

3/81 - kr - brs -

DIDAC S.A.
 P.º 1000 - 1000 - 1000
 TEL. F.º 1000 1000 1000
 28 10 10 10

Instrucciones de Servicio 514 55/56/57

Aparato básico para RSE (cabeza con probeta)
Adaptador para RSE
Aparato de mando para RSE

El aparato básico para RSE se emplea para experimentos sobre la resonancia de spin electrónico. El aparato de mando para RSE suministra todas las tensiones necesarias y la indicación digital de la frecuencia del circuito resonante.

El adaptador para RSE sustituye al aparato de mando en caso de que se utilicen otras fuentes de alimentación y un contador digital.

Principio de medición

Un sistema paramagnético de spin electrónico — una probeta de difenilo-picrilo-hidracilo (DFPH) — en la bobina de un circuito resonante de alta frecuencia absorbe en un campo magnético de corriente continua energía de alta frecuencia, con alteración medible de la resistencia de corriente alterna del circuito resonante. La variación periódica de la resistencia, producida por modulación del campo magnético de corriente continua, puede demostrarse en un osciloscopio.

Ejemplos de experimentos

- Comprobación de la resonancia de spin electrónico
- Frecuencia de resonancia en función del campo magnético (linealidad correlativa del efecto Zeeman)
- Determinación de la relación giromagnética y del factor g
- Anchura de raya
- Amplitud de señal en función de la frecuencia de resonancia

Descripciones de los experimentos 514 55/56/57 en preparación.

1 Notas de seguridad

- El aparato de mando para RSE se suministra ajustado a una tensión de red de 220 V c. a. Para otras tensiones hay que conmutarlo. Véase párrafo 4.2.
 - La salida (C) del aparato de mando para RSE (alimentación electroimán) no tiene protección de sobrecarga.
- Consumo máximo de corriente: 3 A

2 Volumen de suministro, Descripción, Datos técnicos

2.1 514 55 Aparato básico para RSE (cabeza con probeta)

Volumen de suministro:

- Ⓐ Cabeza con probeta para RSE, con reductor de frecuencia 1000:1 y amplificador de señal
- Ⓑ Cable de medición para emplear el aparato como medidor de resonancia
- Ⓒ Circuito resonante eléctrico, pasivo (para estudiar la frecuencia de resonancia en función del campo magnético)
- Ⓓ Probeta DFPH
- Ⓔ, Ⓕ, Ⓖ Bobinas intercambiables para diversas gamas de frecuencia

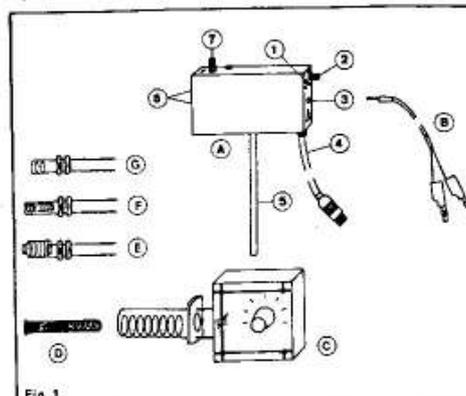


Fig. 1

Elementos de control:

- ① Interruptor
- ② Potenciómetro de ajuste de la amplitud de AF
- ③ Casquillo de conexión para el cable de medición Ⓑ
- ④ Cable múltiple de alimentación y de señales
- ⑤ Varilla de soporte
- ⑥ Casquillos de conexión para las bobinas de AF intercambiables
- ⑦ Condensador giratorio de ajuste de la frecuencia

Datos técnicos:

Alimentación:	±12 V/175 mA
Gamas de frecuencia:	con bobina Ⓓ: aprox. 13 - 30 MHz con bobina Ⓔ: aprox. 30 - 75 MHz con bobina Ⓕ: aprox. 75 - 130 MHz
Tensión en la bobina AF (contra tierra):	aprox. 5 V _{pp} con 13 MHz y máxima amplitud
Señal de RSE:	aprox. 1 ... 6 V (dependiente de la frecuencia)
Transformador de frecuencia:	1000:1
Salida de frecuencia para el contador digital:	TTL
Corriente continua (en la salida Ⓒ):	aprox. 100 μA
Material de probeta:	difenilo-picrilo-hidracilo (DFPH)
Gama de frecuencia del circuito resonante pasivo Ⓒ:	10 - 50 MHz
Dimensiones de la cabeza con probeta:	130 mm x 70 mm x 40 mm
Altura del soporte:	185 mm
Peso:	aprox. 0,7 kg

2.2 514 56 Adaptador para RSE

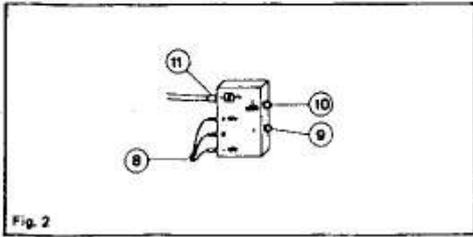


Fig. 2

Elementos de control:

- ⑧ Conexión de la tensión de alimentación
- ⑨ Salida de señal Y
- ⑩ Salida de frecuencia
- ⑪ Conexión para el aparato básico de RSE (cabeza con probeta)

Datos técnicos:

Salida de señal Y: casquillo BNC
 Salida de frecuencia $\frac{f}{1000}$: casquillo BNC
 Entrada de tensión de alimentación:
 ± 12 V, 0, -12 V: hembrillas de 4 mm
 Casquillo de conexión para el aparato básico de RSE: de 5 polos
 Dimensiones: 95 mm x 75 mm x 25 mm
 Peso: 0,2 kg

Datos técnicos:

Conexión a la red: 110/130/220/240 V c. a., 50/60 Hz
 Fusible primario: 0,8 A (inerte) para 220 V y 240 V (ET 69 814)
 1,6 A (inerte) para 110 V y 130 V (ET 69 817)
 Alimentación del campo magnético: c. c. 0 ... 10 V
 c. a. 0 ... 5 V corriente máxima 3 A (sin protección de sobrecarga)
 Regulador de fase: 0 ... 90°
 Indicación digital de la frecuencia: de 4 cifras
 Salida de señal: casquillo BNC
 Salida de modulación: casquillo BNC
 Salida para alimentación del electroimán: par de hembrillas de 4 mm
 Dimensiones: 30 cm x 21 cm x 23 cm
 Peso: aprox. 6,2 kg



Resonancia del spin del electrón; dependencia de campo magnético de la frecuencia de resonancia, determinación del factor-g.

La absorción de campo de energía alterna de una muestra en el campo magnético de un par de bobinas Helmholtz, en las cuales ha sido superimpuesto un campo alterno de alta frecuencia, es medido con equipo ESR y un osciloscopio en mo-

do xy. De la relación entre frecuencia de resonancia y fuerza del campo resonante B del electroimán, es calculado el factor g para el spin del electrón g_s .

Un sistema de spin del electrón paramagnético - una muestra de DIPHENYL-PICRYL-HYDRAZYL (DPPH) - en la bobina del circuito resonante de alta frecuencia absorbe energía de alta frecuencia en un campo CC durante la resonancia. Esto conduce a un cambio medible en la impedancia del circuito resonante.

Con este método de resonancia, podemos descubrir algo referente al momento angular intrínseco del electrón (spin); el torque magnético, las posibilidades de ajuste cuantificado del spin en el campo magnético externo y el nivel de energía conexo a él. Para hacer esto, fuentes entre niveles de energía son inducidos en campos de corriente alterna de alta frecuencia, correspondiente a dos posibles ajustes estables del spin en el campo magnético externo.

El compuesto orgánico Diphenyl-Picryl-Hydrazyl (DPPH) es un radical, en el cual un electrón no apareado aparece en uno de los átomos de nitrógeno (vea fig. 1).

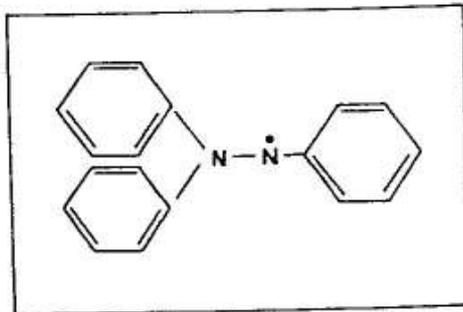


Fig. 1: DPPH

Los electrones de una muestra DPPH, los cuales no poseen ningún momento angular orbital ($l = 0$), son muy adecuados para experimentos de resonancia del spin del electrón.

La muestra es colocada en un campo magnético CC, el cual es superimpuesto por un campo magnético AC de alta frecuencia (en la bobina de un circuito resonante).

En el caso de resonancia (la energía de los fotones inmediatas es igual a la diferencia de energía de dos posibles ajustes cuánticos del momento angular intrínseco del electrón (spin); se inducen transiciones) ocurre una absorción de energía de alta frecuencia, lo que resulta en un cambio en la impedancia del circuito resonante.

Durante la medición de resonancia del spin del electrón, debido a razones experimentales, la frecuencia de las microondas usadas no está adaptada, pero la fuerza del campo magnético externo es variada.

Mediante modulación del campo magnético CC, un cambio en resistencia durante la resonancia puede ser periódicamente efectuado y por ello puede ser visualizado en el osciloscopio.

Placas de deflexión vertical: voltaje proporcional a la amplitud del campo de alta frecuencia.

Placas de deflexión horizontal: voltaje proporcional al campo de las bobinas Helmholtz.

La frecuencia de resonancia f es una función de la fuerza B del campo resonante. La dependencia es determinada experimentalmente, luego es comparada con el resultado teórico derivado a continuación y luego evaluado.

- Fórmula de resonancia del spin del electrón.

Un momento magnético es enlazado con el spin del electrón. Esto puede ser claramente comprendido considerando al electrón como una carga eléctrica rotatoria y por la virtud del hecho que una corriente circular posee un momento magnético. Debido a la carga negativa del electrón, el momento magnético actúa en la dirección opuesta al spin. Esta clara noción de un electrón rotatorio no puede ser tomada literalmente, porque no pueden ser derivados de ella resultados cuantitativamente correctos. En particular ella no conlleva a (consigue) que el spin del electrón tiene sólo números medios.

La relación entre el spin del electrón \vec{s} y el momento magnético $\vec{\mu}_s$ está expresada en la forma:

$$\vec{\mu}_s = \frac{g_s \mu_B}{\hbar} \vec{s}$$

μ_B es el magnetón Bohr, describiendo la unidad estructural para el momento magnético atómico; y \hbar (lea 'h- cruz'; $\hbar = h/2\pi$) quantum de

acción Planck, el cual en un modo similar es la unidad estructural para el momento angular atómico. La constante g_s es un valor característico para el electrón, el que es designado como el factor g del spin del electrón.

Este muestra la razón de los valores del momento magnético a ese del momento angular en los correspondientes unidades atómicas:

$$g_s = \frac{|\vec{\mu}_s|/\mu_B}{|\vec{s}|/\hbar}$$

Si es formada la razón de momento magnético y momento angular orbital, entonces es obtenido el valor experimentalmente correcto $g = 1$ y para el magnetón Bohr uno $\mu_B = e\hbar/(2m_0 \cdot c)$; m_0 es el cálculo $\mu_B = e\hbar/(2m_0 \cdot c)$; m_0 es la masa restante del electrón. El factor g del spin de un electrón no puede ser comprendido por la física clásica (vea nota al final). Solo puede ser comprendido mediante mecánica relativista del quantum. Tiene un valor $g_s = 2$ con un factor de corrección de 0.1% lo cual esta acorde con el experimento.

Para derivar la formula de resonancia, son usados los resultados de la mecánica del quantum, con lo cual el momento angular orbital \vec{l} puede ser calculado con la formula $\vec{l} = \gamma \Gamma (l + \frac{1}{2}) \hbar$. l es el número quantum del momento angular. También, los componentes observables del momento angular son cuantificados en una dirección privilegiada de acuerdo a la formula $l_z = m\hbar$. m es el número de quantum magnético. La dirección z está definida aquí por el campo magnético. Para el momento angular orbital con un número de quantum orbital l , m debe tener valores integrales, $m = 0, +1, +2, \dots, +l$. En total, un número impar de valores $2l + 1$ y el mismo número de niveles de energía son obtenidos (dirección z corresponde a la dirección del campo externo).

El vector de momento angular \vec{s} sigue las mismas reglas que aquel del momento angular orbital.

$$\vec{s} = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar$$

$$s_z = m_s \cdot \hbar; \quad m_s = -s, \dots, +s$$

Cuando partimos el estado básico S ($l = 0$), en dos componentes (número par), podemos concluir que el electrón tiene un spin. Por otra parte, el número quantum del spin debe tener el valor $s = \frac{1}{2}$, así que para todos los posibles valores del número magnético del spin m_s :

$$2 \cdot s + 1 = 2.$$

El número quantum magnético del spin sólo puede tomarse sobre el valor $m_s = \pm \frac{1}{2}$, esto es capaz de explicar el partimiento en dos niveles.

Con sólo dos posibles posiciones del spin, el momento magnético del electrón que está acoplado con el momento angular intrínseco tiene también solo dos posibilidades de posicionado. De

$$\vec{\mu} = -g_s \frac{e\hbar}{4m_0} \vec{s} \text{ und } s_z = \pm \hbar/2$$

sigue que el componente z del momento magnético es:

$$\mu_z = \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B.$$

La energía potencial E_m de un momento magnético $\vec{\mu}$ que está en un campo magnético con densidad de fuerza de flujo B es:

$$E_m = \vec{\mu} \cdot \vec{B} = \mu_z B.$$

Acordemente, la energía E_0 , que tiene un electrón sin un campo magnético, dividida en los dos siguientes niveles (compare fig. 2):

$$E_m = E_0 \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B B.$$

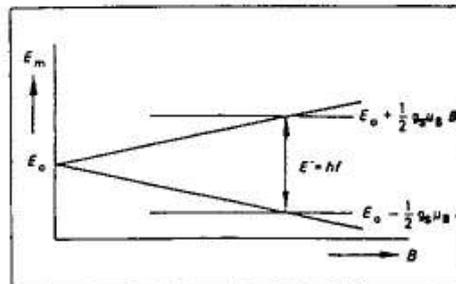


Fig. 2: Partiendo un nivel de energía en un campo magnético (impulso total $j = s + l = s$) con condiciones de resonancia.

La absorción de resonancia tiene lugar cuando la energía del fotón de irradiación $E = hf$ es igual al partimiento magnético de energía. Aquí f es la frecuencia de haz. Como la formula de resonancia obtenemos

$$hf = g_s \mu_B B \quad \vec{B} \text{ en mT y en amplitud}$$

En general, debemos tomar en consideración el hecho que el momento angular total J es la suma del momento angular orbital y el spin.

Equipamiento:

1 Unidad básica ESR (cabezal muestreador	514 55
1 Par de bobinas Helmholtz	555 06
3 Bases cúbicas	300 11
1 Osciloscopio, dos canales p.ej.	575 20
2 Cables blindados, BNC	575 24

Fuentes de poder:

1 Unidad de control ESR	514 57
y	
1 Instrumento de medida D, rango de medición 3A, por ej. instrumento de medida E....D	531 88
3 Cables de conexión, 50 cm	501 28
2 Cables de conexión, 25 cm	501 23

Montaje:

Conecte las bobinas Helmholtz en paralelo, elija una distancia para las bobinas igual al radio r de las bobinas ($r = 6,8 \text{ cm}$)

Importante

A continuación la corriente en cada bobina será designada I . Debido a la conexión en paralelo de ambas bobinas, el amperímetro señala $2 I$.

Posicionamiento del osciloscopio

HOR, EXT

Y_1 : AC, $0,5 \frac{V}{CM}$

X : AC, $2 \frac{V}{CM}$

Punto de origen: La mitad de la línea superior de la pantalla.

Ejecución del experimento:

Elija una de las siguientes bobinas enchufables correspondientes al rango de frecuencia del campo de corriente alterna de alta frecuencia:

- Bobina enchufable (E) (f aprox. 13-30 MHz)
- Bobina enchufable (F) (f aprox. 30-75 MHz)
- Bobina enchufable (G) (f aprox. 75-130 MHz)

Inserte la muestra DPPH

Si la amplitud del campo CA superpuesta con el campo magnético CC es demasiado pequeña, lentamente incremente el campo magnético CC hasta que se puedan ver impulsos en la pantalla

Nota:

En general pueden ser vistos dos impulsos de resonancia. Esto es porque el campo magnético CA pasa a través de la posición de resonancia dos veces por fase y porque existe una compensación de fase entre el voltaje mostrado en el osciloscopio (verifique con un osciloscopio de dos canales; en vez de entrada X (HOR.EXT.):

entrada Y_{II} , TIMEBASE $1 \frac{MS}{CM}$).

Haga coincidir impulsos de resonancia con el variador de fase y variando el campo de corriente directa, pongalo simétricamente al centro de la pantalla ($X = 0$) (ejemplo: oscilograma de la fig. 4).

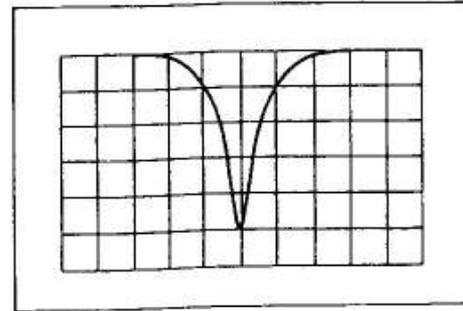
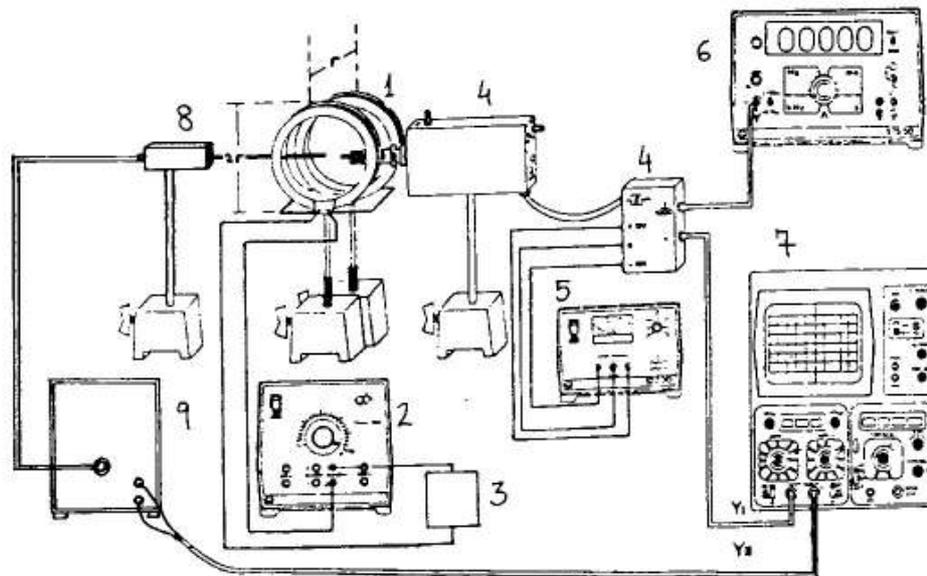


Fig. 4: Oscilograma

Fig. 3: Montaje del experimento



1. BOBINAS DE HELMHOLTZ.
2. ALIMENTACION DE LAS BOBINAS.
3. AMPERIMETRO.
4. CIRCUITO DE ALTA FRECUENCIA.
5. ALIMENTACION DEL C. DE ALTA FRECUENCIA.

6. FRECUENCIOMETRO.
7. OSCILOSCOPIO.
8. SONDA HALL.
9. TESLAMETRO.

Incremente la frecuencia f del oscilador HF, así que las líneas de resonancia se desplacen a la derecha en la pantalla del osciloscopio. Púese hay resonancia sólo cuando existe un gran densidad de fuerza de flujo magnético B .

Incrementando el campo magnético de corriente directa, reponga la línea de resonancia de regreso a su posición original (al medio de la pantalla) (simétrica a $X = 0$)

Mida la frecuencia f y la amplitud I de la corriente directa la cual es proporcional a B . Para una exacta medición de I , elija una señal ESR baja decreciendo la amplitud de modulación del campo externo y ajuste la señal ESR remanente así que sea simétrica a la mitad de la pantalla ($X = 0$) con el campo de corriente directa (vea fig. 5).

Determine el par de valores f e I de acuerdo a los métodos descritos (vea diagrama fig. 6).

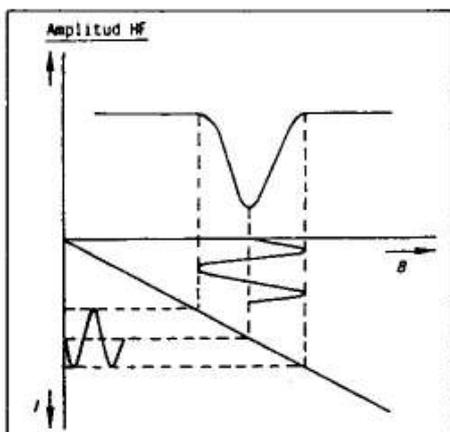


Fig. 5: En el caso de un impulso simétrico de resonancia su máximo marca la amplitud del campo magnético CC con una densidad de fuerza de flujo B proporcional a I

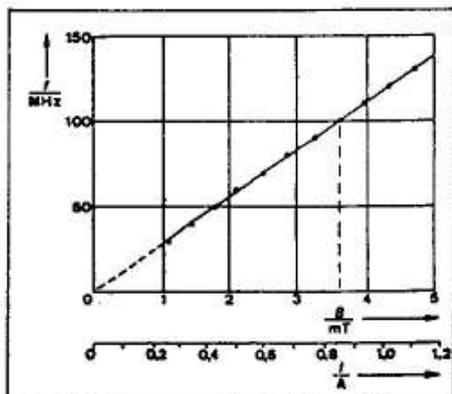


Fig. 6: Frecuencia de resonancia f como función de la fuerza de campo magnético resonante B , proporcional a la corriente medida en las bobinas Helmholtz

Deduciendo B midiendo I :

Si la cantidad de la corriente I de la bobina es conocida, entonces la densidad de fuerza de flujo B del campo magnético casi homogéneo en el par de bobinas Helmholtz (distancia entre las bobinas = radio de bobina) pueden ser calculado con la ley de Bio-Savart.

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot \frac{n}{r} \cdot I$$

n = Número de espiras en la bobina
 r = Radio de la bobina
 I = Corriente en cada bobina

Con el campo magnético constante

$$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$$

$$n = 320 \text{ y}$$

$$r = 6,8 \text{ cm}$$

$$\text{llegamos a } \frac{B}{mT} = 4,23 \frac{I}{A}$$

Recalibre la abscisa I en fig. 6 acorde a esta relación

Ejemplo de medición:

La pendiente de la línea está tomado del diagrama fig. 6

$$\frac{f}{B} = \frac{100 \text{ MHz}}{3,57 \text{ mT}}$$

Evaluación y resultados:

La frecuencia de resonancia es proporcional a la densidad B de fuerza de flujo magnético resonante

De la condición de resonancia

$$h \cdot f = g_s \cdot \mu_B \cdot B \quad \text{se concluye que}$$

$$\frac{f}{B} = \frac{g_s \cdot \mu_B}{h}$$

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2$$

(quantum de acción Planck)

$$\mu_B = 9,273 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

(magnetón Bohr)

El factor g puede ser calculado con la ayuda de la pendiente experimentalmente determinada f/B :

$$g_s = \frac{h \cdot f}{\mu_B \cdot B} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2 \cdot 100 \text{ MHz}}{9,273 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 \cdot 3,57 \text{ mT}} = 2,0$$

El factor g ($g_2 = \frac{h \cdot f}{\mu_B \cdot B}$) que fue calculado con la ayuda de la constante de proporcionalidad f/B , tiene el valor 2.0.

Nota:
El factor-g $g_s = 2$ no puede ser comprendido en física clásica.

$g_s = 2$ significa que el spin genera por dos veces como máximo un momento magnético como una carga rotatoria clásica con el momento angular $1/2 h$.

Literatura sobre resonancia del spin del electron

- (1) Elektronenspin-Resonanz
F. Schneider und M. Plato
Thiemig-Taschenbücher Band 40
Verlag Karl Thiemig KG, München
- (2) Paramagnetic Resonance in Solids
W. Low
Academic Press 1960, New York und London
- (3) Principles of Magnetic Resonance
C. P. Slichter
Harper and Row 1963
- (4) Paramagnetic Resonance
G.E. Pake
W.A. Benjamin 1962, New York