

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)"

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Методические указания
по выполнению лабораторной работы

Москва 2008

Составители: В.Ф. Мещеряков, И.В. Гладышев

Редактор: А.И. Морозов

Методические указания содержат описания и краткий теоретический материал к лабораторной работе по изучению ядерного магнитного резонанса, предлагаемой студентам МИРЭА специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» по курсу «Физика твердого тела» и специальности 210601 «Нанотехнологии в электронике» по курсу «Физика конденсированного состояния».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)».

Рецензенты: А.А. Буш
Л.М. Лазаренко

© Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), 2008

Работа № 2

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Содержание

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ	4
НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ в системе СИ	4
1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ФИЗИКИ МИКРОЧАСТИЦ	5
1.1. Понятие магнитного момента	5
1.2. Магнитный момент ядра и квантование его магнитного момента	8
1.3. Введение в теорию магнитного резонанса	10
1.3.1. Условие магнитного резонанса	10
1.3.2. Ширина линии и время релаксации магнитного резонанса	12
2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ	13
2.1. Измерение магнитного момента протона (ядра атома водорода) методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)	13
2.1.1. Цель работы:	13
2.1.2. Задание:	14
2.1.3. Описание установки для наблюдения ядерного магнитного резонанса	14
2.1.4. Порядок выполнения работы	17
2.1.5. Обработка результатов измерений	18
2.2. Измерение времени нахождения ядра в возбужденном состоянии методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)	19
2.2.1. Цель работы:	19
2.2.2. Задание:	19
2.2.3. Порядок выполнения работы	19
3. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	20
ЛИТЕРАТУРА:	21

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} \longrightarrow \begin{cases} 11604,5 \text{ К} \\ 8065,5 \text{ см}^{-1} \\ 2,42 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \end{cases}$$

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ в системе СИ

Постоянная Планка	\hbar	$1,06 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Заряд электрона	e	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Скорость света	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$
Масса электрона	m_e	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ФИЗИКИ МИКРОЧАСТИЦ.

1.1. Понятие магнитного момента

В физике магнитных явлений одним из основных понятий является понятие магнитного момента. Если в теории электричества, силы, действующие между частицами, определяются их зарядами, то в теории магнетизма рассматриваются силы, действующие между движущимися зарядами. Магнитные поля, создаваемые зарядами описываются законом Био-Савара-Лапласа, а возникающие при этом силы – законом Ампера. В тех случаях, когда расстояние между областями, в которых протекают локальные токи, много больше размеров этих областей, магнитные поля, создаваемые этими токами на больших расстояниях можно представить в виде разложения по мультипольным: дипольному, квадрупольному и т. д. моментам. [1]. Основным из них является дипольный момент, который ниже будем называть просто магнитным моментом. Примером тела, обладающего магнитным моментом в отсутствие внешнего магнитного поля, является стрелка компаса. Если приблизить стрелки двух компасов одноименными полюсами, то эти стрелки будут отворачиваться друг от друга

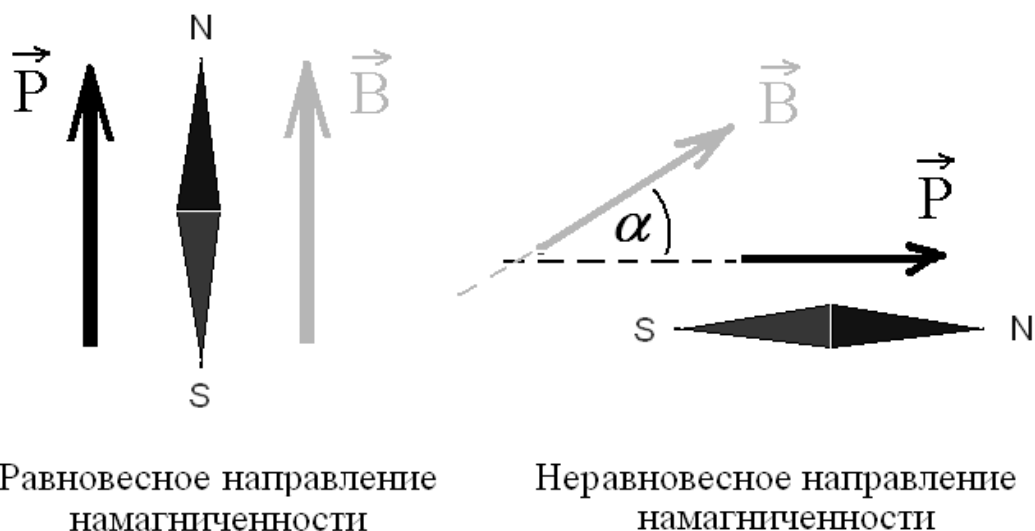


Рис. 1. Ориентация магнитных моментов относительно направления магнитного поля.

(отталкиваться), а при сближении стрелок разноименными полюсами – притягиваться друг к другу. Главное свойство стрелки компаса – стремление ориентироваться вдоль магнитного поля (рис. 1). На самом деле стрелка компаса представляет собой маленький магнит. Оказывается, что даже такие частицы как электрон, протон и нейтрон также обладают магнитным моментом, но очень маленьким. Для сравнения, величина магнитного момента магнита из самарий-кобальтового сплава объемом 1 см^3 составляет $\cong 0.2 \text{ А м}^2$, а электрона $0.921 \times 10^{-23} \text{ А м}^2$.

Характерным свойством объектов обладающих магнитным моментом являются:

- в магнитном поле на эти объекты действуют силы;
- эти объекты являются источниками магнитного поля.

Так, например, железные изделия втягиваются в области, где магнитное поле самое большое, а изменять положение стрелки компаса можно с помощью магнитного поля, создаваемого магнитом.

Указанными выше свойствами обладает, хорошо изученная в курсе общей физики рамка с током (рис. 2). Этот объект позво-

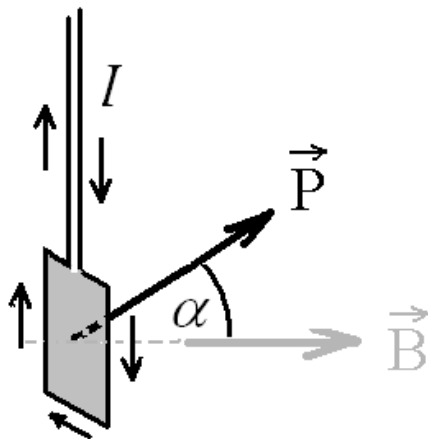


Рис. 2. Ориентация магнитного момента рамки с током относительно направления магнитного поля.

ляет пояснить не только физическую природу происхождения сил, действующих на объекты, обладающие магнитным моментом, но также и провести градуировку приборов для измерений

абсолютной величины магнитного момента. В общем курсе физики величину магнитного момента рамки с током определяют как [1]

$$\vec{P} = I \cdot S \cdot \vec{n}, \quad (1)$$

где I – сила тока (А), S – площадь, охватываемая рамкой с током (m^2), \vec{n} – единичная нормаль к поверхности рамки, направление нормали образует с направлением тока правый винт.

На магнитный момент \vec{P} , помещенный в магнитное поле, действует вращающий момент, величина которого определяется выражением

$$\vec{K} = [\vec{P}, \vec{B}], \quad (2)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля (Тл).

В магнитном поле потенциальную энергию магнитного момента записывают в виде скалярного произведения:

$$E = -(\vec{P}, \vec{B}). \quad (3)$$

Минимум энергии соответствует равновесному состоянию, когда магнитный момент направлен вдоль магнитного поля. В случае, когда магнитный момент ориентирован против поля, энергия максимальна. В неоднородном магнитном поле на объект, обладающий магнитным моментом, действует не только вращающий момент, но также и перемещающая сила F , которая в случае одного измерения, когда магнитное поле направлено вдоль оси x и $P_x = const$, как следует из (3), принимает вид:

$$F_x = -\frac{\partial E}{\partial x} = P_x \frac{\partial B}{\partial x} \quad (4)$$

Как видно, если $P_x > 0$, то эта сила втягивает обладающий магнитным моментом объект в магнитное поле, а при $P_x < 0$ – выталкивает.

1.2. Магнитный момент ядра и квантование его магнитного момента

Протоны и нейтроны обладают спином - собственным механическим моментом количества движения, который обозначим как $\mu_{мех}$. Его величина равна $\mu_{мех} = S \cdot \hbar$, где $S=1/2$ – спиновое число, $\hbar = 1.06 \times 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка. Указанные частицы обладают также магнитным моментом, который обозначим буквой μ . Экспериментально установлено, что для ядер магнитный момент связан со спином простым соотношением:

$$\mu = \gamma \cdot \mu_{мех} \quad (5)$$

где величину

$$\gamma = \frac{e \cdot g}{2 \cdot m_p}, \quad (6)$$

определяющую отношение магнитного момента к механическому, называют гиромагнитным отношением а коэффициент пропорциональности g называют g -фактором. Здесь $e=1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, а m_p – масса протона.

В ядерной физике магнитный момент ядра, состоящего из протонов и нейтронов, принято измерять в единицах

$$\mu_я = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m_p} = 5.05 \times 10^{-27} \text{ А} \cdot \text{м}^2, \quad (7)$$

а величину $\mu_я$ называют ядерным магнетоном. Магнитный момент ядра записывают в виде:


$$\mu = g \mu_я S, \quad (8)$$

где S – спин ядра,. Из выражения (8) следует, что величина магнитного момента однозначно связана с величиной g -фактора.

В классической физике направление магнитного момента относительно какого-либо направления (например, направления магнитного поля) может принимать любые значения (см. рис. 1). В квантовой механике показывается [2] что, во-первых, можно измерить только одну из компонент магнитного момента (например, вдоль оси z), а во-вторых, проекция магнитного момента на

$$S = \frac{1}{2}, m_s = \pm \frac{1}{2}$$

$$\mu_z = \frac{1}{2} g \mu_{\text{я}}$$

$$-\frac{1}{2} g \mu_{\text{я}}$$


$$S = 3, m_s = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$$

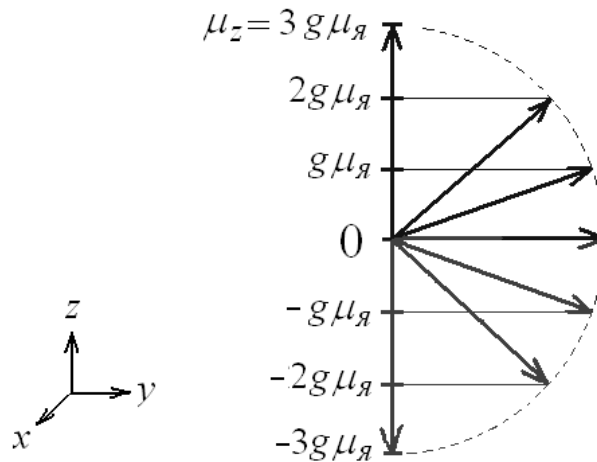


Рис. 3. Проекция магнитного момента ядер для $S=1/2$ и $S=3$

эту ось квантуется, то есть может принимать только дискретный ряд значений

$$\mu_z = g \cdot \mu_{\text{я}} \cdot m_s, \quad (9)$$

где $m_s = -S, -S+1, -S+2, \dots, S-1, S$. Например, для спина $S=1/2$ $m_s = \pm 1/2$, а для спина $S=3$, $m_s = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ (рис. 3).

Каждое ядро или его изотоп, состоящие из нескольких протонов и нейтронов, характеризуется своим суммарным спином S и g -фактором, которые меняются только в процессе ядерных реакций, в результате которых ядро становится другим. Эти величины являются табличными, и не зависят от вида электронной оболочки данного ядра. В настоящее время магнитный момент ядер измерен с большой точностью. В то же время теория магнитного момента ядер в настоящее время еще недостаточно хорошо отработана.

1.3. Введение в теорию магнитного резонанса

1.3.1. Условие магнитного резонанса

Рассмотрим частицу со спином $S=1/2$, обладающую магнитным моментом μ и находящуюся в магнитном поле B . Ее магнитный момент может ориентироваться только вдоль или против поля. Тогда энергия взаимодействия частицы с магнитным полем, согласно формуле (3), может принимать одно из двух значений:

$$\begin{aligned} E_1 &= -\mu B \\ E_2 &= +\mu B \end{aligned} \quad (10)$$

Нижнему уровню E_1 соответствует состояние частицы при котором ее магнитный момент ориентирован вдоль магнитного поля, а верхнему – направление против поля (см. рис. 3) Таким образом, в присутствии магнитного поля снимается вырождение¹ по направлению спина и вместо одного возникают два уровня энергии, разность между которыми равна

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2\mu B \quad (11)$$

Под воздействием внешнего переменного высокочастотного электромагнитного поля определенной частоты при заданном значении магнитного поля между этими уровнями возможны переходы, связанные как с поглощением, так и с излучением электромагнитной волны. При переходе с нижнего уровня энергии на верхний, энергия переменного поля (электромагнитной волны) поглощается. При переходе же с верхнего уровня на нижний, происходит излучение кванта электромагнитного поля, и энергия системы уменьшается. При этом переход системы с уровня на уровень сопровождается изменением направления магнитного момента ядра относительно внешнего магнитного поля (рис. 4).

¹ Вырождение уровней энергии квантово-механической системы состоит в том, что одному и тому же значению энергии системы соответствуют n различных квантовых состояний. Число n называется кратностью вырождения уровня.

Электромагнитное излучение поглощается только тогда, когда энергия кванта излучения (фотона) равна разности энергий разрешенных состояний частицы (например, электрона, атома, ядра). Так как энергия фотона равна $\hbar\omega$ то, приравнявая энергию кванта внешнего электромагнитного излучения, разности энергий уровней ΔE в (14), можно найти резонансное значение частоты поглощения (см. рис. 5):

$$\hbar\omega = \Delta E = 2\mu B, \quad (12)$$

где круговая частота $\omega = 2\pi f(c^{-1})$, а f – частота в Гц. Если выразить магнитный момент через g-фактор (см. (9)), то условие резонансного поглощения для ядер со спином $S=1/2$ запишется в виде:

$$\hbar\omega = g\mu_{\text{я}} B. \quad (13)$$

Возбуждение в ядре резонансных переходов электромагнитным

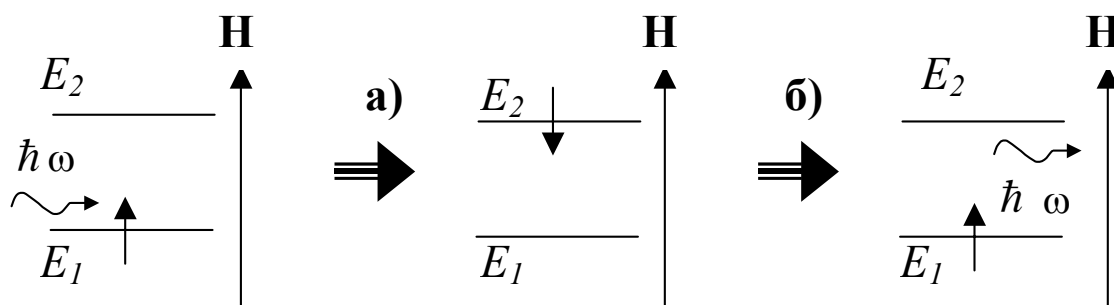


Рис. 4. Поглощение (а) и испускание (б) кванта электромагнитного излучения для спина $S=1/2$. Направления магнитного момента, соответствующие определенному значению энергии обозначены стрелкой.

полем, обусловленных изменением направления магнитного момента ядра, носит название ядерного магнитного резонанса или ЯМР.

В настоящей работе для создания магнитного поля исполь-

зуется соленоид, который позволяет получать магнитные поля с индукцией до нескольких сотых Тл. Для таких магнитных полей частота наблюдения ЯМР лежит в радиодиапазоне и составляет примерно несколько МГц.

Напомним, что магнитная индукция в длинном соленоиде с немагнитным сердечником определяется формулой

$$B = \mu_0 n I, \quad (14)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - константа системы СИ, n - число витков на единицу длины соленоида, а I - сила тока в обмотке соленоида.

1.3.2. Ширина линии и время релаксации магнитного резонанса

Важной характеристикой линий резонансного поглощения является ее ширина. Наблюдаемую ширину линии можно трактовать как “размытие” уровня энергии возбужденного состояния (см. уравнение 13 и рис. 5). В свою очередь, ширина уровня (δE) связана с временем нахождения частицы в возбужденном состоянии. Это время носит название времени релаксации² и обычно обозначается буквой T . Чем больше время релаксации, тем большее время частица находится в возбужденном состоянии и уже ширина линии.

Оценить величину времени релаксации можно, если воспользоваться соотношением неопределенности [2], которое в нашем случае принимает вид:

$$\delta E \cdot T \geq \hbar \quad (15)$$

В результате получаем

$$\delta E \cdot \approx \frac{\hbar}{T}. \quad (16)$$

$$\Delta\omega \approx T^{-1}, \quad (17)$$

или для ширины линии в Гц

$$\Delta f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T} \quad (18)$$

² Релаксацией называется самопроизвольный переход системы из возбужденного в стационарное состояние.

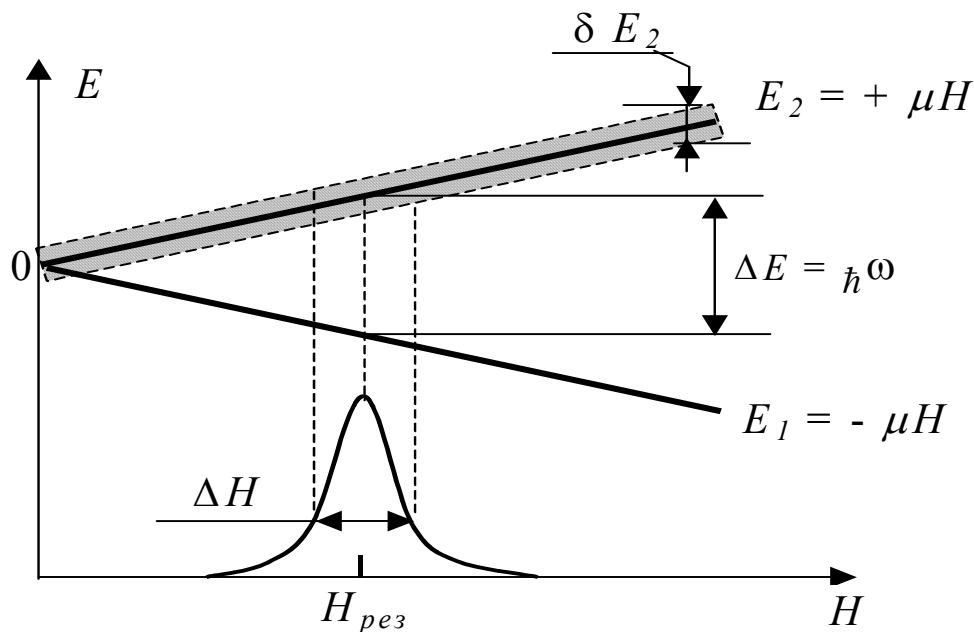


Рис. 5. Условие резонансного поглощения.

Ширину линии поглощения измеряют на половине ее высоты.

Уширение линии поглощения происходит из-за взаимодействия магнитных моментов ядер между собой и с кристаллической решеткой. Соответственно с этим различают два механизма релаксации, которые называют спин-спиновой и спин-решеточной релаксациями. Исследования релаксационных процессов, ширины линии ядерного магнитного резонанса дают сведения о структуре жидкостей и твёрдых тел.

2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Измерение магнитного момента протона (ядра атома водорода) методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

2.1.1. Цель работы:

Измерение магнитного момента ядра атома водорода по частотной зависимости положения линии ЯМР.

2.1.2. Задание:

Определить по частотной зависимости положения линии резонансного поглощения B величину магнитного момента ядра водорода и значение g -фактора.

Подготовка к выполнению работы состоит в ознакомлении с материалом, позволяющим ответить на следующие вопросы:

1. В чем состоит цель работы?
2. Какие величины необходимо измерить в работе, чтобы вычислить магнитный момент ядра водорода?
3. Что такое магнитный момент и как влияет на него магнитное поле?
4. Для чего нужен радиочастотный генератор?
5. Для чего нужны модуляционные катушки?
6. Где помещается образец при наблюдении ЯМР?
7. Как в процессе измерений определять величину магнитного поля и менять частоту?
8. Показать на установке соленоид, частотомер и объяснить их назначение;
9. Показать где находится образец, катушка радиочастотного генератора, ручка перестройки частоты генератора;

2.1.3. Описание установки для наблюдения ядерного магнитного резонанса

Для наблюдения ЯМР исследуемое вещество помещают в магнитное поле и измеряют поглощение переменного электромагнитного поля в зависимости от его частоты. Резонансное поглощение наблюдается в том случае, когда выполняется соотношение (13) между частотой и величиной магнитного поля. В качестве источника переменного поля в диапазоне радиочастот служит генератор. Постоянное магнитное поле в образце создается с помощью соленоида. Общий вид установки показан на рис. 6, а ее схема на рис. 7. Узлы установки, обведенные на рис. 7 пунктиром, находятся внутри устройства Ш 1-1, которое содержит радиочастотный генератор и усилитель с осциллографом (рис.6). В сеточный контур лампы генератора Γ включен резо-

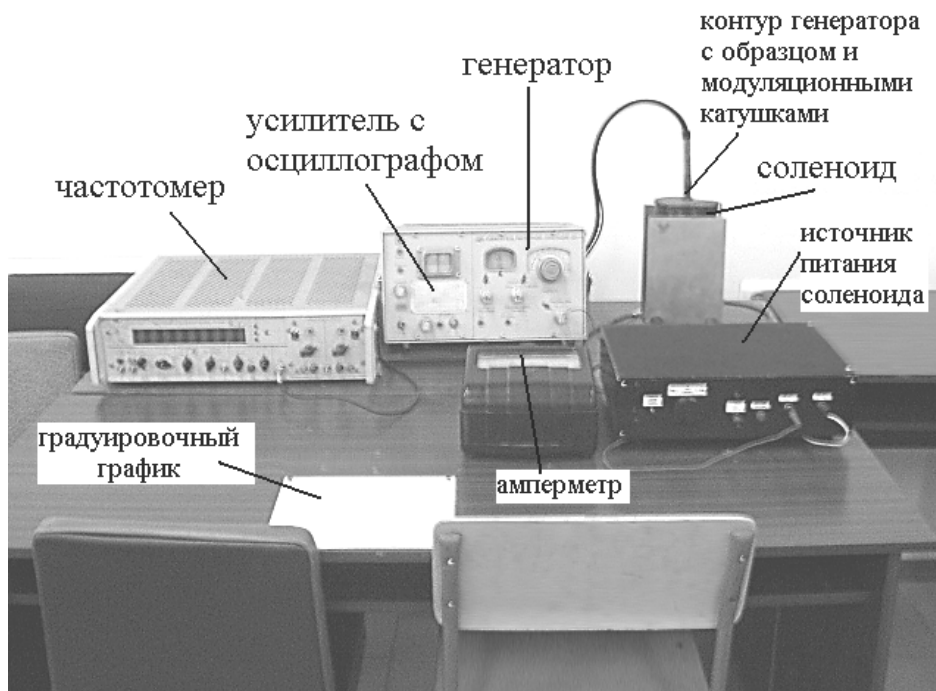


Рис. 6. Общий вид установки для исследования ЯМР.

нансный контур, состоящий из параллельно соединенных катушки индуктивности **К** и конденсатора переменной емкости **С**. Ручка этого конденсатора, позволяющего менять частоту генератора, выведена на переднюю панель устройства Ш 1-1 (см. рис. 6). Образец представляет собой ампулу с водой, ядра водорода которой состоят из одного протона. Поглощение в веществе, связанное с магнитным резонансом, очень мало и поэтому для его усиления образец помещается внутри катушки индуктивности **К**, где амплитуда высокочастотной составляющей магнитного поля максимальна. Частота генерируемых в катушке **К** колебаний составляет около $3 \cdot 10^6$ Гц и контролируется с помощью частотомера **Ч**. После высокочастотного усилителя сигнал этой частоты выпрямляется с помощью детектора (полупроводникового диода).

Если при каждом значении частоты генератора измерять напряжение на детекторе, то таким образом по точкам можно получить кривую резонансного поглощения. Если к внешнему постоянному магнитному полю добавить переменное магнитное поле низкой частоты (50 Гц) так, чтобы его амплитуда была в несколько раз больше ширины резонансной линии, то временная зависимость сигнала будет аналогичной показанной на рис. 8. Для соз-

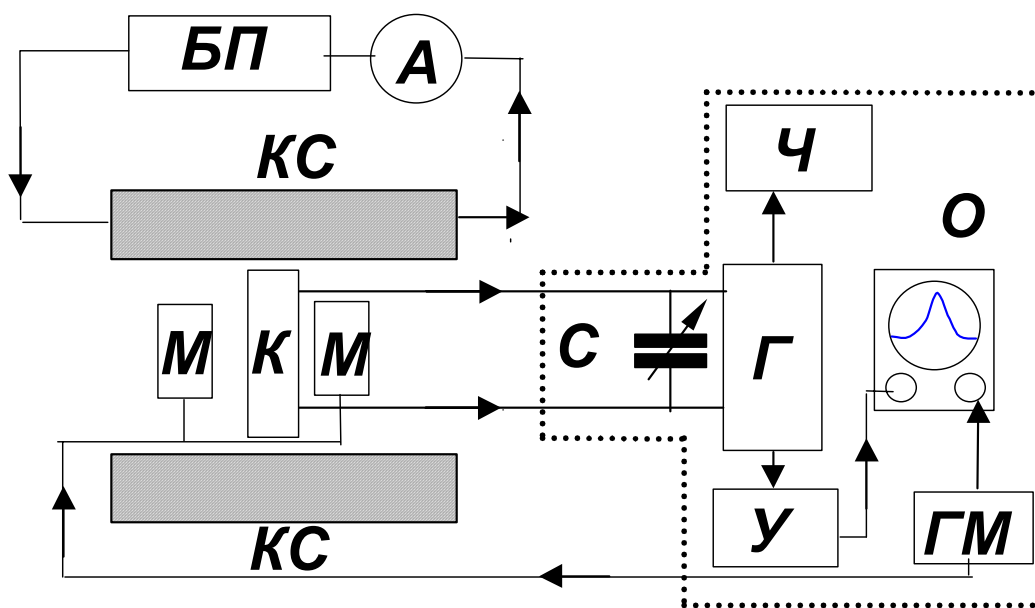


Рис. 7. Блок-схема установки по измерению магнитного момента ядер водорода.

КС – катушка соленоида, *БП* – блок питания соленоида, *А* – амперметр, *К* – катушка резонансного контура радиочастотного генератора с образцом, *С* – конденсатор резонансного контура радиочастотного генератора, *Г* – радиочастотный генератор, *Ч* – частотомер, *У* – усилитель, *М* – модуляционные катушки, *ГМ* – генератор модуляционной частоты, *О* – осциллограф.

дания этого дополнительного низкочастотного переменного магнитного поля около катушки генератора **К** прикреплены две катушки **М**, на которые подается переменное напряжение частоты 50 Гц от генератора **ГМ**. Их называют модуляционными катушками. Напряжение питания модуляционных катушек подается с отдельных клемм блока питания электромагнита. При появлении резонансного поглощения, изменение амплитуды колебаний в резонансном контуре происходит с частотой модуляции. Сигнал этой частоты выделяется детектором, с помощью усилителя **У** усиливается и поступает на вход **У** осциллографа **О**. На **Х** вход осциллографа подается сигнал с генератора, питающего модуляционные катушки.

В зависимости от полярности диода детектора сигнал ЯМР

на экране осциллографа обращен вверх или вниз от горизонтальной линии развертки.

Поскольку поле модулирующих катушек проходит точное резонансное значение два раза за каждый период, то, при развертке луча осциллографа напряжением модулирующих катушек, на экране осциллографа в общем случае видны две кривые сигнала ЯМР аналогичные рис. 9. Наличие двух сигналов объясняется сдвигом фаз между напряжением и током модуляционных катушек. Эти кривые можно совместить при помощи фазовращателя “фаза”, ручка которого выведена на лицевую панель устройства Ш 1-1.

2.1.4. Порядок выполнения работы

1. Включить тумблер “*сеть*”, расположенный на лицевой панели измерительного устройства Ш 1-1.
2. Включить тумблер “*сеть*” осциллографа.
3. Включить тумблеры “*сеть*” и “*термостат*”, выведенные на

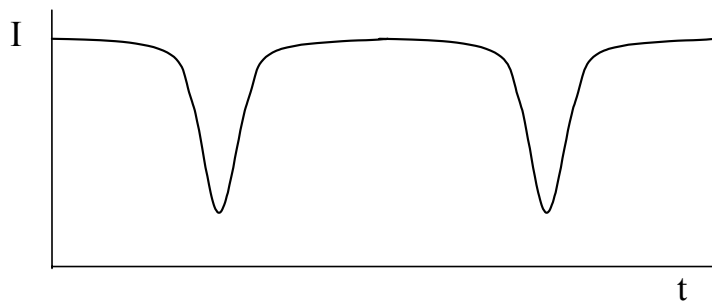


Рис. 8. Временная зависимость тока детектора.

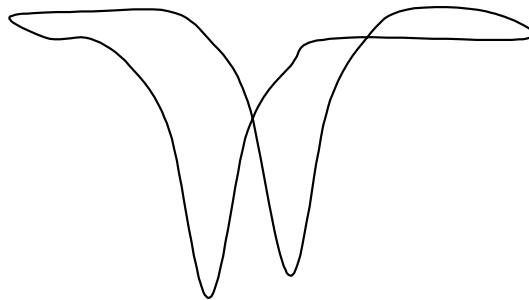


Рис. 9. Наблюдаемый сигнал ЯМР.

лицевую панель частотомера. После нескольких секунд прогрева прибора индикатор частотомера должен начать показывать частоту генератора слабых колебаний.

4. Ручка “*частота*” на внешней панели устройства Ш1-1 состоит из двух: меньшего диаметра – для грубого изменения частоты и большого диаметра – для плавного ее изменения. С помощью этих ручек установить рабочую частоту генератора.
5. Включить тумблер “*сеть*” на блоке питания соленоида и убедиться по показанию амперметра, что через соленоид течет ток.
6. Меняя ток соленоида с помощью ручки на панели блока питания соленоида установить линию ЯМР на середине экрана осциллографа и измерить величину тока, текущего через соленоид.
7. Записать частоту генератора и величину тока, протекающего через соленоид.
8. С помощью градуировочного графика определить величину магнитного поля в соленоиде.
9. Снять зависимость частоты поглощения от магнитного поля, меняя частоту генератора в диапазоне от 2.5 до 3.3 МГц с интервалом 0.2 МГц.

Внимание! Питание соленоида нельзя включать более, чем на 20 минут из-за возможности перегрева соленоида и выхода установки из строя.

2.1.5. Обработка результатов измерений

1. Построить график зависимости частоты f от величины магнитного поля B и по наклону графика, используя формулы (13), (8) и величину $\mu_{\text{я}}$, определить величину магнитного момента ядра и g -фактор.
2. Рассчитать приборную погрешность определения величины g -фактора, используя выражение:

$$\Delta g(f, I) = \frac{\partial g}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial g}{\partial I} \Delta I, \quad (19)$$

где Δf , ΔI – погрешности определения частоты и силы тока.

3. Записать вывод по работе.

2.2. Измерение времени нахождения ядра в возбужденном состоянии методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

2.2.1. Цель работы:

Измерение времени нахождения ядра атома водорода в возбужденном состоянии методом ЯМР.

2.2.2. Задание:

Определить время релаксации ядра атома водорода.

Подготовка к выполнению работы состоит в ознакомлении с материалом, позволяющим ответить на следующие вопросы:

1. В чем состоит цель работы?
2. Какие величины необходимо измерить в работе, чтобы вычислить время релаксации?
3. Описать последовательность действий при измерении ширины линии резонанса.

2.2.3. Порядок выполнения работы

1. Установить частоту генератора равной 3 МГц и, меняя ток в соленоиде найти линию резонансного поглощения.
2. Измерить линейкой ширину линии резонанса на половине ее высоты.
3. При постоянном токе соленоида провести градуировку экрана осциллографа. Для чего:
 - а) Плавно вращая ручку тонкого изменения частоты генератора сместить линию резонанса в крайнее левое положение, отметить его и записать частоту генератора.
 - б) Сместить линию резонанса в крайнее правое положение, отметить его и записать частоту генератора.
 - в) Измерить линейкой расстояние между крайними положениями.

- г) Из полученных данных определить градуировочную постоянную экрана осциллографа.
4. Вычислить ширину наблюдаемой линии резонанса в Гц.
 5. Используя формулу (18) вычислить время релаксации.
 6. Рассчитать приборную погрешность определения ширины запрещенной зоны и энергию примесного уровня, используя формулу аналогичную формуле (19).

3. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Что такое магнитный момент и как влияет магнитное поле на вещество, обладающее магнитным моментом?
2. Какие значения может принимать энергия частицы со спином $S=1/2$ и магнитным моментом $\vec{\mu}$ в магнитном поле \vec{B} ?
3. Что такое g-фактор?
4. Что такое фотон и чему равна его энергия?
5. Чему должна быть равна энергия фотона для того, чтобы при данной величине индукции магнитного поля было возможно наблюдать явление магнитного резонанса?
6. Что происходит с магнитным моментом частицы во время резонансного поглощения?
7. Какую физическую величину определяют в работе, используя значение ширины линии магнитного резонанса?
8. Что такое время релаксации и как его определить в работе?
9. Как при выполнении работы определить ширину линии резонанса?
10. Где помещается образец для наблюдения ЯМР?
11. Написать формулу для определения величины магнитного момента из условия магнитного резонанса.
12. Написать формулу для нахождения времени релаксации, если известна ширина линии резонанса в Гц.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1982. Т. 2 (§§ 10, 46)
2. Берзин А.А., Морозов В.Г., Основы квантовой механики, Москва, МИРЭА, 2005 г.
3. Морозов А.И. Физика твердого тела: Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники — Москва, МИРЭА, 2008.
4. *Механика и молекулярная физика: Лабораторный практикум по физике. М.: МИРЭА, 1997. (Введение, Дополнение).
5. *Лабораторный практикум по общей физике. – М.: Изд-во МФТИ. – 1998. т.3, (с. 251-277, 285-290)
6. *Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
7. *Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974.