

11
Каф. Физ.

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ФИЗИКЕ АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ
«ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС»

Казань 2005

Печатается по решению Редакционно-издательского совета физического факультета

УДК 535.3

Гайнутдинов Р.Х., Ильин Г.Г., Камалова Д.И., Сарандаев Е.В., Салахов М.Х. Методические указания к выполнению лабораторных работ по физике атомных явлений. Учебно-методическое пособие для студентов третьего курса физического факультета. Казань 2005, 22 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание и методические указания по выполнению лабораторной работы «Электронный парамагнитный резонанс» по курсу «Физика атомных явлений» для студентов третьего курса физического факультета. Работа дает представление о взаимодействиях магнитных моментов электронов и ядер с внешним магнитным полем и между собой.

Научный редактор: Салахов М.Х., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой оптики и спектроскопии физического факультета КГУ

Рецензент: Тагиров М.С., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии КГУ

© Физический факультет Казанского государственного университета, 2005

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) - один из самых мощных методов физического исследования, находящий широкое применение в различных отраслях науки и техники, был открыт в Казанском университете в 1944 г. Е.К. Завойским.

Сущность ЭПР заключается в резонансном поглощении энергии электромагнитного поля парамагнитными частицами (атомами, ионами, молекулами, радикалами и т.д.), т.е. частицами, обладающими собственными (не наведенными) магнитными моментами. Будем рассматривать в качестве объектов исследования ионы, магнетизм которых в общем случае обусловлен тремя магнитными моментами: орбитальным магнитным моментом электронов $\bar{\mu}_L$, спиновым магнитным моментом электронов $\bar{\mu}_S$ и спиновым магнитным моментом ядра $\bar{\mu}_I$. Величины этих моментов μ_L , μ_S и μ_I выражаются через соответствующие квантовые числа: орбитальное L , электронное спиновое S и ядерное спиновое I (через эти квантовые числа идет задание механических моментов количества движения электронов и ядра):

$$\mu_L = |\bar{\mu}_L| = \mu_0^e \sqrt{L(L+1)},$$

$$\mu_S = |\bar{\mu}_S| = g_e \mu_0^e \sqrt{S(S+1)},$$

$$\mu_I = |\bar{\mu}_I| = g_I \mu_0^I \sqrt{I(I+1)},$$

где $\mu_0^e = e\hbar/(2m_e) = 0.927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл - магнетон Бора ($\hbar = h/2\pi$, h - постоянная Планка, e - элементарный заряд, m_e - масса электрона), $\mu_0^I = e\hbar/(2M) = 5.046 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл - ядерный магнетон (M - масса протона), g_e и g_I - некоторые константы, называемые факторами спектроскопического расщепления для электрона и ядра.

Поскольку $\mu_0 \gg \mu_0'$ из-за $M \gg m_e$, а g_e и g_l одного порядка, магнитный момент ядра μ_l значительно меньше μ_L и μ_S и в первом приближении может не учитываться при расчете энергии взаимодействия иона с магнитным полем.

Рассмотрим элементы теории ЭПР для простейшего случая ионов Mn^{2+} , находящихся в кристалле кубической симметрии. Именно такой объект изучается в данной работе.

Оценим значения квантовых чисел L и S и значения магнитных моментов электронов ионов Mn^{2+} , находящихся в невозбужденном (основном) состоянии с наименьшей энергией. Ионы Mn^{2+} в основном состоянии имеют 5 валентных электронов с одним и тем же главным квантовым числом $n=3$ и одним и тем же орбитальным квантовым числом $\ell=2$. Электроны с одними и теми же квантовыми числами n и ℓ называются эквивалентными. Для полного задания состояний отдельных эквивалентных электронов необходимо еще задание для каждого электрона орбитального магнитного квантового числа m_ℓ и магнитного спинового числа m_s . Так как спин электрона $s=1/2$, то магнитное спиново число m_s может принимать только два значения $m_s = \pm 1/2$. Магнитное квантовое число m_ℓ может принимать одно из значений $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$ - всего возможно $2\ell+1$ значений m_ℓ . По принципу Паули для электронов как фермионов, т.е. частиц с полуцелым спином, не может быть двух эквивалентных электронов с одинаковыми m_ℓ и m_s . Отсюда следует, что при данном ℓ максимальное число эквивалентных электронов z_{max} должно быть $2(2\ell+1)$. При $\ell=2$ электроны обозначаются как d -электроны. Эквивалентные d -электроны образуют d -оболочку с максимальным числом электронов $z_{max}=10$ - заполненную d -оболочку обозначают как nd^0 . Ионы Mn^{2+} в основном состоянии имеют незаполненную d -оболочку с числом эквивалентных электронов $z=5$ - ее обозначают как $3d^5$. Для атомов и ионов в основном состоянии с эквивалентными электронами квантовые

числа L и S оцениваются по правилам Гунда, сформулированным в 1927 г. на основе обобщения экспериментальных и теоретических данных. Согласно правилам Гунда при $z \leq z_{max}/2$ основному состоянию с наименьшей энергией соответствует состояние с наибольшим значением $S=zs$ ($s=1/2$) и наибольшим возможным значением L при таком S . Для ионов Mn^{2+} с электронной конфигурацией $3d^5$ с $z=5$ (удовлетворяется условие $z \leq z_{max}/2$) имеем $S=5/2$. При таком S все пять эквивалентных d -электронов должны иметь одинаковое магнитное спиново число m_s . По принципу Паули при одинаковом m_s все пять эквивалентных d -электронов должны иметь как раз пять имеющихся разных значений орбитального магнитного квантового числа $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2$ при $\ell=2$. В итоге суммарное орбитальное магнитное квантовое число $m_L = \sum m_\ell$ принимает только одно нулевое значение, возможное лишь при $L=0$. Следовательно, орбитальный магнитный момент у иона Mn^{2+} отсутствует, а магнитные свойства электронной оболочки целиком определяются спиновым магнитным моментом $\bar{\mu}_S$ при $S=5/2$.

Если поместить ионы Mn^{2+} в магнитное поле, то магнитные моменты начинают прецессировать вокруг направления магнитного поля, причем проекции μ_{SB} вектора $\bar{\mu}_S$ на направление поля, задаваемого магнитной индукцией \vec{B} , определяются правилами пространственного квантования:

$$\mu_{SB} = \mu_S \cos(\bar{\mu}_S \vec{B}) = -g_e \mu_0' m_S, \quad (1)$$

где $m_S = \sum m_s$ - суммарное спиново магнитное квантовое число электронов, принимающее любое из $2S+1$ значений от $-S$ до S через единицу. В (1) поставлен знак минус из-за того, что через спиново магнитное квантовое число m_S непосредственно задается не проекция $\bar{\mu}_S$ на направление магнитного поля как некоторое выделенное направление, а проекция спиново механического момента \vec{S} на направление магнитного поля -

для электронов из-за их отрицательного заряда моменты \vec{S} и $\vec{\mu}_S$ направлены в противоположные стороны. Для ионов Mn^{2+} $2S+1=6$, $m_S=\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$.

Каждый ион, первоначально имевший энергию E_0 в магнитном поле приобретает дополнительную энергию E_{BS} , зависящую от ориентации его магнитного момента $\vec{\mu}_S$ по отношению к вектору \vec{B} и величины магнитного поля $B=|\vec{B}|$:

$$E_{BS} = -(\vec{\mu}_S \vec{B}) = -\mu_S B \cos(\vec{\mu}_S \vec{B}) = g_e \mu_B B m_S. \quad (2)$$

В результате энергетический уровень у совокупности ионов в кристалле при наличии магнитного поля расщепится на $2S+1$ компоненту по числу значений, принимаемых m_S . На рис.1 показана зависимость расщепления основного энергетического уровня ионов Mn^{2+} от значения магнитной индукции B . Согласно (2) расстояние между соседними подуровнями одинаково и равно $g_e \mu_B B$, т.е. подуровни расположены эквидистантно.

В методе ЭПР ионы, находящиеся в магнитном поле величины B , подвергаются воздействию слабого переменного радиочастотного электромагнитного поля заданной частоты ν сантиметрового или миллиметрового диапазона (СВЧ - диапазона). При $g_e \mu_B B \approx h\nu$ под воздействием переменного магнитного поля электромагнитной волны частоты ν ионы Mn^{2+} будут с некоторой вероятностью, зависящей от разности энергий $g_e \mu_B B$ и $h\nu$, переходить с нижних подуровней на соседние вышележащие подуровни с поглощением фотонов с энергией $h\nu$ и обратно, под воздействием вынужденных переходов, будут переходить с вышележащих подуровней на соседние нижележащие подуровни с излучением фотонов с энергией $h\nu$. Возможность поглощения и излучения

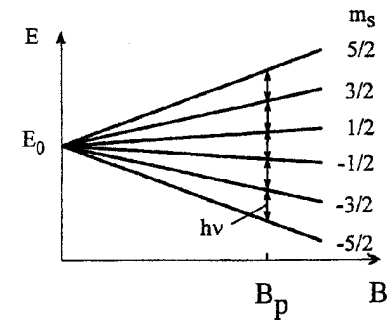


Рис. 1.

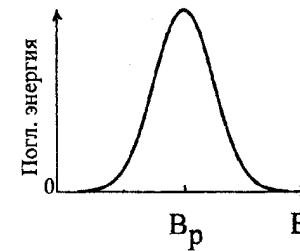


Рис. 2.

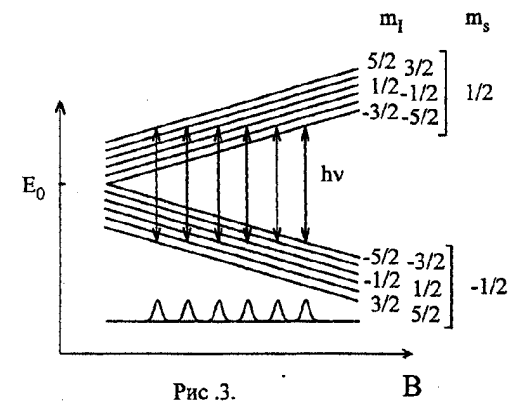


Рис. 3.

фотонов при разнице в энергиях $g_e \mu_0^e B$ и $h\nu$ обусловлена тем, что каждый энергетический подуровень имеет некоторое размытие (уширение) вследствие взаимодействия ионов Mn^{2+} с кристаллической решеткой кристалла (говорят о спин-решеточном взаимодействии) и других взаимодействий. Переходы управляются простым правилом отбора: осуществляются те из них, для которых магнитное квантовое число m_s изменяется на единицу - $\Delta m_s = \pm 1$, т.е. осуществляются переходы между соседними подуровнями (на рис.1 эти переходы отмечены стрелками). Число переходов в единицу времени, сопровождающихся поглощением фотонов ($\Delta m_s = +1$), всегда больше числа обратных переходов с излучением фотонов ($\Delta m_s = -1$). Это связано с тем, что в равновесных условиях, когда справедлив закон Больцмана, ионы преимущественно находятся на уровнях с меньшей энергией. Таким образом, в результате взаимодействия ионов с электромагнитным полем частоты ν часть энергии поля поглотится. В дальнейшем эта энергия передается кристаллической решетке и переходит в тепло.

Поглощение энергии будет особенно эффективным при выполнении резонансного условия: равенства при некотором значении магнитной индукции $B=B_p$ энергии кванта электромагнитного поля $h\nu$ разности задаваемых формулой (2) центральных значений энергий ΔE двух соседних уровней:

$$\Delta E = g_e \mu_0^e B_p = h\nu.$$

Это условие, как следует из вышеизложенного, выполняется одновременно для всех пяти переходов, показанных стрелками на рис.1.

В экспериментах по ЭПР частота переменного электромагнитного поля ν обычно поддерживается постоянной, а меняется плавно величина магнитной индукции B магнитного поля, которое условно может быть названо как "постоянное". Измеряемая при этом зависимость

поглощенной образцом энергии электромагнитного поля от B , которая характеризует спектр ЭПР, при учете уширения уровней должна иметь вид, показанный на рис.2. Определив величину резонансного поля B_p и зная частоту ν , можно определить фактор спектроскопического расщепления

$$g_e = h\nu / (\mu_0^e B_p), \quad (3)$$

являющийся характеристикой парамагнитного иона в кристалле.

Рис.2, однако, не отражает действительного вида спектра ЭПР иона Mn^{2+} . Дело в том, что магнитный момент ядра $\vec{\mu}_I$ взаимодействует с магнитным моментом электронов $\vec{\mu}_S$ через посредство собственных магнитных полей магнитных моментов, в результате чего возникает так называемая сверхтонкая структура уровней и спектра.

Магнитный момент электронов $\vec{\mu}_S$ создает в месте нахождения ядра иона собственное магнитное поле, индукция которого пропорциональна величине момента $\vec{\mu}_S$. В этом магнитном поле электронов магнитный момент ядра $\vec{\mu}_I$ приобретает некоторую энергию. Эта энергия как энергия взаимодействия двух магнитных моментов пропорциональна их скалярному произведению

$$\vec{\mu}_S \vec{\mu}_I = \mu_{Sx} \mu_{Ix} + \mu_{Sy} \mu_{Iy} + \mu_{Sz} \mu_{Iz}$$

С правой стороны этого равенства стоят произведения проекций моментов на декартовы оси координат. Далее полагаем, что ось z совпадает с направлением магнитной индукции \vec{B} .

Постоянное магнитное поле, применяемое в технике ЭПР, является для ионов Mn^{2+} сильным. Это означает, что энергия взаимодействия постоянного магнитного поля с моментами $\vec{\mu}_S$ и $\vec{\mu}_I$ больше энергии их взаимодействия друг с другом. В результате этого при включении магнитного поля связь между моментами разрывается и моменты

начинают прецессировать вокруг направления постоянного поля независимо друг от друга с различными скоростями. Прецессирующий ядерный момент $\vec{\mu}_I$, так же как и электронный, имеет дискретный набор проекций на направление магнитного поля:

$$\mu_{IB} = \mu_I \cos(\vec{\mu}_I \vec{B}) = g_I \mu_0^I m_I, \quad (4)$$

где m_I - ядерное магнитное квантовое число, принимающее $2I+1$ значение от $-I$ до I через единицу. В (4) по сравнению с (1) опущен знак минус, т.к. ядро является положительным и для него спиновые механический \vec{I} и магнитный $\vec{\mu}_I$ моменты направлены в одну сторону.

Поскольку проекции моментов на оси x и y и их произведения могут быть как положительными, так и отрицательными, то при усреднении во времени произведения $\mu_{Sx} \mu_{Ix}$ и $\mu_{Sy} \mu_{Iy}$ обращаются в ноль, а с учетом (1) и (4) $\vec{\mu}_S \cdot \vec{\mu}_I = \mu_{SB} \mu_{IB} = m_S m_I$.

Таким образом, дополнительная энергия иона E_{SI} , появляющаяся из-за взаимодействия электронного и ядерного магнитных моментов, пропорциональна произведению магнитных квантовых чисел $m_S m_I$ и может быть записана в виде:

$$E_{SI} = A m_S m_I, \quad (5)$$

где A есть положительная константа, имеющая размерность энергии. Константа A называется постоянной сверхтонкой структуры.

Описанный механизм взаимодействия не является единственным. Существует кроме того взаимодействие электронного и ядерного спиновых магнитных моментов, обусловленное обменными силами, имеющими квантово-механическую природу. Однако и в этом случае выражение (5) остается в силе.

Полная энергия иона E в магнитном поле с учетом сказанного может быть записана в виде

$$E = E_0 + E_{BS} + E_{SI} = E_0 + g_e \mu_0^e B m_S + A m_S m_I. \quad (6)$$

$$E = E_0 + E_{BS} + E_{SI} = E_0 + g_e \mu_0^e B m_S + A m_S m_I$$

Для ионов Mn^{2+} $I=5/2$, $2I+1=6$, $m_I = \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$ и, следовательно, сверхтонкое взаимодействие приводит к расщеплению каждого из шести уровней, показанных на рис.1, на шесть близко расположенных компонент. На рис.3 приведена сверхтонкая структура только для двух уровней с $m_S=1/2$ и $m_S=-1/2$. При построении рис.3 учтено, что согласно (6) при отрицательном $m_S=-1/2$ уровню с наименьшей энергией будет соответствовать наибольшее положительное значение m_I , а при положительным $m_S=1/2$ уровню с наибольшей энергией будет соответствовать наибольшее положительное значение m_I . Переходы между компонентами сверхтонкой структуры управляются правилами отбора: $\Delta m_S = \pm 1$, о чем уже было сказано выше, и $\Delta m_I = 0$ (ядерный магнитный момент при переходах не меняет ориентацию).

Согласно (6) для переходов с поглощением энергии ($\Delta m_S = +1$ при неизменном m_I) энергия ионов Mn^{2+} изменяется на величину

$$\Delta E = g_e \mu_0^e B + A m_I,$$

а магнитные индукции B_p , при которых осуществляется резонанс, равны

$$B_p = (h\nu - A m_I) / (g_e \mu_0^e). \quad (7)$$

Согласно (7) для ионов Mn^{2+} каждому из шести значений m_I в спектре ЭПР соответствует своя линия поглощения, а весь спектр состоит из шести эквидистантно расположенных линий на расстоянии $A/(g_e \mu_0^e)$ друг от друга (см. нижнюю часть рис.3).

В спектроскопии ЭПР в качестве общепринятого стандарта часто используют органическое соединение дифенилпикрилгидразил (α -дифенил- β -пикрилгидразил), которое кратко называют как ДФПГ. Магнитные свойства молекулы ДФПГ обусловлены только спиновым моментом одного из электронов. Спиновое квантовое число электрона

$s=1/2, m_s=\pm 1/2$ и, следовательно, энергетический уровень ДФПГ в магнитном поле расщепляется на два подуровня, расстояние между которыми равно

$$\Delta E = g_e \mu_0^e B. \quad (8)$$

Согласно (8) для ДФПГ в условиях резонанса справедлива формула (3), связывающая между собой величины g_e , ν и B_p . В спектре ДФПГ видна только одна узкая линия, по которой фактор спектроскопического расщепления измерен с высокой точностью и равен $g_e = 2,0036$.

Экспериментальная часть

В работе используется учебный спектрометр электронного парамагнитного резонанса (спектрометр ЭПР), изготовленный экспериментально-опытным заводом "Политехник" при Белорусском политехническом институте. Внешний вид всей установки (вид сверху) показан на рис.4. На рисунке слева расположен спектрометр ЭПР. Справа расположен самописец для автоматической записи спектра ЭПР на диаграммной бумаге. Спектрометр в настольном исполнении собран на горизонтальной металлической панели, к которой снизу крепятся электронные блоки. Сверху на панели установлен блок СВЧ-магнит, прикрытый сетчатой крышкой. В блоке СВЧ-магнит расположены катушки электромагнита и СВЧ-тракт, зажатый между полюсами электромагнита. На верхней сетчатой крышке блока СВЧ-магнита находится отверстие с цанговым зажимом для установки и фиксации полиэтиленовой трубочки с образцом и эталонным веществом ДФПГ на конце, а также металлическая кнопка запуска генератора СВЧ. Перед блоком СВЧ-магнит расположена панель управления спектрометром. Самописец подсоединен проводами к спектрометру.

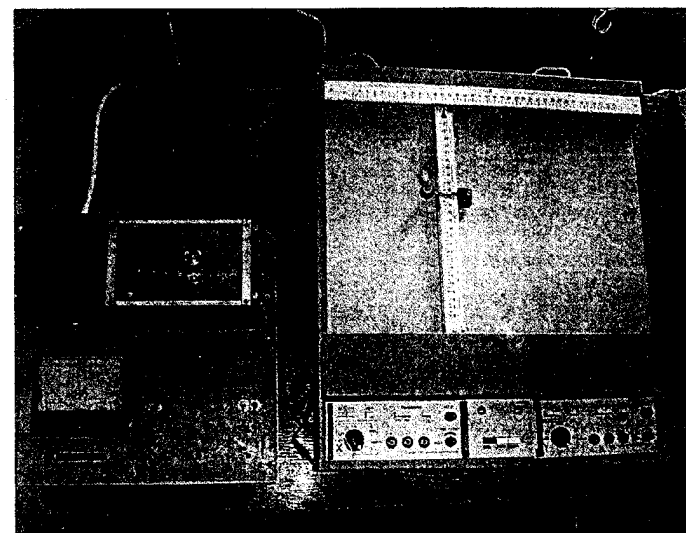


Рис. 4. Внешний вид установки (вид сверху).

Слева расположен спектрометр ЭПР, справа – самописец.

Принципиальная схема спектрометра ЭПР показана на рис.5. Электромагнит NS создает сильное постоянное магнитное поле (при записи спектра ЭПР оно медленно возрастает от некоторого начального значения индукции B_0) на исследуемом образце O , помещенном в объемном резонаторе R СВЧ-тракта. К резонатору через волновод F_1 подводятся электромагнитные волны СВЧ-диапазона обычно с длиной волны $\lambda \sim 3$ см, генерируемые генератором СВЧ (G на рис.5). После частичного поглощения в образце они через волновод F_2 поступают к электрическим сигналам с которого сверхвысокочастотному детектору D , проходят через усилитель $У$, синхронный детектор $СД$ и регистрируются самописцем $Сп$.

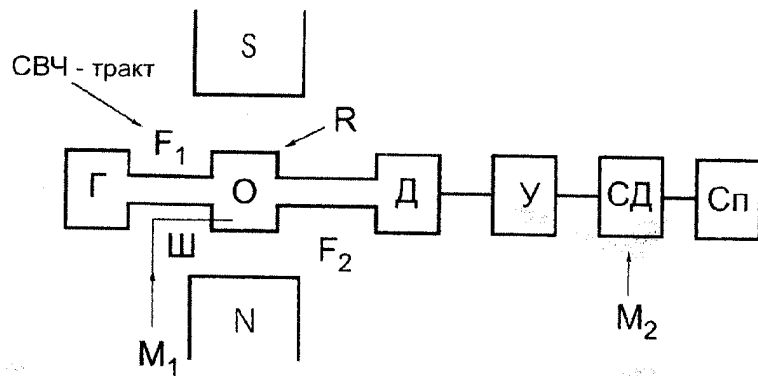


Рис.5. Принципиальная схема спектрометра ЭПР.

Генератор СВЧ предназначен для генерирования электромагнитных волн СВЧ-диапазона постоянной частоты ν (пренебрегаем небольшой некогерентностью излучения) и постоянной мощности. В используемой в данной работе установке генераторным элементом является диод Ганна. Работа диода Ганна основана на хорошо известном эффекте Ганна, который был открыт в 1963 году Ганном на полупроводниках GaAs и InP. Эффект Ганна заключается в том, что при превышении постоянного напряжения на концах этих полупроводников некоторого порогового напряжения прохождение тока через полупроводники GaAs и InP становится нестабильным из-за их специфической сложной вольт-амперной характеристики, в результате чего ток через полупроводник начинает периодически изменяться во времени с некоторой заданной частотой ν в СВЧ-диапазоне. Полупроводник с периодически изменяющимся с частотой ν током является источником электромагнитной волны с той же самой частотой ν . Величина интенсивности этого излучения в используемой в данной работе установке регистрируется детектором СВЧ (Д на рис.5) на основе диода

Шоттки. Как известно, в диоде Шоттки используются свойства контакта металл-полупроводник, вследствие чего диод Шоттки по сравнению с полупроводниковыми диодами с $p-n$ -переходом обладает очень высоким быстродействием и способен реагировать на возмущения с частотами СВЧ-диапазона. Быстропеременное электрическое поле электромагнитной волны СВЧ-диапазона воздействует на характеристики перехода металл-полупроводник, что приводит к появлению в проходящем через диод Шоттки тока переменной составляющей с частотой электромагнитной волны. Амплитуда этой переменной составляющей тока зависит от интенсивности электромагнитной волны.

Непосредственное наблюдение линий ЭПР в виде, показанном на рис.2, требует высокой чувствительности спектрометра. Для повышения чувствительности спектрометра ЭПР применяется малая по амплитуде высокочастотная модуляция магнитного поля электромагнита. В используемой в данной работе установке модуляция происходит с частотой в 25 кГц. На рис. 6а показан график зависимости промодулированной индукции магнитного поля электромагнита B в зависимости от времени t . Нарастание (или убывание) магнитного поля от (до) некоторого начального значения B_0 происходит за счет подачи переменного напряжения на катушки электромагнита от генератора треугольного напряжения (этот же генератор вырабатывает напряжение горизонтальной развертки на самописце вдоль координаты $\ll X \gg$ - см. далее порядок выполнения работы). Для высокочастотной модуляции магнитного поля и последующей демодуляции сигнала ЭПР используется генератор опорной частоты, который формирует синусоидальный сигнал с частотой 25 кГц. Усиленный сигнал с генератора опорной частоты в виде тока высокочастотной модуляции (сигнал M_1 на рис.5) подается на контур высокочастотной модуляции, который действует в объемном резонаторе R СВЧ-тракта и создает в месте нахождения образца О в резонаторе дополнительное быстропеременное магнитное поле с малой амплитудой, модулирующее основное магнитное поле электромагнита. Важной деталью

дополнительное быстропеременное магнитное поле с малой амплитудой, модулирующее основное магнитное поле электромагнита. Важной деталью контура высокочастотной модуляции является металлический штырь Ш, в котором непосредственно циркулирует ток высокочастотной модуляции, создающий добавочное быстропеременное магнитное поле в резонаторе R.

На рис.6б показана форма промодулированной линии ЭПР, возникающей при возрастании индукции B до резонансного значения B_p . Регистрирующий тракт спектрометра ЭПР, начинающийся на рис.5 с детектора СВЧ Д, включает в себя узкополосный усилитель У, настроенный на частоту 25 кГц, и синхронный детектор СД, пропускающий только переменную часть сигнала ЭПР на той же самой частоте модуляции и производящий демодуляцию сигнала ЭПР. Для этого на вход синхронного детектора подается также сигнал с генератора опорной частоты (сигнал M_2 на рис.5).

Вид сигнала ЭПР после узкополосного усилителя У показан на рис.6в. Амплитуда такого переменного сигнала пропорциональна крутизне линии поглощения ЭПР, т.е. первой производной от колоколообразной форме линии поглощения ЭПР, показанной на рис.2 и в промодулированном виде на рис.6б. Далее сигнал ЭПР в виде сигнала рис.6в подается на синхронный детектор (СД на рис.5.), преобразующий его в постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде переменного сигнала рис.6в, и представляющий его в итоге в виде первой производной от линии поглощения ЭПР, график которой показан на рис.6г. Сигнал ЭПР в виде первой производной от линии поглощения ЭПР, усиленный после синхронного детектора усилителем постоянного тока (не показан на рис.5), записывается на самописце (координата $\ll Y \gg$ на самописце задается сигналом ЭПР - см. далее порядок выполнения работы).

Благодаря использованию техники высокочастотной модуляции сигнала ЭПР спектрометр ЭПР позволяет зарегистрировать сигнал ЭПР в образцах, содержащих 10^9 - 10^{10} парамагнитных частиц при общем количестве приблизительно в 10^{23} атомов в 1 см^{-3} кристалла.

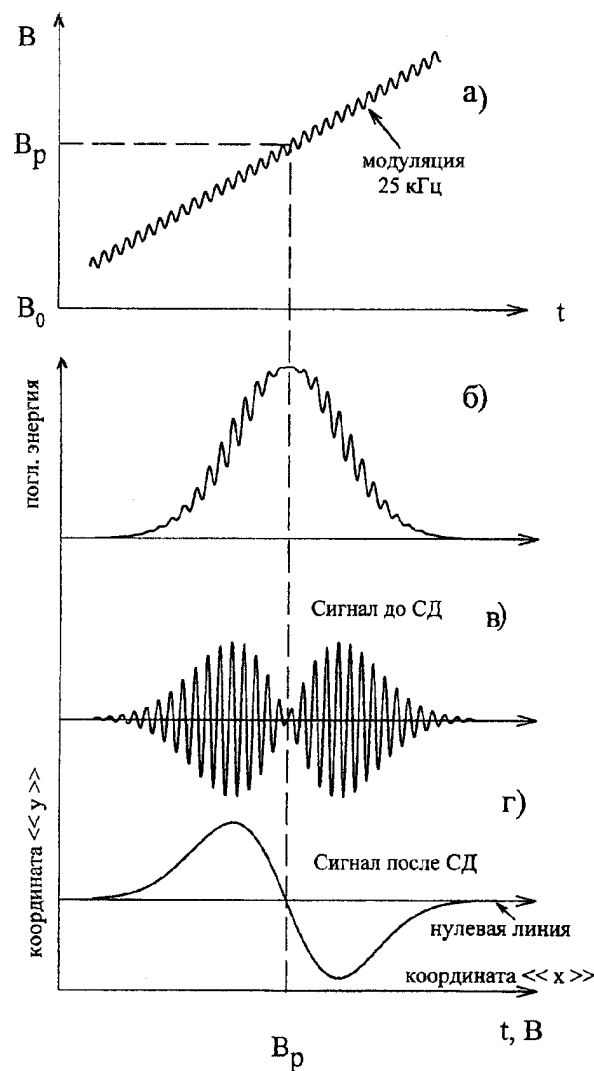


Рис. 6.

Порядок выполнения работы

1. Включить спектрометр ЭПР тумблером <<сеть>> на корпусе спектрометра и прогреть его в течение 5 минут (после двух часов непрерывной работы спектрометра необходимо его отключение на один час).

2. Включить самописец нажатием кнопки <<сеть>>.

3. Нажатием кнопки <<перо>> поднять перо самописца (кнопка должна быть в отжатом положении).

4. Вставить диаграммную бумагу в планшет самописца и нажать кнопку <<диагр>>. После нажатия кнопки <<диагр>> бумага за счет ее электризации должна прилипнуть к планшету.

5. Установить следующие условия для горизонтальной координаты <<X>> (используется левая часть панели управления самописца):

- установить расположенный слева внизу ступенчатый регулятор чувствительности по координате <<X>> в положение <<10 mV/cm>>;
- переключатель <<V/mV>> нажатием правой кнопки перевести в положение mV (кнопка должна быть в прижатом положении);
- нажатием расположенной слева сверху кнопки <<вкл>> включить блок постоянного напряжения (кнопка должна быть в прижатом положении);
- переключатель <<лин/лог>> перевести в положение <<лин>> (кнопка переключателя должна быть в отжатом положении). В этом случае смещение пера самописца вдоль координаты <<X>> пропорционально подаваемому напряжению на самописец;
- переключатель <<смещение %>> нажатием правой кнопки перевести в положение <<200>> (правая кнопка должна быть в прижатом положении);

- нажатием кнопки переключателя <<+/->> перевести его в положение <<->> (кнопка должна быть в прижатом положении). При этом каретка с пером самописца должна переместиться в крайнее левое положение;
- вращением против часовой стрелки расположенного справа внизу регулятора масштаба привести регулятор масштаба в положение <<отключено>> (отключение происходит после щелчка). При такой установке регулятора масштаба масштаб по координате <<X>> равен 10 mV/cm;
- произвести вращение против часовой стрелки до упора расположенного справа сверху регулятора нуля (регулятор <<уст'0''>>).

6 Установить следующие условия для вертикальной координаты <<Y>> (используется правая часть панели управления самописца):

- установить расположенный слева внизу ступенчатый регулятор чувствительности по координате <<Y>> в положение <<10 mV/cm>>;
- переключатель <<V/mV>> нажатием правой кнопки перевести в положение mV (кнопка должна быть в прижатом положении);
- нажатием расположенной слева сверху кнопки <<вкл>> включить блок постоянного напряжения (кнопка должна быть в прижатом положении);
- переключатель <<лин/лог>> перевести в положение <<лин>> (кнопка переключателя должна быть в отжатом положении). В этом случае смещение пера самописца вдоль координаты <<Y>> пропорционально подаваемому напряжению на самописец;
- переключатель <<смещение %>> перевести в положение <<выключено>> (обе кнопки должны быть в отжатом положении);
- вращением против часовой стрелки расположенного справа внизу регулятора масштаба привести регулятор масштаба в положение <<отключено>> (отключение происходит после щелчка). При такой установке регулятора масштаба масштаб по координате <<Y>> равен 10 mV/cm;

- вращением расположенного справа сверху регулятора нуля (регулятор <<уст'0'>>) задать положение нулевой линии (начала записи спектра ЭПР) на оси <<Y>>. Рекомендуется выставить среднее значение $Y (\approx 12)$.

7. Нажать кнопку $I_{дет}$ на панели спектрометра ЭПР и посмотреть по показанию стрелочного прибора регистрации сигналов, присутствует ли ток на детекторе. Если ток равен нулю, то кратковременно нажать и отпустить металлическую кнопку запуска СВЧ-генератора, расположенную рядом с образцом (возможно повторение операции до трех раз при правильной настройке спектрометра). При этом показание тока детектора должно быть приблизительно 40 делений. Затем нажать кнопку <<H₀>>. При наличии тока в электромагните стрелка прибора регистрации сигналов покажет значение, пропорциональное индукции магнитного поля электромагнита.

8. Перевести расположенный справа на панели управления спектрометра ЭПР тумблер <<стоп/пуск>> в положение <<пуск>>. При этом запускается генератор пилообразного напряжения, который изменяет ток электромагнита и соответственно индукцию магнитного поля по закону изменения пилообразного напряжения. Пилообразное напряжение подается также на самописец, поэтому каретка самописца приходит в непрерывное движение вдоль координаты <<X>>. Подождать, пока каретка достигнет крайнего левого положения и остановится там на короткое время. Далее по отклонению пера самописца по координате <<Y>> просмотреть спектр ЭПР образца без записи спектра. При необходимости скорректировать положение нулевой линии по координате <<Y>> путем вращения ручки установки нуля <<уст'0'>>.

9. При положении каретки в крайнем левом положении опустить перо самописца с помощью нажатия кнопки <<перо>> (кнопка должна быть в прижатом положении) и записать спектр ЭПР образца. По

окончании записи спектра нажатием кнопки <<перо>> поднять перо самописца (кнопка должна быть в отжатом положении).

10. На панели управления спектрометра ЭПР отжать кнопку <<H₀>> и переключить тумблер <<стоп/пуск>> в положение <<стоп>>.

11. Выключить самописец кнопкой <<сеть>> (кнопка должна быть в отжатом положении) и спектрометр ЭПР тумблером <<сеть>> (тумблер должен быть в положении <<выкл>>).

12. Вынуть диаграммную бумагу с записью спектра ЭПР образца и эталонного вещества ДФПГ и обозначить центры отдельных линий спектра ЭПР. Найти значения магнитной индукции B_p для всех линий, учитывая, для линии ДФПГ (средняя из семи линий спектра) $B_p = 3150 \text{ Гс} = 0.315 \text{ Тл}$, а масштаб по координате <<X>> равен $20 \text{ Гс/см} = 0.002 \text{ Тл/см}$.

13. Используя приведенное в описании значение фактора спектроскопического расщепления для линии ДФПГ, найти по формуле (3) частоту электромагнитного поля в резонаторе.

14. Ответьте на вопрос, какое ядерное спиновое квантовое число I следует приписать иону марганца Mn^{2+} согласно полученному спектру ЭПР. Сопоставьте каждой из шести линий спектра ЭПР иона Mn^{2+} магнитное квантовое число m_I (см. рис.3 и формулу (7)). Найдите значения фактора спектроскопического расщепления g_e и постоянной сверхтонкой структуры A иона Mn^{2+} . Для расчета воспользуйтесь следующими соотношениями, которые легко получить из (7):

$$g_e = \frac{h\nu}{\mu_0^e} \frac{2}{B_p(m_I) + B_p(-m_I)},$$

$$A = [g_e \mu_0^e / (2m_I)] [B_p(-m_I) - B_p(m_I)].$$

Провести вычисления g_e и A , используя все полученные значения m_I .
Усреднить полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев А.Н. Атомная физика. М.: Высшая школа, 1989.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. М.: Наука, 1986 (ч.1); М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2002.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3, М.: Наука, 1979, 1982, 1988, кн. 5, М.: ООО «Изд-во Астель»: ООО «Изд-во АСТ», 2002.