

Факультет молекулярной и биологической физики
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

по курсу: Физические методы исследования

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

МОСКВА 2005

ВВЕДЕНИЕ

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), открытый ученым Е.К. Завойским в 1944г., стал одним из мощных физических методов исследования парамагнитных частиц. Особенно эффективным метод ЭПР оказался в химии, т.к. он позволяет детектировать малые концентрации (до $10^{-10} \div 10^{-13}$ моля) свободных радикалов, являющихся промежуточными продуктами многих химических реакций. Как известно, атомы и молекулы, имеющие незаполненную электронную оболочку, обладают электронным магнитным моментом. Энергия магнитного момента M во внешнем магнитном поле H зависит от относительной ориентации M и H . Таким образом, наложение на систему, содержащую парамагнитные частицы, внешнего магнитного поля вызывает появление подуровней энергии определяемых взаимодействием M и H . Если через такую систему пропускать соответствующее электромагнитное излучение, то за счет перехода парамагнитных частиц в более высокие энергетические состояния происходит его поглощение. Это явление получило название электронный парамагнитный резонанс.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Энергия взаимодействия магнитного момента электронной оболочки (для простоты мы будем рассматривать один электрон) с постоянным магнитным полем H равна: $\Delta W = g\beta H$, где g - "g-фактор", т.е. отношение величин магнитного и механического моментов, выраженное в единицах $\frac{e}{2mc}$;

$\beta = \frac{e\hbar}{2mc} = 0.93 \cdot 10^{-20}$ - магнетон Бора. Для свободного электрона $g=2$. В магнитном поле при взаимодействии с электромагнитным излучением оказываются возможными переходы с энергией:

$$\Delta W = g\beta H \quad (1)$$

Эти переходы и используются в методе электронного парамагнитного резонанса.

Используя выражение (1), можно определить частоту электромагнитного излучения, которое будет поглощаться парамагнитным веществом: $\nu = \frac{1}{\hbar} g\beta H$.

Для $g = 2$ и $H = 3 \cdot 10^3$ Эрстед, $\nu = 10^{10}$ Гц. Для того, чтобы произошло поглощение, необходимо выполнить еще одно условие. Переходы между зеемановскими уровнями можно представить, как повороты магнитного момента относительно внешнего магнитного поля. Эти повороты могут быть осуществлены только под действием силы, возникающей в результате взаимодействия магнитного поля электромагнитной волны H_1 с магнитным моментом электрона. Для возникновения такой силы необходимо, чтобы $\vec{H}_1 \perp \vec{H}$ (см. рис.1).

Чувствительность метода ЭПР определяется скоростью поглощения энергии исследуемой системы. Пусть система содержит N парамагнитных частиц. Для определенности рассмотрим свободные радикалы с чисто спиновым парамагнетизмом ($I = 0$, $s = \frac{1}{2}$, $g = 2$). В этом случае энергетический уровень радикала в магнитном поле расщепляется на два уровня, отстоящих друг от друга на $\Delta W = g\beta H$. Заселенности уровней в отсутствие поглощения энергии будут определяться константами скорости спонтанных переходов K_1 и K_2 : $N_1 K_1 = N_2 K_2$ или: $\frac{N_2}{N_1} = \frac{K_1}{K_2} = e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$, при этом

$N_1 + N_2 = N$, $\frac{\Delta W}{kT} \ll 1$ (при комнатной температуре и $H = 3000$ Э $\frac{\Delta W}{kT} \propto 10^{-3}$).

Поэтому с достаточной точностью $\frac{N_2}{N_1} = 1 - \frac{\Delta W}{kT}$. При резонансном поглощении энергии возникают вынужденные переходы, характеризующиеся константой скорости $K_{ind} = k \cdot H_1^2$, пропорциональной интенсивности электромагнитного

излучения. В этом случае: $N_1(K_1 + K_{инд}) = N_2(K_2 + K_{инд})$, так как вероятность вынужденного перехода сверху вниз и снизу вверх одинакова. Энергия, поглощаемая в единицу времени W_n , будет определяться соотношением:

$$W_n = \Delta W_n K_{инд} (N_1 - N_2) = \frac{NK_1}{2} \left[\frac{(\Delta W)^2}{kT} \right] \left[\frac{K_{инд}}{K_1 + K_{инд}} \right] \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что скорость поглощения энергии пропорциональна числу парамагнитных частиц.

При сильной накачке, когда скорость индуцированных переходов соизмерима со скоростью спонтанных переходов, будет наблюдаться насыщение, т.е. доля поглощенной энергии будет уменьшаться (см. рис.2). Величина константы скорости спонтанных переходов с верхнего уровня на нижний K_1 зависит от взаимодействия возбужденной частицы с окружающей средой. Энергия возбуждения может быть передана кристаллической решетке твердого тела или вызвать переход между зеемановскими уровнями в соседних парамагнитных частицах. В первом случае величина K_1 , определяется временем спин-решеточной релаксации, во втором - спин-спиновой релаксации. Возможна также передача энергии в результате обменного взаимодействия парамагнитных частиц. Величина K_1 есть обратное время жизни парамагнитной частицы в возбужденном состоянии, и, следовательно, она определяет ширину линии поглощения. Согласно принципу не-

определенности $\Delta E \cdot \tau = h$ или $\frac{\Delta E}{K_1} = h$. Если ширину линии поглощения измерять в единицах напряженности магнитного поля, то для ширины линии получим

$$\delta H = \frac{\delta(\Delta W)}{g\beta} \quad (3)$$

Для парамагнитных солей элементов группы железа $K_1 = 10^{10} \text{ с}^{-1}$ свободных радикалов в твердых органических соединениях $K_1 = 10^7 \text{ с}^{-1}$ и $\delta H = 1 \text{ Э}$. Время релаксации и, следовательно, ширина линии поглощения может меняться при изменении параметров изучаемой системы. Так, спин-спиновое взаимодействие может быть уменьшено разбавлением системы - уменьшением концентрации парамагнитных частиц. По зависимости ширины линии от концентрации раствора можно определить константу скорости спинового обмена. Снижение температуры приводит к замедлению спин-решеточной релаксации и сужению линий. Увеличение интенсивности электромагнитного излучения до уровня, когда проявляется эффект насыщения, приводит к уменьшению времени жизни возбужденного состояния парамагнитной частицы и уширению линии. При регистрации спектра ЭПР в виде первой производной линии поглощения амплитуда сигнала J и его ширина δH связаны соотношением $J \cdot \delta H^2 = S$. S - площадь под кривой линии

поглощения, пропорциональная числу радикалов в образце. До сих пор мы не учитывали магнитное поле ядра.

Если ядро является парамагнитным, т.е. обладает собственным магнитным моментом, то на электрон будет действовать магнитное поле $H + \delta H$, где δH - дополнительное магнитное поле, созданное ядром. Это приводит к изменению условия резонанса. Поскольку магнитный момент ядра во внешнем магнитном поле может принимать $2J + 1$ значений, происходит расщепление пика поглощения, так как условия резонанса при плавном изменении магнитного поля будут повторяться $(2J + 1)$ раз. Так, например, сверхтонкое расщепление на одиночных протонах $\left(j = \frac{1}{2}\right)$ приводит к появлению двух линий, на ядрах марганца $\left(j = \frac{5}{2}\right)$ - шести линий.

Характерным для расщепления спектра ЭПР на парамагнитных ядрах одиночных атомов является равная интенсивность всех линий.

В том случае, когда мы имеем дело с многоатомным радикалом, магнитное поле будет определяться суммарным действием нескольких близко лежащих магнитных ядер. В качестве примера рассмотрим сверхтонкое расщепление радикала CH_3 . Три эквивалентных друг другу протона создадут в месте расположения неспаренного электрона магнитные поля, величина которых будет определяться их случайной взаимной ориентацией. Всего возможно 8 комбинаций моментов трех протонов $(\uparrow\uparrow\uparrow, \uparrow\uparrow\downarrow, \uparrow\downarrow\downarrow, \uparrow\downarrow\uparrow, \downarrow\uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow\uparrow, \downarrow\downarrow\uparrow, \downarrow\downarrow\downarrow)$, определяющих значения локального магнитного поля $\left(\pm \frac{3}{2}\Delta H, \pm \frac{1}{2}\Delta H\right)$. Это приводит к тому, что спектр

ЭПР неспаренного электрона, взаимодействующего с тремя эквивалентными протонами, состоит из четырех равноотстоящих друг от друга линий с отношением интенсивностей $1 : 3 : 3 : 1$. Если протоны в радикале не эквивалентны, то электрон взаимодействует с ними в различной степени. Например, радикал CH_2-OH дает спектр (см. рис.3), в котором каждая линия триплета, обусловленного взаимодействием с двумя эквивалентными протонами метиленовой группы, расщепляется далее на дублет вследствие взаимодействия с протоном гидроксильной группы, расположенным на большем расстоянии от неспаренного электрона.

2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

Наблюдение и регистрация спектров в данной работе производится на электронном анализаторе ЭПА-2М. Чувствительность прибора $5 \cdot 10^{-11}$ моль

при записи на самописце, разрешающая способность $0,5 \text{ Эрстед}$. Исследуемый образец помещается в пучность СВЧ магнитного поля резонатора. СВЧ-колебания создаются клистронным генератором и через ферритовую развязку и регулируемый аттенюатор (ручка «Уровень СВЧ») поступают в объемный резонатор, выходят из него и, следуя по волноводу, попадают далее на СВЧ кристаллический детектор. Для согласования волноводного тракта имеются два трансформатора полных сопротивлений. Каждый трансформатор представляет собой металлический стержень, передвигаемый вдоль волновода. Регулировка трансформаторов осуществляется двумя светлыми «колесиками» аттенюаторов, наполовину выступающими из панели прибора. Настройка трансформаторов производится по максимуму сигнала. Применяемый метод генерации СВЧ основан на переходе энергии пучка ускоренных и сгруппированных электронов в энергию элетромагнитного поля резонатора. Клистронный генератор представляет трехэлектродную лампу, на сетку которой подается высокое напряжение и с нее же снимается СВЧ мощность. На анод, называемый отражателем, подается отрицательное относительно катода напряжение. Электроны, пролетая мимо сетки, имеют скорость, соответствующую постоянному потенциалу сетки, а также приобретают дополнительную скорость, величина которой зависит от СВЧ-фазы в этот момент. Долетая до отражателя и возвращаясь обратно, электроны за счет этой дополнительной скорости собираются в сгустки. Время пролета до точки поворота, потенциал которой равен нулю, и обратно к сетке зависит от напряжения на отражателе. Изменяя это напряжение, можно найти момент, когда сформированные сгустки электронов приходят к сетке в противофазе с полем СВЧ и таким образом отдают ему энергию. В результате в лампе поддерживаются незатухающие колебания. Напряжение на отражателе регулируется ручкой «Частота клистрона точно». При медленном вращении ручки можно наблюдать три зоны генерации. На третьей, максимальной, и следует работать. Незначительные отклонения $U_{\text{отраж}}$ от значения, при котором происходит максимальная генерация, не меняют уровень СВЧ, зато частота генерации изменяется. На этом основана тонкая подстройка частоты клистрона. Грубая регулировка производится механическим смещением отражателя с помощью винта, находящегося на клистроне. Поскольку добротность резонатора велика, то уже незначительный уход частоты клистрона приводит к пропаданию детектируемого постоянного напряжения на детекторе или к его колебаниям. Поэтому на приборе имеется блок автоматической настройки частоты (АПЧ), который усиливает напряжение на детекторе, воздействуя на отражатель. Нажатие на панели второй справа кнопки «АПЧ» выключает систему АПЧ, производится настройка «Частота клистрона», затем клавиша «АПЧ» отпускается, и АПЧ захватывает клистрон. Ток детектора показывает микроамперметр, если переключатель «Уровень» поставить в положение «СВЧ». В положении «Ток магнита» микроамперметр показывает ток магнита. Величина магнитного поля может быть определена по градуировочному графику, имеющемуся в описании прибора. Развертка магнитного поля

производится с помощью двух ручек «Амплитуда магнитной развертки». Правая ручка в положениях 2,3 и 4 разворачивает магнитное поле с частотой 50Гц. С этой же частотой разворачивается и луч осциллографа. В положения 1 и 5 включается левая ручка медленной развертки и редуктор, производящий развертку(в верхнем левом углу прибора). Переключение редуктора следует делать без усилий, до тех пор пока шестерни не войдут друг в друга. Левый переключатель меняет амплитуду развертки поля: 1-10Э, 2-20Э, 3-50Э, 4-100Э, 5-250Э, 6-400Э,7-600Э,8,9,10-1000Э. Время развертки указано на редукторе. Вращаясь, редуктор производит пилообразную развертку поля, которую можно наблюдать на микроамперметре. Минимум поля достигается при показании редуктора +16. При этом положении следует подобрать такое поле, чтобы после включения редуктора на самописце сразу начала выписываться линия(«подвести поле под линию»).

Поглощение образцом СВЧ-энергии вызывает уменьшение СВЧ-мощности, выходящей из резонатора и попадающей на СВЧ-детектор. Сигнал с детектора после усиления используется как мера поглощения в образце. Для регистрации сверхтонкой структуры линий поглощения обычно в спектрометрах ЭПР используется автоматическое дифференцирование кривой, описывающей зависимость поглощения от H . Для этого производится дополнительная модуляция с малой амплитудой напряженности внешнего магнитного поля высокой частоте ν_M (обычно $\nu_M \propto 10^6$ Гц) и регистрация сигнала поглощения на частоте ν_M . Амплитуда высокочастотной модуляции магнитного поля подбирается такой, чтобы максимальное изменение поля на образце было много меньше ширины резонансной линии. Сигнал имеет изменяющуюся со скоростью развертки низкочастотную составляющую $\eta(t)$ и высокочастотную составляющую $a(t)\cos w_0 t$. Здесь w_0 — частота модуляции, $a(t)$ — величина, пропорциональная производной линии поглощения. Кроме полезного сигнала на выходе СВЧ детектора присутствуют шумы и паразитные наводки. С целью увеличения отношения сигнала к шуму усиление сигнала производят с помощью синхронного детектора, который представляет собой устройство, осуществляющее умножение входного сигнала на сигнал, поступающий от генератора модуляции.

Полный сигнал, поступающий на вход синхронного детектора, имеет вид

$$Z(t) = \eta(t) + a(t)\cos w_0 t + \sum_x n_x \cos w_x t.$$

Здесь под знаком суммы стоят всевозможные паразитные сигналы. Отметим, что $\eta(t)$ и $a(t)$ изменяются с частотой развертки магнитного поля, которая много меньше частоты w_0 . На выходе синхронного детектора получается сигнал

$$Z^*(t) = Z(t)\cos w_0 t = \eta(t)\cos w_0 t + 0,5a(t)(1 + \cos 2w_0 t) + 0,5\sum n_x(t)[\cos(w_0 - w_x)t + \cos(w_0 + w_x)t]$$

Далее этот сигнал попадает на частотный фильтр, через который эффективно проходят только частоты, меньшие некоторой, определяемой

постоянной времени фильтра. Постоянная времени фильтра меньше периода развертки спектра, но много больше периода модуляции. Поэтому все компоненты, за исключением составляющей $a(t)$ и части шумов, имеющих частоты, близкие к ω_0 , ослаблены на выходе фильтра, это приводит к увеличению отношения сигнала к шуму на выходе фильтра.

ПОРЯДОК ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИБОРА ЭПА-2М

1. Вставить вилки самописца и стабилизатора напряжения в розетки 220В, включить напряжение 220В и кнопку “сеть” прибора.
2. дать прогреться прибору не менее 10 минут.
3. После прогрева нажать кнопку АПЧ, расположенную в правой части прибора.
4. Поставить ручку “Уровень”, расположенную в центре вертикальной панели под микроамперметром, в положение “Ток магнита”.
5. Ручкой “Ток магнита”, “грубо” (слева внизу на вертикальной панели прибора) установить “Ток магнита” на 52 деления по микроамперметру. Ручку “Уровень СВЧ”- в положение “8” (центр вертикальной панели).
6. Ручку “Уровень” перевести в положение “СВЧ”. Если амперметр на нуле, то следует медленно вращая ручку “Частота клистрона точно” (правый нижний угол, вертикальная панель) проследить по показаниям микроамперметра три зоны генерации клистрона и установить ручку на наибольшую из зон. Показание микроамперметра не должно быть менее 20 мкА и в оптимальном случае должно быть 70-90 мкА.
7. Если получено меньшее отклонение стрелки, то сначала нужно показание уровня СВЧ довести до максимума (ручка “Уровень СВЧ” в положение 10), затем вращением ручек аттенюатора (горизонтальная панель, справа и за магнитом) добиться требуемого отклонения стрелки.
8. Нажать третью кнопку “Шунт ЭПП-09” (минимальная чувствительность).
9. Установить нажатием кнопки 4 “Постоянная времени ” постоянную времени 0,2с.
10. Прибор готов к работе. Раствор заливается до половины объема ампулы. Не допускайте попадания раствора на внешнюю поверхность ампулы, на держатель ампулы и в резонатор спектрометра. Вставить ампулу с образцом в держатель так, чтобы нижний конец ампулы выступал из держателя на 6-10мм. Осторожно установить держатель с ампулой в резонатор.
11. Ручку “Амплитуда магнитной развертки, медленная” установить в положение 7, что соответствует диапазону развертки в 600Э.
12. Для выбора нужного диапазона магнитной развертки переключатель “Амплитуда магнитной развертки, 50Гц” установить в положение 5. При этом обеспечивается автоматическая развертка магнитного поля. Развертку можно проследить по вращению шкалы редуктора скорости

развертки. Чтобы за время развертки спектр успел полностью прописаться, необходимо правильно установить границу диапазона развертки. Когда в процессе развертки цифра “+16” шкалы редуктора совпадает с ризкой, выключить развертку переключением ручки “Амплитуда магнитной развертки ” из положения 5 в положение 4. “Ток магнита” установить на 52 деления по микроамперметру. Установить время развертки 3 мин. Теперь запись(развертка) спектра обеспечивается автоматическим переключением переключателя “Амплитуда магнитной развертки, 50Гц” из положения 4 в положение 5.

13. Включить ЭПП-09, установить перо самописца на середину ленты ручкой “Установка нуля ЭПП-09” (вертикальная панель, левее шкалы микроамперметра).

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ **ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ ЭНЕРГИИ НА** **ИНТЕНСИВНОСТЬ ЛИНИЙ СПЕКТРА ЭПР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ** **ВЕЛИЧИНЫ K_e - КОНСТАНТЫ ОБМЕННОГО** **ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ Mn^{+2} В ВОДЕ**

Приступить к экспериментальным измерениям следует после внимательного изучения описания данной работы. Эксперимент проводится в следующей последовательности: Ампулу с 0,1 моль/л раствором $MnCl_2$ в воде вставить в резонатор согласно п.10 предыдущего раздела. Ручкой “Ток магнита”, постепенно увеличивая ток до тех пор, пока на экране осциллографа не пройдут 6 линий спектра Mn^{+2} . Вертикальным перемещением ампулы добиться макс наблюдаемого сигнала. С помощью ручки “Усиление сигнала” (в дальнейшем эту ручку не трогать) и ручки “Уровень СВЧ” установить оптимальную величину наблюдаемого спектра. Дальнейшее проведение эксперимента можно вести двумя путями: с использованием КСП-4, с использованием осциллографической трубки.

ЗАДАНИЕ 1

Снять зависимости интенсивности сигнала от величины СВЧ-энергии спектра ЭПР Mn^{+2} для концентраций $MnCl_2$ в воде 0,1 моль/л. Опыт проводится в следующей последовательности:

1. Вынуть держатель с ампулой из резонатора, установить ручкой “Уровень СВЧ” 100 делений по микроамперметру.
2. Установить держатель с ампулой в резонатор, подвести поле под линию и записать спектр при скорости магнитной развертки 3 мин.
3. Провести опыты, уменьшая значение энергии СВЧ с пустым резонатором последовательно до 90, 80, 70, ... 10 мкА.

- Полученные результаты представить в виде графика с координатами I - интенсивность, W - величина СВЧ энергии.
- Какой вывод о $\frac{K_1}{K_{\text{инд}}}$ можно сделать из полученного выше графика?

ЗАДАНИЕ 2

Снять зависимость ширины линий спектра ЭПР Mn^{+2} для концентраций $MnCl_2$ в воде 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02, 0,1 моль/л. Спектры снимать на 5 диапазоне магнитной развертки при скорости 3 мин. Ширину линии в первом приближении можно определить как ширину между точками максимального наклона и представить в виде: $\Delta H^i = \Delta H_0^i + \Delta H_e^i$, где i - номер линии, ΔH_0^i - ширина линии для раствора с очень малой концентрацией соли, ΔH_e^i - уширение линии, обусловленное спиновым обменом (обменное уширение). Следует отметить, что обменные уширения могут различаться для разных компонент сверхтонкой структуры (СТС). Расстояние между соседними линиями в спектре ЭПР раствора $MnCl_2$ в воде равно 83Э.

Экспериментальные результаты представить в виде графика в координатах ΔH (Э), C (моль/л).

Константа скорости спинового обмена K_e может быть вычислена из экспериментальных данных по формуле

$$K_e = 1,52 \cdot 10^7 \frac{g}{2} (1 - \varphi_i) \frac{\Delta H^i}{\Delta C} (\text{л/моль} \cdot \text{с})$$

φ_i - статистический вес, находится из соотношения: $\varphi_i = \frac{S^i}{S}$, где S^i - интенсивность i -ой компоненты СТС, S - суммарная интенсивность линий. В случае спектра ЭПР Mn^{+2} , очевидно, $\varphi = \frac{1}{6}$. Построить зависимость площади S под кривой линии поглощения от концентрации раствора. Как параметры линии ЭПР зависят от концентрации раствора?

ПОРЯДОК ВЫКЛЮЧЕНИЯ ПРИБОРА

- Вынуть образец из резонатора.
- Нажать и отпустить кнопку “АПЧ” (ряд белых кнопок правее центра).
- Вывести до нуля магнитное поле ручкой “Ток магнита, грубо”.

4. Выключить самописец.
5. Отключить распределительный щит, вынуть вилки прибора из розеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Л. Франкевич. Методы исследования свойств физико-химических систем: Учебное пособие/ Долгопрудный; МФТИ, 1980. С. 17-29.
2. Л.А. Блюменфельд, В.В. Всеволодский, А.Г. Семенов. Применение ЭПР в химии. Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
3. К.А. Маклечлан. Магнитный резонанс. М.: Химия, 1976

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Все приборы, которые питаются от переменного напряжения 220В, должны быть заземлены.
2. В случае неисправности прибора обращаться к преподавателю.
3. Для приготовления нужных концентраций пользуйтесь медицинским шприцем.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите возможные причины аппаратурного искажения линий.
2. Получить формулу для мощности СВЧ, поглощаемой парамагнитными частицами.
3. Изобразить схему переходов между уровнями атома Н в магнитном поле, обуславливающих появление сверхтонкой структуры в спектре ЭПР.

Используемая литература.

1. Методическое пособие к работе “Электронный парамагнитный резонанс” Г.В.Караченцев.Г.Д.Танцырев.А.З.Маруткин. 1992 г .МФТИ.
2. Методическое пособие к работе “Основы магнитной радиоспектрии” Г.В.Караченцев . 1989 г. МФТИ.
3. Лабораторный практикум по общей физике . Том 3 . Квантовая механика. Игошин Ф.Ф. Самарский Ю.А. Ципенюк Ю.М. 1998 г. МФТИ.

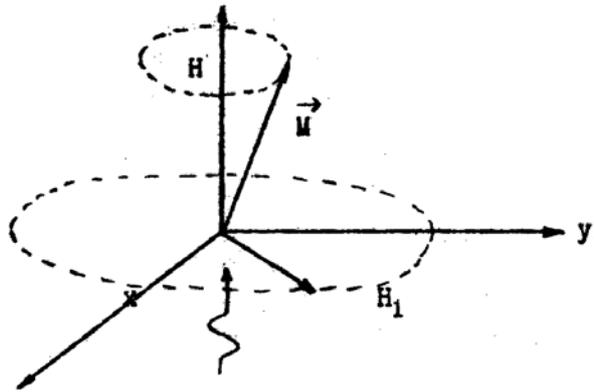


Рис. 1. Переход между зеемановскими уровнями под действием внешнего электромагнитного излучения.

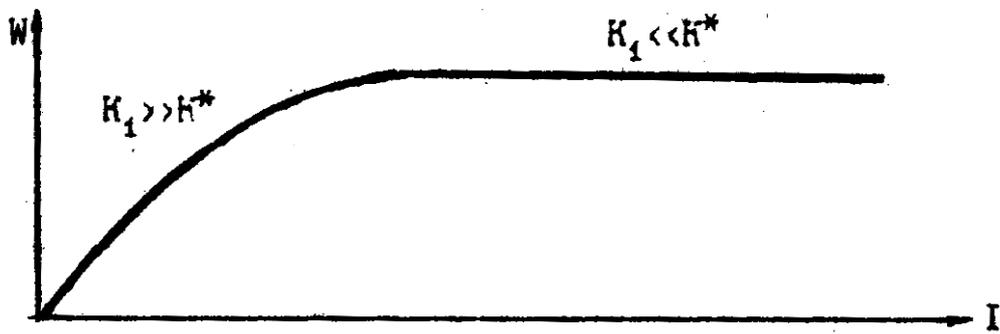


Рис. 2. Насыщение сигнала поглощения с ростом интенсивности электромагнитного излучения.



Рис. 3. Спектр ЭПР радикала $\dot{C}H_2OH$.

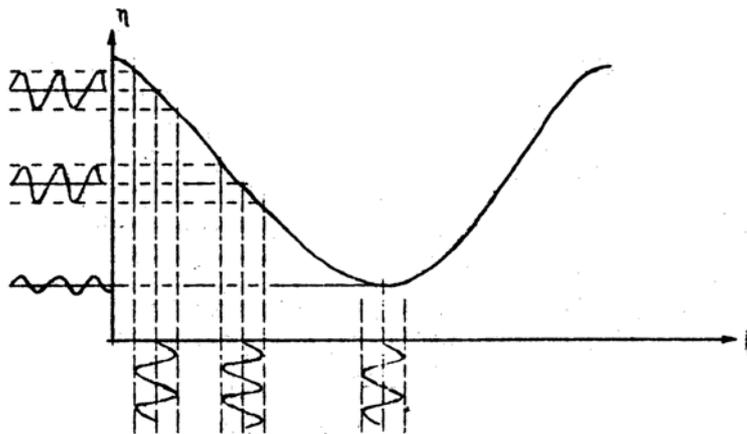


Рис. 4. Автоматическое дифференцирование кривой поглощения.

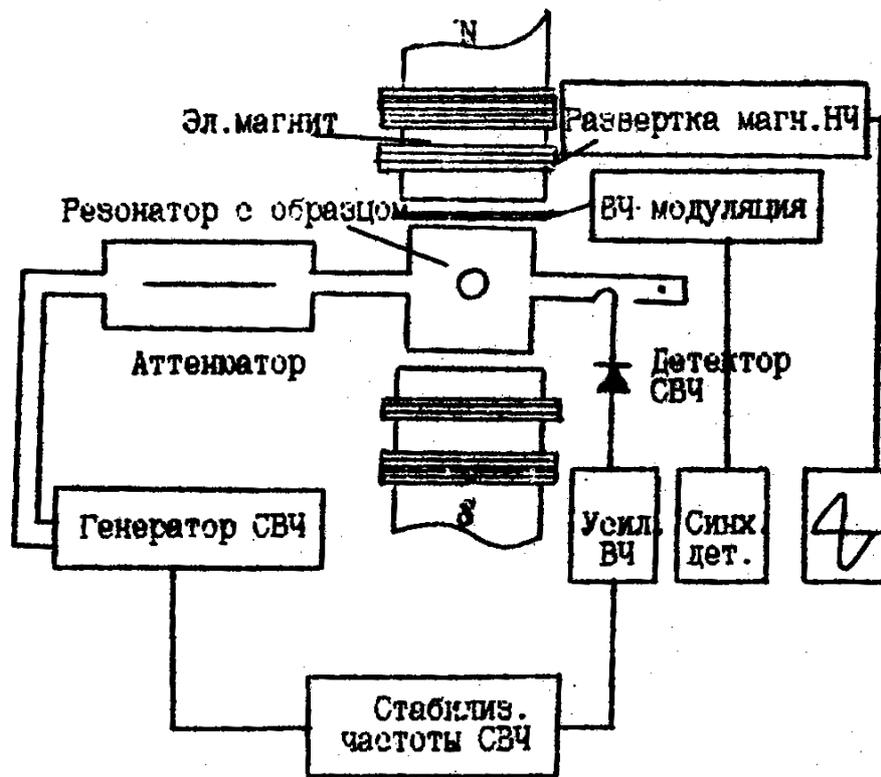
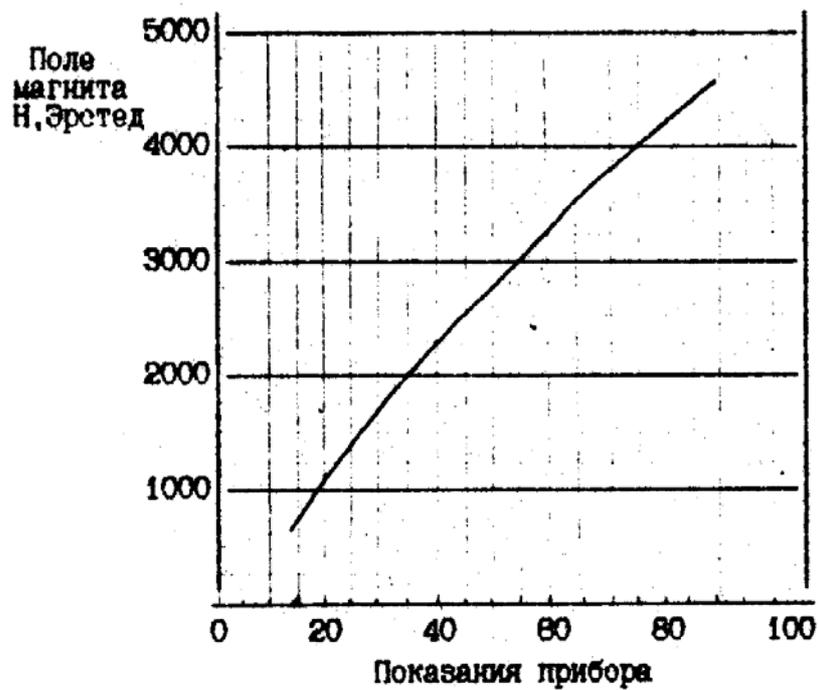


Рис. 5. Блок-схема спектра ЭПР.



Калибровка поля магнита