

关于 g 因子的测量方法之探讨

--电子自旋共振实验

金可翔 0519077

引言

- 微波电子自旋共振涉及微波技术，是一种重要的近代物理实验技术
- 实验内容之一：较为精确地测量g因子
- 2个要点：
 1. 选择正确的共振波形测量共振时的微波频率
 2. 选择适当的测量方法测量磁场消除影响

实验原理

- 自由电子的自旋磁矩和外加恒定磁场 \mathbf{B}_0 相互作用将使基态能级发生分裂

2个能级之间的能量差 ΔE 与外加磁场 \mathbf{B}_0 的大小成正比:

$$\Delta E = \mu_B g B_0, \quad (1)$$

- g — Lande因子
完全自由电子 $g = 2.00232$ (无量纲的常量)
 μ_B — Bohr 磁子

实验原理

- 若在垂直于静磁场的方向加一个频率为 ν 的微波交变磁场, 当微波频率 ν 与直流静磁场 \mathbf{B}_0 满足关系式:

$$h\nu = \Delta E = \mu_B g B_0 \quad \text{共振条件} \quad (2)$$

- 此时, 少量处于低能级上的电子从微波磁场吸收能量, 跃迁到高能级上去
——电子自旋共振或电子顺磁共振

- 由式 (2) 得

$$g = \frac{h}{\mu_B} \frac{\nu}{B_0}$$

(3)

- **g** 因子的测量精度决定于：
微波频率
共振磁场的准确测量

实验方法

- 环行器的反射法通过示波器观测电子自旋共振信号
- 实验样品：顺磁物质二苯基苦酸基联氨（**DPPH**）



固定微波源频率不变, 用频率计测量出微波频率, 计算波导波长 λ_g

$$D = n \frac{\lambda_g}{2}, n = 1, 2, 3, \dots$$

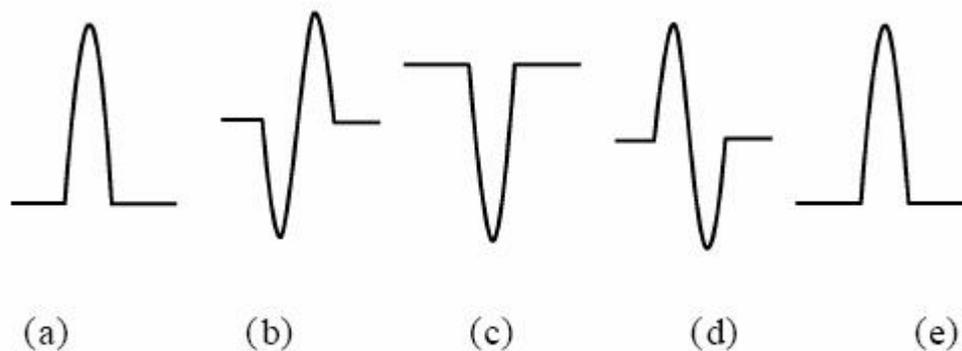


图 1 电子自旋共振信号的不同波形

测量的条件选择中存在的影晌

- 1 共振信号的波形选择对g因子的影响
- 2 磁场测量方法对g因子的影响

布洛赫方程及其稳态解

发生自旋共振时,外加磁场和弛豫作用对顺磁物质的磁化强度矢量 \mathbf{M} 的共同作用可用著名的布洛赫方程描述:

为求解方程方便,引入转动坐标系 $(\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}')$, \mathbf{x}' 轴与微波磁场 \mathbf{B}_1 重合,新坐标以频率 $\omega = 2\pi\nu$ 绕 \mathbf{z}' 轴(\mathbf{z}' 轴与原来的 \mathbf{z} 轴重合)转动, ν 是微波频率,若用 u, v 表示磁化强度 \mathbf{M} 在 \mathbf{x}' 和 \mathbf{y}' 方向上的分量,当发生磁共振时,布洛赫方程(4)的稳态解为:

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dt} = \gamma(M_y B_0 + M_z B_1 \sin \omega t) - \frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} = \gamma(M_z B_1 \cos \omega t - M_x B_0) - \frac{M_y}{T_2} \\ \frac{dM_z}{dt} = \gamma(-M_x B_1 \sin \omega t - M_y B_1 \cos \omega t) - \frac{M_z - M_0}{T_1} \end{cases}$$

$$u = \frac{\gamma B_1 T_2^2 (\omega_0 - \omega) M_0}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2} - \frac{\gamma B_1 M_0 T_2}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

$$v = \frac{\gamma B_1 T_2^2 (\omega_0 - \omega) M_0}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

$$M_z = \frac{[1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2] M_0}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

图1 (c) 所对应的微波频率才是真正的电子自旋共振频率

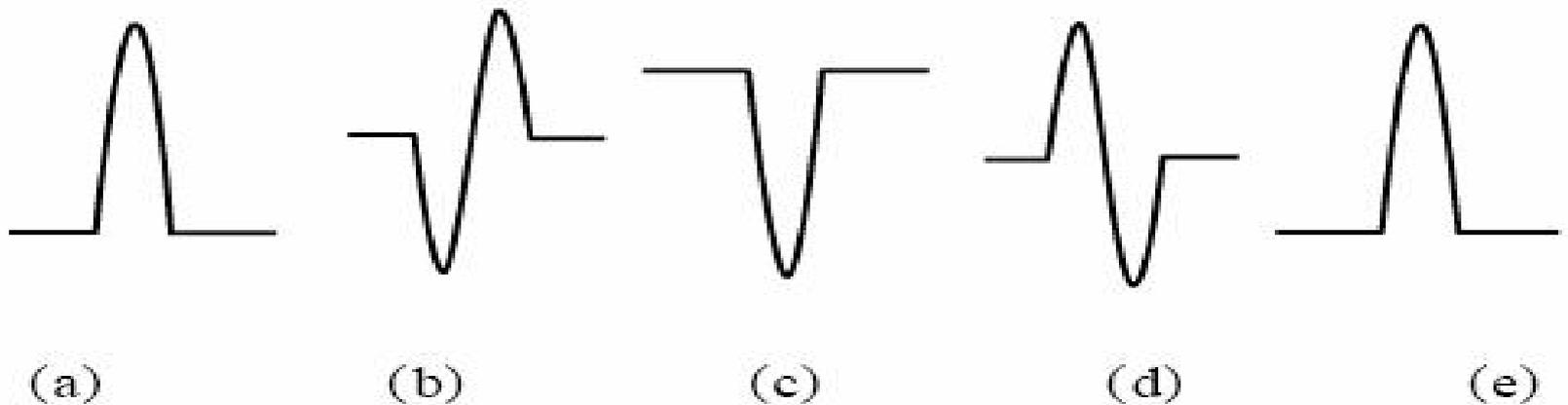


图 1 电子自旋共振信号的不同波形

$\omega = \omega_0$	共振吸收信号 v 最强	色散信号 u 最弱 为零	图 (c)
$\omega \neq \omega_0$	共振吸收信号 v 减小	$u \neq 0$ 的色散信号	图(b)和(d)
$\omega_0 - \omega = \pm 90^\circ$	没有吸收信号	只有色散信号	图(a)= 和(e)

为比较准确地测量g 因子,必须消除交流扫描磁场和地磁场的影响,测量真正的直流共振磁场 B_0 .

- 实验中样品所在处外磁场B 实际上是直流磁场 B_0 、交流扫描磁场 $B_m \sin \omega' t$ 和地磁场 B_{\perp} 的合成磁场

$$B = B_0 + B_m \sin \omega' t + B_{\perp}$$

- 通过调节扫描场的相位使共振发生在 $\sin \omega' t = 0$ 的时刻即可在测量中消除交流扫描磁场的影响
- 地磁场垂直分量的消除可以通过改变直流磁场的方向,即改变电磁线圈电流的方向,分别测量对应不同方向的共振磁场 H_1 和 H_2 ,则 $B_0 = (H_1 + H_2)/2$ 就是消除了地磁场影响的共振磁场.

结论:

- 1 选择正确的共振波形:
 - 图1 (c) 所对应的微波频率才是真正的电子自旋共振频率.如果在实验时测量的微波频率是对应于图1中其他的波形,则会给 g 因子的计算带来误差.
- 2选择适当的测量方法测量磁场消除影响
 - 消除交流扫描磁场的影响
 - 消除地磁场垂直分量
 - 因为一般的电磁铁的2个磁极间的磁场并不是特别均匀,实验时应尽量将样品放在磁极的中心区域,并在测量磁场时将探头放在样品所在的位置进行测量



谢谢