

Лабораторна робота №5

Дослідження явища електронного парамагнітного резонансу за допомогою радіоспектрометра РЕ-1301.

Мета: Ознайомитись з будовою та принципом дії радіоспектрометра РЕ-1301. Дослідження індукованих квантових переходів між зееманівськими рівнями в слабкому магнітному полі; визначення фактору Ланде і часу життя атома у збудженому стані.

Прилади та обладнання: радіоспектрометр РЕ-1301, зразок парамагнетика.

Теоретичні відомості

Електронний парамагнітний радіоспектрометр типу РЕ-1301 призначений для спостереження і реєстрації спектрів електронного парамагнітного резонансу вільних радикалів, іонів, радіаційних дефектів і парамагнітних частинок. Радіоспектрометр РЕ-1301 володіє чутливістю близько 10^{-11} г·моль по дифенілпикрилгидразил (ДФПГ) і роздільною здатністю біля 0,4 ерст.

1. Принцип роботи

Принцип роботи радіоспектрометра ґрунтується на резонансному поглинанні парамагнітною речовиною енергії надвисокочастотного електромагнітного поля (НВЧ поля) при одночасній дії на досліджуваний зразок постійного магнітного поля в напрямку перпендикулярному до магнітної складової НВЧ поля.

Частота НВЧ поля, при якій відбувається резонансне поглинання енергії зразком, або частота так званого електронного парамагнітного резонансу (ЕПР), пов'язана з величиною постійного магнітного поля таким співвідношенням $h\nu = \mu H_0$, де h – стала Планка, ν – частота НВЧ поля,

H_0 — напруженість постійного магнітного поля в ерстедах,

μ – магнітний момент атома.

Таким чином, очевидно, що резонансне поглинання можна спостерігати при зміні частоти НВЧ поля і постійному значенні магнітного поля або при зміні величини магнітного поля і постійній частоті НВЧ поля. В радіоспектрометрі РЕ 1301 використовується другий варіант аналізу резонансного поглинання речовиною енергії НВЧ поля.

Криві залежності поглинутої зразком НВЧ енергії від напруженості магнітного поля, що діє на зразок, реєструються радіоспектрометром і являють собою спектральні лінії речовини.

Блок схема радіоспектрометра РЕ 1301 показана на рис. 1. В ролі джерела НВЧ енергії використовується клістронний генератор. НВЧ коливання клістронного генератора по хвилеводу через розгалужувачі потужності, які дозволяють проводити контроль потужності і частоти клістрона, феритовий вентиль, аттенюатор, за допомогою якого здійснюється регулювання потужності, і узгоджувач (узгоджує хвильовий тракт з резонатором) подаються в робочий резонатор, який знаходиться в полі електромагніта.

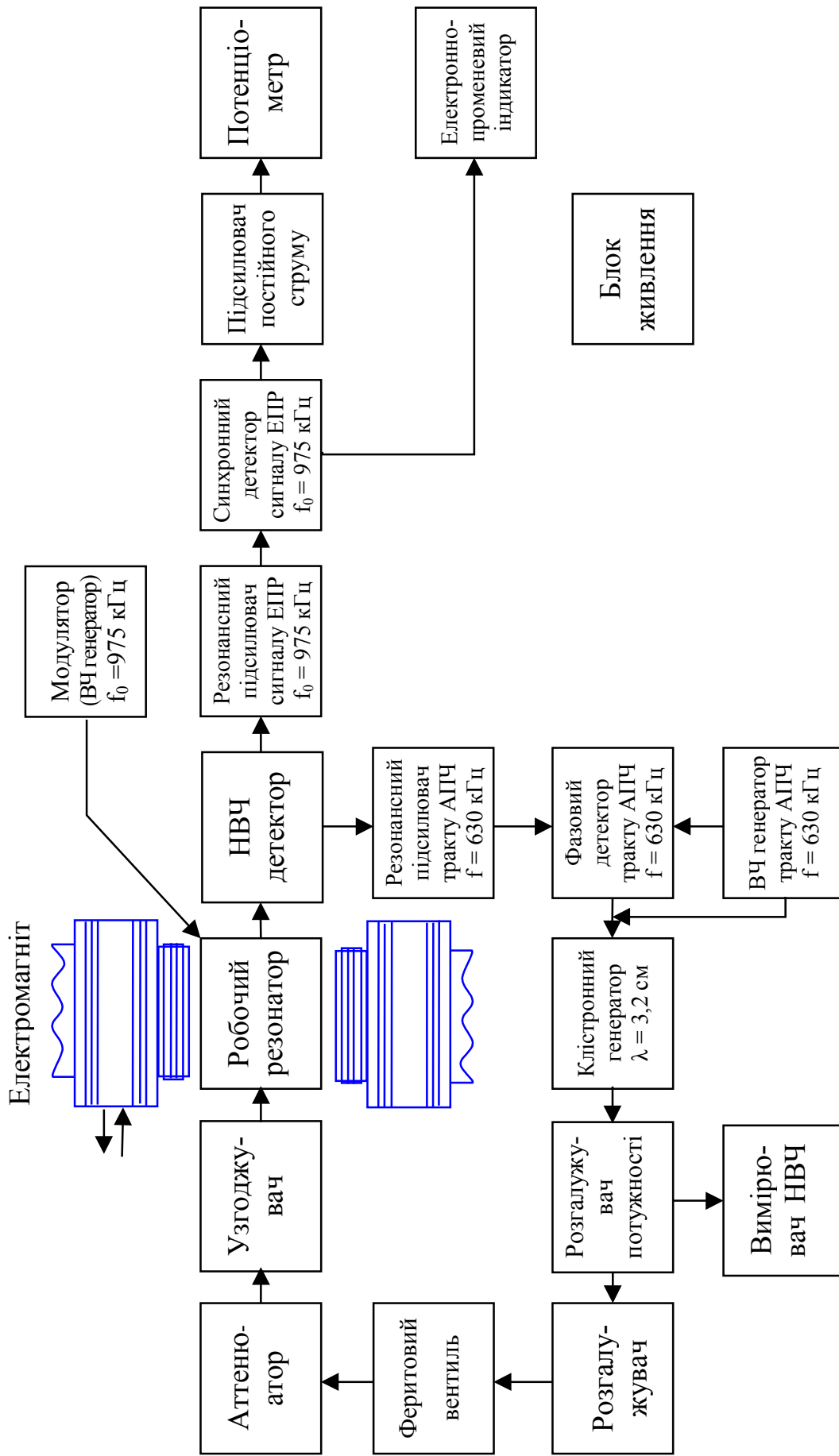


Рис. 1 Блок-схема радіоспектрометра PE-1301

У резонатор, настроєний на постійну частоту, вміщують зразок, в якому відбувається поглинання НВЧ енергії. При частоті НВЧ поля близько 10000 МГц магнітне поле H_0 повинно мати величину декілька тисяч ерстед. Для спостереження спектральних ліній повільно змінюють магнітне поле поблизу значення H_0 з амплітудою, більшою від ширини лінії поглинання. В момент резонансу відбувається поглинання НВЧ енергії, яке фіксується НВЧ детектором-приймачем НВЧ енергії.

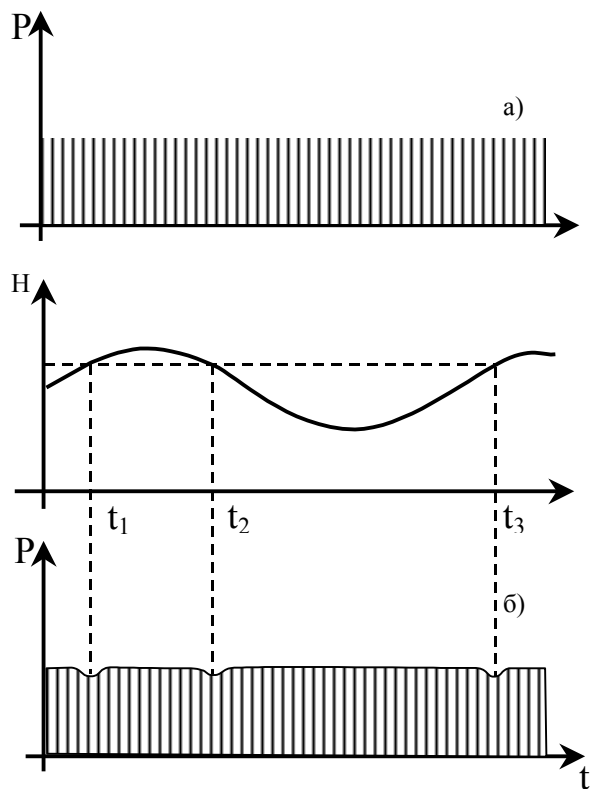


Рис. 2.

На рис. 2 показані розгортка магнітного поля і вид кривої НВЧ-потужності на НВЧ детекторі при відсутності (крива "а") і при наявності зразка в резонаторі (крива "б"). На малюнку помітна зміна НВЧ потужності (за рахунок поглинання зразком) на детекторі при строго визначених значеннях магнітного поля — H (в моменти часу t_1, t_2, t_3).

Абсолютне значення поглинутої зразком потужності дуже мале і трохи перевищує рівень шумів.

Для збільшення відношення сигнал-шум в приладі використовують метод подвійної модуляції магнітного поля (перша модуляція — розгортка). Даний метод дозволяє отримати похідну резонансної функції.

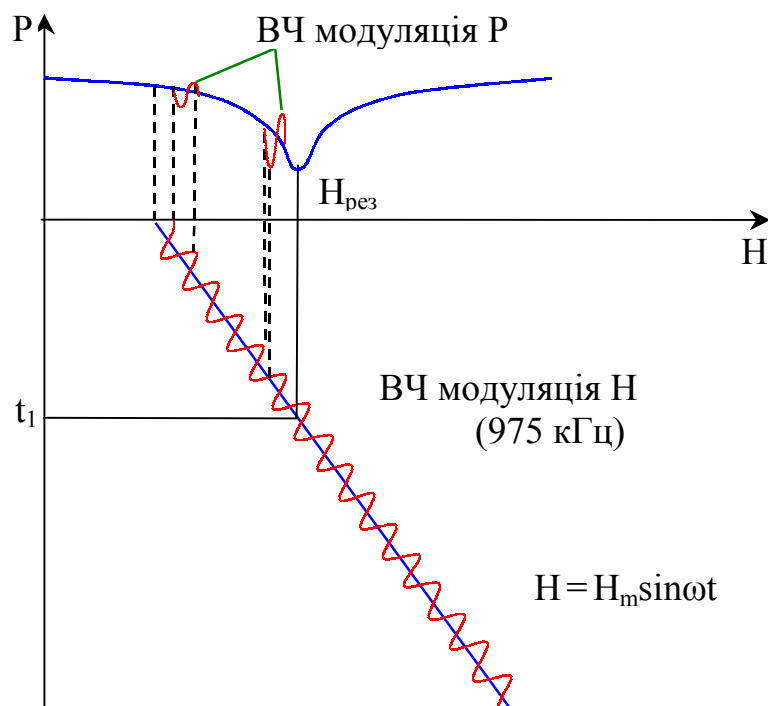


Рис. 3. Подвійна модуляція магнітного поля

Метод подвійної модуляції полягає в наступному; магнітне поле, яке швидко змінюється, модулюється високочастотним полем (ВЧ полем) з частотою 975 кГц і амплітудою в декілька раз меншою півширини лінії поглинання (рис. 3). Це приводить до амплітудної модуляції кривої $P = f(t)$ з частотою близькою до 975 кГц, причому глибина модуляції пропорційна похідній лінії поглинання.

Отримана таким чином

НВЧ електромагнітна хвиля, модульована по амплітуді, поступає на НВЧ детектор, а потім на вхід резонансного підсилювача сигналу ЕПР, з допомогою якого виділяється огинаюча модуляції 975 кГц.

Далі, пройшовши синхронний детектор з опорною частотою 975 кГц, сигнал поступає на індикатор.

Для нормальної роботи радіоспектрометра необхідно, щоб частоти клістронного генератора і робочого резонатора точно співпадали. Для їх узгодження використовується спеціальна схема автоматичної підстройки частоти (АПЧ).

Електронний парамагнітний резонанс був відкритий Е.К. Завойським в 1944 р. Він спостерігається при вміщенні в магнітне поле речовин, що володіють парамагнітними властивостями.

Розглянемо електрон, вміщений в магнітне поле з індукцією \mathbf{V} . Спін електрона, а отже і його магнітний момент, можуть приймати два значення, які відповідають орієнтації "за полем" і "проти поля". Якщо позначити через μ абсолютну величину проекції магнітного моменту електрона, то енергія взаємодії електрона з магнітним полем може приймати одне з двох значень:

$$E_1 = -\mu V, \quad E_2 = \mu V. \quad (1)$$

Отже, енергетичний стан електрона в присутності магнітного поля розщеплюється на два рівні, відстань між якими:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2\mu V, \quad (2)$$

Між цими двома рівнями можливі квантові переходи, які можуть бути зумовлені зовнішнім високочастотним електромагнітним полем при умові, коли енергія квантів рівна відстані між рівнями і коли магнітний вектор зовнішнього поля перпендикулярний вектору магнітної індукції основного поля.

Резонансне значення частоти визначається із формули:

$$h\omega_0 = \Delta E = 2\mu V, \quad (3)$$

Отже, збудження електронних резонансних переходів електромагнітним полем, яке має частоту, що визначається із формули (3), носить назву *електронного парамагнітного резонансу*.

Як відомо, зв'язок між магнітним моментом $\vec{\mu}$, електрона і його механічним моментом \vec{M} виражається через гіромагнітне відношення γ :

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{M} \quad (4)$$

Якщо магнітний момент вимірюється в магнетонах Бора, а механічний – в одиницях \hbar то зв'язок виражається через g-фактор;

$$\vec{\mu} = g \mu_B \frac{\vec{M}}{\hbar} \quad (5)$$

Аналогічно можна записати її для їх проекцій:

$$\mu = \mu_B \frac{gs\hbar}{\hbar} \quad (6)$$

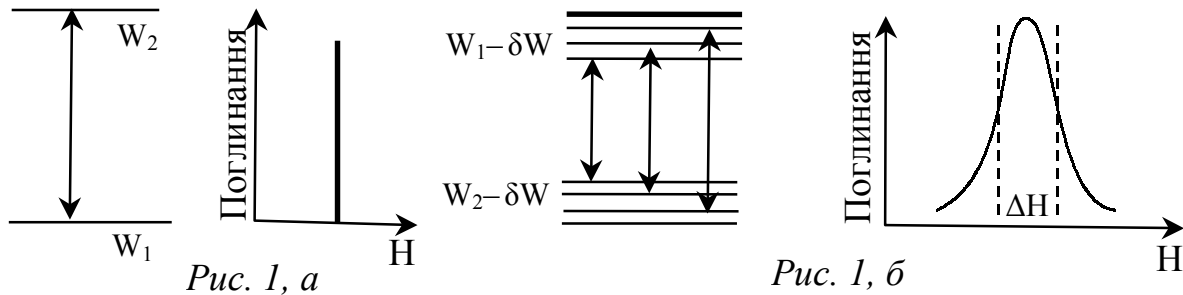
де $s = 1/2$ — спін електрона. Використовуєш формулу (3), одержимо;

$$g = \frac{\hbar\omega_0}{\mu_B B} \quad (7)$$

Або можна переписати;

$$h\nu = g\mu_B B. \quad (8)$$

Із останнього співвідношення випливає, що резонансне поглинання спостерігається при строго визначеній частоті випромінювання, а значить повинно відповідати вузькій лінії поглинання (рис 1, а). Однак практично лінія по-



глинання має деяку кінцеву ширину внаслідок енергетичного розмиття δW рівнів (рис 1, б), яке пов'язане з часом життя системи в цих станах співвідношенням невизначеності:

$$dW \cdot t > h.$$

Порядок виконання роботи.

1. Ввімкнути радіоспектрометр РЕ-1301 згідно інструкції
2. Для спостереження ліній парамагнітного резонансу на екрані електронно-променевого індикатора необхідно:
 - 2.1. настроїти коло НВЧ потужності;
 - 2.2. встановити зразок в резонатор, слідкуючи за тим, щоб не зірвались покази приладу "Ток СВЧ детектора" на пульті управління;
 - 2.3. встановити ручки "Амплітуда імпульсов гашення" і "Фаза гашення" на пульті управління в крайнє ліве положення;
 - 2.4. встановити рукою "Амплітуда ВЧ модуляціи" на панелі управління модуляцію, що відповідає 20-30 поділкам по одноіменному приладу;
 - 2.5. змінюючи значення величини поля магніту рукою "Грубо" на панелі управління, знайти криву сигналу ЕПР на екрані електронно-променевого індикатора;
 - 2.6. сумістити криві сигналу ЕПР на прямому і оберненому ході розгортки рукою "Фаза сигналу" на пульті управління;
 - 2.7. обертаючи поперемінно рукою "Амплітуда імпульсов гашення" і "Фаза гашення" на пульті управління» погасити зворотній хід розгортки в потрібній фазі;
 - 2.8. рукою "Плавно" на панелі управління встановити криву сигналу ЕПР по центру екрана індикатора. Амплітуда кривої сигналу ЕПР регулюється ручками "Усиление сигнала" на пульті управління і "Усиление НЧ" на блоці індикатора;
 - 2.9. обертанням ручки "Фаза сигналу" на пульті управління добитись найкращої форми кривої сигналу.

Хід роботи

1. Отримати сигнал електронного парамагнітного резонансу на даному зразку парамагнетика.
2. Побудувати графік залежності інтенсивності електромагнітної хвилі від величини індуктивності магнітного поля.
3. Визначити ширину лінії поглинання ЕПР. Ширина лінії поглинання вимірюється в одиницях В або в герцах. Вимірювання ширини в одиницях В проводиться по екрану осцилографа. Ширину лінії в герцах можна отримати, скориставшись формулою (3).
4. Користуючись формулою (8) $h\nu = g\mu_B B$ розрахувати значення фактору Ланде.
5. Розрахувати енергетичну ширину $\delta E = \frac{g\mu_B \delta B}{2}$ лінії резонансного поглинання (в формулі δB – ширина лінії поглинання ЕПР).
6. Використовуючи співвідношення невизначеності Гейзенберга $\delta E \tau > \hbar$, визначити "час життя" парамагнетика у збудженому стані.

Контрольні запитання

1. Призначення та основні характеристики радіоспектрометра РЕ-1301.
2. Явище електронного парамагнітного резонансу.
3. Основні складові елементи радіоспектрометра РЕ-1301.
4. Принцип роботи приладу.
5. Метод подвійної модуляції.
6. Які речовини називають парамагнетиками?
7. Які енергетичні стани називають виродженими?
8. Явище електронного парамагнітного резонансу.
9. Вивести формулу для експериментального визначення g-фактору Ланде.
10. Статистичний розподіл атомів парамагнетика за підрівнями.
11. Спектри поглинання, що спостерігаються при електронному парамагнітному резонансі.

Література

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3, М., Наука, 1979.
2. Сивухин Д.В. Общей курс физики. ч. 1, М., Наука, 1986.
3. Лабораторный практикум по физике. ч. 2/ Под редакцией В.А. Базакуцы. Харьков, 1972.
4. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Под редакцией Л.П. Гольдина. М., 1979.
5. Лабораторный практикум по физике/ Под ред. К. А. Борсукова и Ю.А. Уханова. М., В.Ш., 1988.
6. Заводська інструкція по експлуатації до радіоспектрометра РЕ-1301.