{ямр}$  определяется очевидным соотношением

$$\omega_{эпр} = \omega_{np} = g \frac{\mu_B}{\hbar} B, \quad (7.7)$$

которое совпадает с выражением (7.3), полученным с помощью правила частот Бора.

Если же частота прецессии и частота переменного поля различны (или направления вращения противоположны даже при совпадении частот), то взаимная ориентация векторов  $\vec{\mu}_J$  и  $\vec{B}_v$  будет непрерывно меняться, а результирующее воздействие поля  $\vec{B}_v$  на магнитный момент будет отсутствовать.

На практике вместо циркулярно поляризованного переменного магнитного поля применяют линейно поляризованное. Как известно, его можно представить в виде суммы двух противоположно вращающихся полей. Соответствующее резонансное воздействие на магнитные моменты осуществит та из двух составляющих, которая вращается в направлении их прецессии.

## 7.4 Физические принципы регистрации ЭПР

Регистрация парамагнитного резонанса (электронного или ядерного) основывается на том, что в исследуемом веществе, помещённом в постоянное магнитное поле, может происходить поглощение электромагнитного излучения, частота которого удовлетворяет соотношению (7.4).

Чтобы понять физическую причину поглощения излучения, следует обратиться к квантовой модели явления, в соответствии с которой при магнитном резонансе происходят вынужденные излучательные переходы между соседними магнитными подуровнями энергии.

Переход с нижнего подуровня на верхний сопровождается поглощением фотона, а переход с верхнего уровня на нижний – испусканием фотона. Поскольку магнитные подуровни являются невырожденными, то вероятности этих переходов в точности равны между собой. Очевидно, результирующее поглощение излучения будет происходить только в том случае, если заселённость верхнего подуровня меньше заселённости нижнего.

Именно такая ситуация реализуется при термодинамическом равновесии. В этом случае, согласно распределению Больцмана, отношение заселённости  $N_1$  нижнего подуровня  $E_1$  к заселённости  $N_2$  верхнего подуровня  $E_2$  оказывается равным:

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) = \exp\left(\frac{g\mu_B B}{kT}\right) \quad (7.8)$$

Здесь  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура по шкале Кельвина. Следует отметить, что в типичных условиях наблюдения ЭПР различие в заселённостях невелико. Так, при магнитной индукции  $B = 0,22 \text{ Тл}$  и при комнатной температуре  $T = 300 \text{ К}$  отношение заселённостей отличается от 1 лишь на одну тысячную долю, т.е.  $N_1 / N_2 = 1,001$ .

Происходящие в веществе под действием излучения квантовые переходы, очевидно, приводят к выравниванию заселённостей  $N_1$  и  $N_2$ . Однако внутренние взаимодействия в веществе стремятся восстановить термодинамическое равновесие, а следовательно, и больцмановское распределение. Освобождающаяся при этом энергия отдаётся веществу, в результате чего исследуемый образец немного нагревается. Характерное время этого процесса  $T_1$  называется *временем*

*спин-решёточной релаксации.* Чем меньше время релаксации, тем быстрее устанавливается тепловое равновесие и тем большая энергия (при прочих равных условиях) отбирается образцом от источника высокочастотной мощности. Значения  $T_1$  лежат в пределах от 0,1 мс для растворов парамагнитных солей до нескольких часов для очень чистых диамагнитных кристаллов.

Время спин-решёточной релаксации играет важную роль при проведении эксперимента. При обычной постановке опыта резонансное поглощение наблюдается в установке, в которой частота переменного поля  $\nu$  или величина постоянного поля  $\vec{B}$  периодически меняется, совершая колебания около резонансных значений. При прохождении резонанса происходит увеличение отбора энергии от высокочастотного генератора. Очевидно, достаточно интенсивный сигнал ЭПР будет наблюдаться лишь в том случае, если время между двумя последовательными прохождениями через резонанс окажется значительно больше времени  $T_1$ . Только при этом условии будет успевать восстанавливаться больцмановская разность заселённостей подуровней.

Если увеличить мощность высокочастотного излучения, то в конце концов наступает такое состояние, когда процессы релаксации не в состоянии перекрыть поток входящей энергии. При этом населённости  $N_1$  и  $N_2$  оказываются почти одинаковыми, и величина сигнала магнитного резонанса существенно уменьшается.

Если каким-либо искусственным способом создать инверсию заселённостей, когда  $N_2 > N_1$ , то вещество, наоборот, будет не поглощать, а усиливать электромагнитное излучение резонансной частоты. На этом принципе действуют квантовые усилители.

Электронный парамагнитный резонанс наблюдается во всех веществах, в которых имеются неспаренные (нескомпенсированные) электроны. Неспаренные электроны могут быть как связанными, так и свободными. Так, в электронных оболочках атомов и ионов электроны связаны, причём в большинстве случаев электроны образуют замкнутые оболочки. Замкнутые электронные оболочки не приводят к появлению у атома и иона парамагнетизма, так как у такой оболочки спиновый и орбитальный моменты импульса равны нулю и нет магнитного момента. Однако незаполненные электронные оболочки имеют магнитный момент, и наличие их приводит к появлению парамагнетизма у атомов или ионов. Наиболее известными парамагнитными ионами являются



ионы группы железа  $V^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , ... с незаполненной внешней электронной оболочкой и ионы редкоземельных элементов, у которых парамагнетизм обусловлен незаполненной внутренней электронной оболочкой.

ЭПР легко наблюдается на *свободных радикалах* – молекулах с незаполненной химической связью. В таких молекулах, по крайней мере, один электрон не спарен. Именно неспаренные электроны свободных радикалов приводят к их повышенной химической активности. Обычно радикалы образуются в ходе химических реакций, благодаря чему метод ЭПР позволяет исследовать кинетику таких реакций.

Для калибровок ЭПР-спектрометров часто используют стабильный свободный радикал дифинилпикрилгидразил (ДФПГ) с одним неспаренным электроном в молекуле. У этого электрона отсутствует орбитальный магнетизм, вследствие чего его магнитный момент практически не отличается от спинового магнитного момента свободного электрона.

Электронный парамагнитный резонанс стал одним из самых мощных методов физического исследования. Область применения ЭПР очень широка. В ионных кристаллах он позволяет определить структуру энергетических уровней магнитных центров, тонкие детали строения кристаллической решётки и параметры, характеризующие кинетику намагничивания. Для физики ядра парамагнитный резонанс ценен как метод определения ядерных моментов и как один из наиболее эффективных способов поляризации ядер.

Особенно плодотворен метод парамагнитного резонанса в химии. Он впервые позволил детектировать свободные радикалы в количествах до  $10^{-13}$  моля. Успешно применяется парамагнитный резонанс в исследованиях биологических объектов.

## **7.5 Спектрометр электронного парамагнитного резонанса**

Спектрометр ЭПР, используемый в данной лабораторной работе, предназначен для исследования электронного парамагнитного резонанса в слабых магнитных полях от 4 до 7 Гс, что соответствует резонансным частотам порядка 10 МГц. В этом случае исследуемое вещество помещается не в резонатор, как в спектрометрах СВЧ-диапазона, а в катушку индуктивности, составляющую часть контура электронного автогенератора или индуктивно связанную с ним.

Структурная схема ЭПР-спектрометра представлена на Рис.7.4.

В этом спектрометре однородное постоянное магнитное поле создаётся с помощью катушек Гельмгольца, которые представляют собой два коаксиальных кольца одного радиуса с одинаковым числом витков, причём расстояние между центрами колец в точности равно их радиусу. Величины магнитной индукции  $B$  между кольцами может быть рассчитана по формуле

$$B = 0,8992 i \frac{N}{r}. \quad (7.9)$$

Здесь  $B$  выражается в гауссах,  $i$  – ток колец в амперах,  $N$  – количество витков в кольце,  $r$  – средний радиус кольца в сантиметрах.

В нашем спектрометре  $N = 300$ ,  $r = 4,27$  см.

Между кольцами Гельмгольца находится небольшая катушка индуктивности, включенная в колебательный контур генератора (автодина), частоту которого можно перестраивать в диапазоне от 11000 до 20000 кГц.

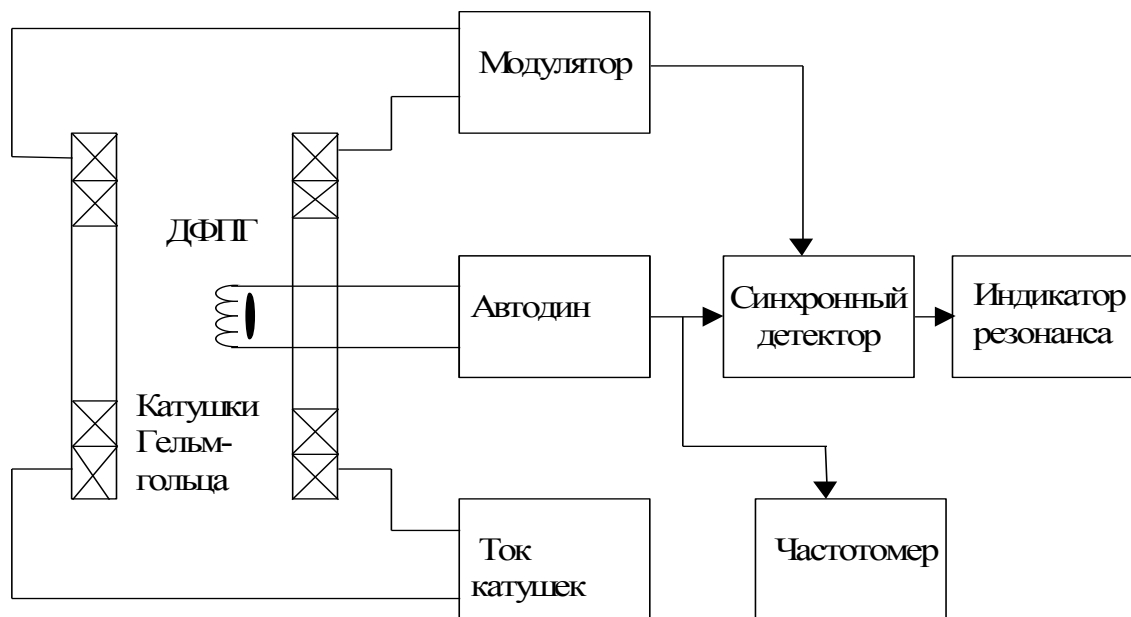


Рис.7.4

Внутри этой катушки и помещено исследуемое вещество, в данном случае образец, содержащий дифинилпикрилгидразил (ДФПГ). Для получения максимального сигнала ЭПР ось катушки индуктивности должна быть ориентирована перпендикулярно оси колец Гельмгольца.

Чувствительность спектрометра повышена за счёт применения модуляционного метода регистрации сигнала. Суть его состоит в том, что на постоянное магнитное поле  $B$  накладывается изменяющееся со звуковой частотой 250 Гц поле модуляции. В результате магнитная индукция в исследуемом веществе испытывает небольшие периодические изменения, или, как говорят, «качается» возле значения  $B$ . (Величину  $B$  можно регулировать путём изменения тока катушек Гельмгольца). Далее синхронный детектор, опорное напряжение которого формируется из напряжения модуляции, выделяет изменения амплитуды высокочастотного напряжения автодина, происходящие в ходе «качаний» постоянного магнитного поля. Эти изменения вызываются тем, что по мере приближения магнитной индукции постоянного поля к резонансному значению возрастает поглощение высокочастотного поля веществом и, соответственно, убывает амплитуда напряжения автодина. В результате на выходе синхронного детектора появляется сигнал, пропорциональный первой производной от сигнала поглощения, представляющего собой убыль амплитуды автодина. Сигнал с выхода синхронного детектора поступает на стрелочный индикатор резонанса. Критерием настройки на резонанс является нулевое показание стрелочного прибора, причём при повороте ручки регулировки тока в разные стороны от резонансного положения стрелка индикатора должна отклоняться в разные стороны.

Поле модуляции создается катушками модуляции, которые располагаются на том же каркасе, что и катушки Гельмгольца. Катушки модуляции питаются от модулятора, состоящего из генератора модуляции и усилителя мощности.

Эксперимент по наблюдению явления магнитного резонанса можно проводить двумя способами: путём изменения либо тока катушек Гельмгольца, либо частоты автодина. Обычно в ходе опытов частоту автодина устанавливают постоянной, а изменяют ток катушек Гельмгольца.

Конструктивно спектрометр состоит из двух частей: магнитной системы с датчиком автодина и блока управления и индикации.

Магнитную систему образуют катушки Гельмгольца и катушки модуляции. Датчиком автодина служит катушка индуктивности с расположенным внутри образцом ДФПГ. Датчик можно поворачивать, так чтобы ориентация его оси изменялась от перпендикулярной до параллельной по отношению к катушкам Гельмгольца, а следовательно, и к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ . Отсчёт  $180^\circ$  на лимбе датчика соответствует перпендикулярной ориентации, а  $90^\circ$  – параллельной.

Магнитная система с датчиком автодина размещается на специальном кронштейне, причём конструкция кронштейна предусматривает два независимых поворота всей системы вокруг горизонтальной и вертикальной осей и измерение углов поворота с помощью градусных лимбов.

Блок управления и индикации содержит систему питания и измерения тока катушек Гельмгольца, модулятор, автодин, синхронный детектор, индикатор резонанса и частотомер. Для дополнительной индикации резонанса предусмотрено также подключение осциллографа. Частоту автодина можно устанавливать в пределах от 11 до 20 МГц. Ток катушек Гельмгольца регулируется от 20 до 195 мА.

## **7.6 Порядок работы на спектрометре. Измерения**

Прежде всего необходимо подготовить спектрометр к работе. Для этого следует установить углы поворота магнитной системы в вертикальной и горизонтальной плоскостях на  $0^\circ$ , а угол поворота датчика автодина на  $180^\circ$ . После этого включают питание с помощью сетевого выключателя на задней стенке блока управления и устанавливают частоту автодина 15000 кГц. Ручкой регулировки тока катушек производят настройку на резонанс. Далее с помощью тумблера на передней панели изменяют направление тока катушек и снова добиваются настройки на резонанс.

Возможное влияние направления тока на настройку резонанса связано с тем, что кроме поля, создаваемого катушками Гельмгольца, на вещество действует также магнитное поле Земли, точнее, та его компонента, которая направлена вдоль оси катушек. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при выполнении последующих упражнений.

Очевидно, что на работу спектрометра могут влиять ещё и нерегулярные магнитные поля, создаваемые находящимися поблизости железными предметами. Поэтому магнитную систему спектрометра следует располагать как можно дальше от таких предметов.

***Упражнение 1. Исследование зависимости величины сигнала поглощения ЭПР от взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей.***

При частоте автодина 15000 кГц и угла поворота датчика  $\varphi = 180^\circ$  настройте спектрометр на резонанс. Увеличивайте ток катушек до получения максимального отклонения стрелки индикатора настройки  $I$ ,

пропорционального величине сигнала поглощения. Поворачивая датчик автодина через  $10^\circ$  в сторону меньших углов вплоть до  $90^\circ$ , измерьте значения  $I$ . Результаты запишите в таблицу и постройте график зависимости  $I = f(\varphi)$ , откладывая по оси абсцисс  $\varphi$  в градусах, а по оси ординат  $I$  в относительных единицах, численно равных показаниям стрелочного индикатора в мкА.

**Упражнение 2. Исследование зависимости резонансной частоты ЭПР от индукции постоянного магнитного поля.**

Экспериментальная часть этого упражнения состоит в том, что при фиксированных частотах находят резонансные значения тока катушек Гельмгольца. Чтобы исключить влияние магнитного поля Земли, необходимо проводить по два измерения тока при противоположных его направлениях  $i_{\rightarrow}$  и  $i_{\leftarrow}$ , а для нахождения резонансного значения магнитной индукции  $B$  использовать их среднее значение  $i = (i_{\rightarrow} + i_{\leftarrow}) / 2$ . Измерения следует провести для 10 значений частоты через 1000 кГц от 11000 кГц до 20000 кГц при угле поворота датчика  $180^\circ$ . Результаты измерений и их последующей обработки записывают в таблицу.

| н, кГц                 | 11 000 | 12 000 | ..... | 20 000 |
|------------------------|--------|--------|-------|--------|
| $i_{\rightarrow}$ , мА |        |        |       |        |
| $i_{\leftarrow}$ , мА  |        |        |       |        |
| $i$ , мА               |        |        |       |        |
| $B$ , Гс               |        |        |       |        |
| $B$ , $10^{-3}$ Тл     |        |        |       |        |

Далее следует построить график зависимости  $\nu = f(B)$ , откладывая по оси  $X$  индукцию магнитного поля  $B$  в теслах, а по оси  $Y$  – частоту  $\nu$  в килогерцах. Если окажется, что экспериментальные точки достаточно хорошо укладываются на прямую, можно продолжить дальнейшую обработку полученных данных. В случае грубых отклонений некоторых точек от прямой необходимо произвести повторные измерения. По методу наименьших квадратов находят наилучшее значение коэффициента  $k$  линейной зависимости

$$\nu = k B$$

и среднеквадратичную ошибку этого коэффициента  $\Delta k$ . Используя наилучшее значение  $k$ , с учётом условия магнитного резонанса (7.2) вычисляют наилучшее значение  $g$ -фактора электрона  $g_e$  и его среднеквадратичную ошибку  $\Delta g_e$ . Предварительно надо вычислить отношение  $\mu_B / h$  в единицах кГц/Тл, основываясь на значениях фундаментальных констант.

Находят среднее значение  $g_{ср}$  из наклона графика, сравнивают его с наилучшим значением  $g_e$ , найденным по методу наименьших квадратов, и делают окончательный вывод о величине  $g$ -фактора электрона. Используя  $g_e$ , находят абсолютную величину проекции магнитного момента электрона  $|\mu_{sz}|$ , выразив её в магнетонах Бора  $\mu_B$ , а также в единицах Дж/Тл.

### ***Упражнение 3. Измерение индукции магнитного поля Земли.***

Непосредственное наблюдение сигнала ЭПР в магнитном поле Земли невозможно из-за малой величины сигнала, пропорциональной квадрату магнитной индукции  $B$ . По этой причине в данной работе используется метод добавочного поля, создаваемого катушками Гельмгольца.

На образец действует векторная сумма двух магнитных полей: земного и создаваемого катушками. При изменении направления магнитного поля катушек (с помощью переключателя направления тока) происходит сдвиг резонансного значения тока катушек, величина которого соответствует удвоенной проекции магнитной индукции поля Земли на ось катушек Гельмгольца.

Измерения рекомендуется проводить при частоте автодина равной 15000 кГц и угле поворота датчика  $180^\circ$ .

Сначала следует измерить вертикальную составляющую магнитной индукции поля Земли  $B_{верт}$ . Для этого ось катушек Гельмгольца надо установить в вертикальное положение и настроиться на резонанс при двух направлениях тока катушек. Получившаяся разность значений резонансных токов  $\Delta i = |i_{\rightarrow} - i_{\leftarrow}|$  и даст при подстановке её в формулу (7.9) удвоенное значение  $B_{верт}$ . Чтобы измерить подобным образом горизонтальную составляющую  $B_{гор}$  земного магнетизма, ось катушек

надо привести в горизонтальное положение и установить её в плоскости магнитного меридиана. Плоскость магнитного меридиана можно определить с помощью компаса.

Найденные значения составляющих  $B_{верт}$  и  $B_{гор}$  следует использовать для вычисления модуля вектора индукции магнитного поля Земли  $B_{зем}$ .

## 7.7 Задание

1. Подготовить спектрометр к работе и освоить процедуру нахождения резонансных значений тока катушек Гельмгольца.

2. Выполнить экспериментальное исследование зависимости величины сигнала поглощения ЭПР от взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей. Построить график зависимости величины сигнала поглощения от угла поворота датчика и проанализировать его ход.

3. Выполнить исследование зависимости резонансной частоты ЭПР от индукции постоянного магнитного поля. Построить график зависимости  $\nu = f(B)$  и сделать выводы из него.

4. Найти g-фактор электрона.

5. Найти модуль проекции магнитного момента электрона в магнетонах Бора и единицах СИ.

6. Выполнить измерения вертикальной и горизонтальной составляющих индукции магнитного поля Земли. Найти модуль индукции магнитного поля Земли.

7. Сделать общие выводы по работе.

## 7.8 Контрольные вопросы

1. Какова связь между явлением Зеемана и магнитным резонансом?

2. К каким спектральным областям относятся излучения, связанные с эффектом Зеемана и магнитным резонансом?

3. Какие экспериментальные методы используют для наблюдения явления магнитного резонанса?

4. Что означают термины ЭПР и ЯМР?

5. Как вводится понятие магнитного момента?

6. Какова дополнительная энергия, приобретаемая объектом во внешнем магнитном поле, и каков действующий на него момент силы?

7. Понятие гиромагнитного отношения. Чему равно гиромагнитное отношение при орбитальном движении?

8. Каковы правила квантования механического и магнитного орбитальных моментов?
9. Что является единицей квантования момента импульса? Магнитного момента?
10. Пояснить понятие спина элементарной частицы.
11. Гиромагнитное отношение для спина электрона. Величина g-фактора электрона и его смысл.
12. Проекция и модуль спинового магнитного момента электрона, протона и нейтрона.
13. Проекция и модуль полного магнитного момента атомного ядра.
14. Полные механический и магнитный моменты атома. Множитель Ланде.
15. Расщепление уровней энергии в магнитном поле.
16. В чём состоит пространственное квантование?
17. Какие квантовые переходы происходят при магнитном резонансе?
18. Соотношение для частоты магнитного резонанса. Каковы диапазоны частот ЭПР и ЯМР?
19. Модель гироскопа для магнитного резонанса.
20. Вывод формулы для частоты прецессии в модели гироскопа.
21. Объяснить происхождение термина "магнитный резонанс" с позиций гироскопической модели.
22. Какие добавочные условия, кроме совпадения частот, должны выполняться для осуществления магнитного резонанса?
23. Как соотносятся вероятности квантовых переходов с поглощением и испусканием между магнитными подуровнями энергии? Одинаково ли число этих переходов?
24. На каком физическом процессе основывается регистрация ЭПР и ЯМР?
25. Объяснить причину поглощения излучения при ЭПР.
26. В чём состоит спин-решётчатая релаксация и какова её роль в регистрации ЭПР?
27. Устройство и принцип действия установки по наблюдению ЭПР в слабых полях.
28. В какой части ЭПР-установки помещают исследуемое вещество?
29. Для чего нужна модулирующая катушка?
30. Как устроены катушки Гельмгольца?
31. Поясните модуляционный метод регистрации сигнала ЭПР.