

微波电子自旋共振实验中信号幅度和输出功率的关系

陈帆

(复旦大学 物理系, 上海 200433)

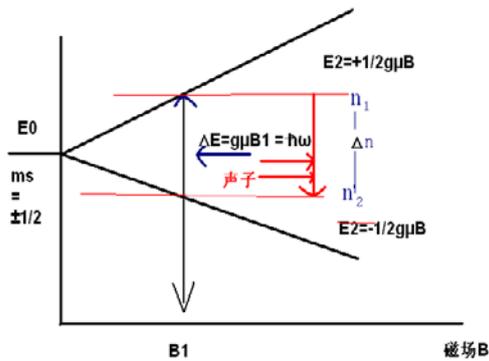
摘要: 本文先建立了 DPPH 自旋共振模型, 从理论上推导出吸收信号幅度与输出功率的线性关系, 继而给出为验证此关系设计的实验及其结果。并利用此结果优化测量过程, 同时在排除地磁场的干扰情况下测量了 g 因子。

关键词: DPPH 微波电子自旋共振实验 吸收信号幅度 g 因子

电子自旋共振(Electron Spin Resonance), 缩写为 ESR, 又称顺磁共振(Paramagnetic Resonance), 是指处于恒定磁场中的电子自旋磁矩在射频电磁场作用下发生的一种磁能级间的共振跃迁现象。它由 Pauli 在 1924 年首先提出的, 目前在发现过渡族元素的离子、研究半导体中的杂质和缺陷、离子晶体的结构、金属和半导体中电子交换的速度以及导电电子的性质等方面都有广泛的运用。建立在假设吸收信号的顶点为电子吸收光子发生自旋跃迁以及光子和声子共同诱发的电子自旋辐射的动态平衡点, 本文具体分析了每个过程的影响, 并最终得出了信号幅度与输出功率的关系。同时, 为了验证此关系, 利用 YM1123 微波信号发射源, 并在输出信号口外接线性放大器和数字示波器, 改变输出功率, 直接记录观察了信号幅度和输出功率的关系。

1 理论部分

如图所示, 在磁场 B_1 下, 磁量子数为 $+1/2$ 和 $-1/2$ 的自旋能级发生了劈裂 劈裂后能级差为 νE 。其中 n_1 、 n_2 分别代表上下能级的电子数。



图一 跃迁辐射动态平衡示意图

此时若存在频率 $f = \nu E/h$ 的光子使得跃迁的概率为 P , 此时辐射的概率也为 P , 也就是说:

$$\frac{dn_1}{dt} = -n_1 P \quad \frac{dn_2}{dt} = -n_2 P$$

将两式相减, $\Delta n = n_1 - n_2$, 得到:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\Delta n P$$

在热平衡状态下, 能级粒子服从玻尔兹曼分布, $\nu n > 0$, 因此当光子入射时会被吸收。

此时, 在 DPPH 晶格当中声子与高能级电子碰撞而使其失去能量向下跃迁, 假设此过程的迟豫时间为 τ , 在没有光子入射时的 $n_1 - n_2 = \nu n_0$, 则:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n - \Delta n_0}{\tau}$$

结合两式, 得到:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\nu \left(\frac{\Delta n - \Delta n_0}{\tau} + \Delta n P \right)$$

吸收信号的顶点处为一动态平衡点, 即

$$\frac{d\Delta n}{dt} = 0。因而:$$

$$\frac{\Delta n - \Delta n_0}{\tau} + \Delta n P = 0 \quad \Delta n = \frac{\Delta n_0}{1 + P\tau}$$

τ 为一与温度有关的参数, 温度不变时, 可

视为常数。由于 P 和 τ 都远小于 1, 因而可以对上式进行泰勒展开, 同时信号的幅度应正比于动态平衡和静态时的粒子数差值, 因而:

$$\Delta n - \Delta n_0 \approx \Delta n_0 P\tau$$

因此恒温时, 信号幅度正比于跃迁概率 P 。

设二能级系统 a、b 对应波函数 Ψ_a 、 Ψ_b , 能量

E_a 、 E_b , 则体系随时间的波函数为:

$$\Psi(t) = C_a \Psi_a e^{-iE_a t/\hbar} + C_b \Psi_b e^{-iE_b t/\hbar}$$

粒子处于 a、b 能级的概率分别为 $|C_a|^2$ 、 $|C_b|^2$,

$$|C_a|^2 + |C_b|^2 = 1; \text{ 将其带入方程 } H\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

$H=H_0+H'$, 其中 H' 为光子入射微扰。设 H' 为二阶微扰 $\begin{pmatrix} 0 & H'_{ab} \\ H'_{ba} & 0 \end{pmatrix}$ 代入后, 设 $C_{a0} = 1$ 、 $C_{b0} = 0$ 得:

$$C'_a = -\frac{i}{\hbar}H'_{ab}e^{-i\omega_0t}C_b \quad C'_b = -\frac{i}{\hbar}H'_{ba}e^{-i\omega_0t}C_a$$

$$\text{其中 } \omega_0 = \frac{E_b - E_a}{\hbar}$$

对于光波, $H'_{ba} = H'_{ab} = -rE\cos(\omega t)$;将其带入后计算得 $C_b^2 = P = \left(\frac{rE}{\hbar}\right)^2 \frac{\sin^2 \frac{\omega_0 - \omega}{2}}{(\omega_0 - \omega)^2}$, 继而对所有光谱积分得出跃迁辐射概率 $P_{ab} = P_{ba} = P$:

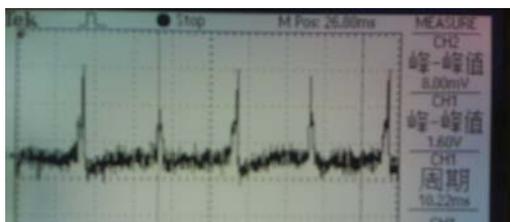
$$p = \left(\frac{rE}{\hbar}\right)^2 \int_0^\infty \rho(\omega) \frac{\sin^2 \frac{\omega_0 - \omega}{2}}{(\omega_0 - \omega)^2} d\omega$$

其中, 后面的积分项为一常数, 因而跃迁概率和电场强度的平方成线性关系。而对于电磁波其辐射功率 $p = \frac{1}{2}\epsilon E^2$ 。即: 信号幅度 \propto 跃迁概率 \propto

$E^2 \propto$ 辐射功率, 最终得出信号幅度与辐射功率成线性关系。

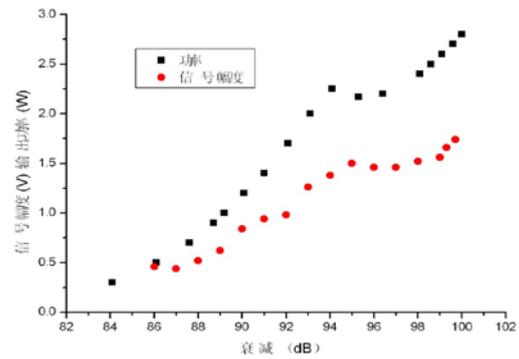
2 实验部分

将实验所得的吸收信号直接导入示波器时, 信号幅度最大为 0.5mV, 且所提供的信号源无法固定频率调节强度。改用 YM1123 信号发射源, 不仅使得固定频率的辐射强度可以调节, 而且对于特定频率有更大的辐射上限, 因而非常有利于本实验。同时将信号输入链接到线性信号放大器上进行最大程度的放大; 为了方便显示, 改用数字示波器。继而可以看到幅度为 1.6V 的信号, 因而实验可以顺利进行。



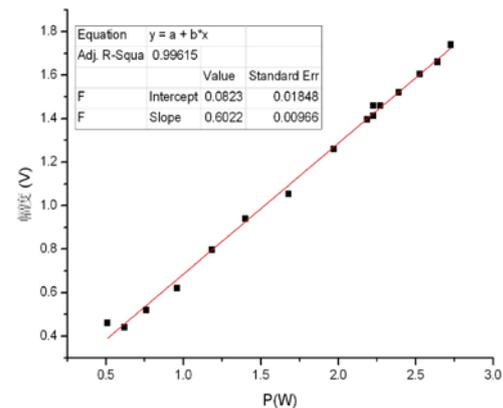
图二 仪器改装后的吸收谱线 (示波器为反置档)

读取示波器上显示的峰谷值和此时对应的衰减 dB, 而后测量衰减 dB 对应输出功率的关系, 结果如图所示:



图三 衰减 dB 对应信号幅度以及输出功率图

将横坐标用对应的拟合公式转换为输出功率, 得到信号幅度与功率的关系:



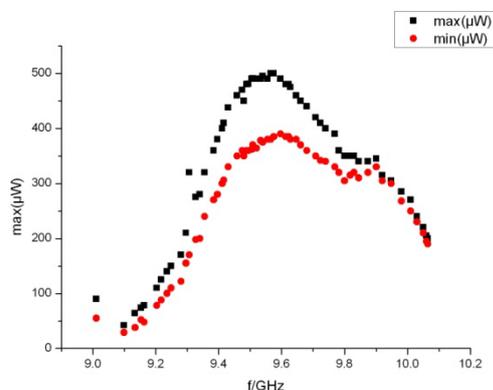
图四 输出功率与信号幅度关系图

拟合相关系数 0.996, 充分说明了输出功率和信号幅度的线性关系, 证明了上部分推导结果的成立。

3 信号调节

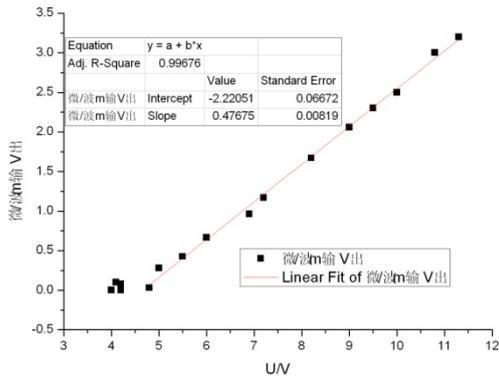
根据前两部分验证结果, 同时实验室提供的输出功率十分有限, 充分的解释了为什么在实验条件下很难出信号。

经测试, 固定输出电压, 调节微调螺丝, 耿氏二极管的输出功率从主频率往两侧波动衰减。



图五 输出功率频谱
(红点对应频率计吸收后功率)

而耿氏二极管在负电阻区时才开始输出功率且输出功率随着电压增大而增大。

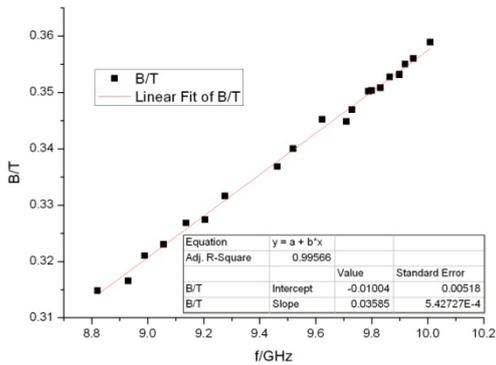


图六 负阻区耿氏二极管电压与微波功率关系

因而在原装置条件下，因先将输出电压调制最大，而后用功率计测量出最大输出功率所对应的微调螺丝位置进行记录而后计算对应磁场再调节信号。

4 g 因子的测量

在改装条件下，可以继续测量到输出功率大约在 1mw 时的参数。因而在可调范围内，从 10.2 到 8.8GHz 内随机取点进行测量 结果如下图所示：



图五 磁场与频率的线性关系测量 g 因子图

用这种方式可以排除掉由频率计或者是高斯计读书不准带来的平移误差。而，由于高斯计示数的大小与探头的位置和表读数精度限制了此直线的线性相关程度，因而用霍尔传感器固定在磁场的特定位置直接显示磁场变化情况可以得到更加准确的数据。

$$B = \frac{h}{g\mu} f, \text{ 将拟合斜率带入计算得 } g \text{ 因子为}$$

1.9979，与理论值 2.0036 相比偏小 0.2%，符合非常好。

在实验过程中，虽然地磁场一直存在，但其为高斯量级，比实验测量磁场小了三个数量级；因而可以忽略不计。

参考文献

- [1] 《introduction to quantum mechanics》Griffiths
- [2] 《近代物理实验》戴道山