

# 光泵磁共振

实验者：余钊焕 合作者：朱 可

(中山大学理工学院，物理学专业 2006 级，学号 06324043)

2008 年 10 月 18 日

## 【实验目的】

1. 掌握以光抽运（即光泵）为基础的光检测磁共振方法；
2. 加深对原子超精细结构的理解，测定铷原子超精细结构塞曼子能级的朗德  $g_F$  因子。

## 【实验仪器】

DH807A 型光磁共振实验装置、SS-7802A 型示波器、TFG1005 DDS 函数信号发生器。

## 【实验原理】

### (一) 铷 (Rb) 原子基态和最低激发态能级

天然铷有两种同位素： $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  (分别占 72.15% 和 27.85%)。实验选用天然铷样品。

铷是碱金属原子，在外壳层只有一个电子。其价电子处于第 5 壳层 (主量子数为  $n=5$ )；主量子数为  $n$  的电子的轨道量子数  $L=0, 1, 2, \dots, n-1, n$ ，基态的  $L=0$ ，最低激发态的  $L=1$ ；电子自旋量子数  $S=1/2$ 。由于电子自旋角动量与轨道角动量相互作用 ( $L-S$  耦合)，电子总角动量的量子数  $J=L+S, L+S-1, \dots, |L-S|$ 。对于铷原子基态， $L=0, S=1/2$ ，故  $J=1/2$ ，标记为  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  双重态。它们是用电子自旋角动量与轨道角动量耦合而产生的精细结构。 $5^2P_{1/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$  跃迁产生波长为 794.8 nm 的  $D_1$  谱线， $5^2P_{3/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$  跃迁产生波长为 780.0 nm 的  $D_2$  谱线。这两种谱线是铷原子主线系的第一条双线，也是铷灯光谱中最强谱线。

原子价电子在上述  $L-S$  耦合中，总角动量  $P_J$  与原子的电子总磁矩  $\mu_J$  的关系为

$$\mu_J = -g_J \frac{e}{2m} P_J \quad (1)$$

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (2)$$

其中  $g_J$  为对应于  $\mu_J$  与  $P_J$  的朗德因子， $J, L$  和  $S$  为量子数。

原子核自旋量子数为  $I$ 。核自旋角动量与电子总角动量耦合 (即  $I-J$  耦合)，原子总角动量的量子数  $F=I+J, I+J-1, \dots, |I-J|$ 。铷原子两个同位素的核自旋量子数不相同： $^{85}\text{Rb}$  的  $I=5/2$ ， $^{87}\text{Rb}$  的  $I=3/2$ 。从而， $^{85}\text{Rb}$  的基态  $J=1/2$ ，具有  $F=3$  和  $F=2$  两个能态； $^{87}\text{Rb}$  的基态则具有  $F=2$  和  $F=1$  两个能态。通过即  $I-J$  耦合且由  $F$  量子数标记的能态形成了原子超精细结构能级。

原子总角动量  $P_F$  与总磁矩  $\mu_F$  的关系为

$$\mu_F = -g_F \frac{e}{2m} P_F \quad (3)$$

考虑到核磁矩远比电子磁矩小 (即  $\mu_N \ll \mu_B$ ， $\mu_B = e\hbar/2m$  为玻尔磁子)， $\mu_F$  实际上

为  $\mu_J$  在  $P_F$  方向上的投影，从而得到

$$g_F = g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} \quad (4)$$

其中,  $g_F$  为对应于  $\mu_F$  与  $P_F$  的朗德因子。

在外磁场中, 原子总角动量所对应的原子总磁矩  $\mu_F$  与磁场  $B$  的相互作用能量为

$$E = -\mu_F \cdot B = g_F m_F \mu_B B \quad (5)$$

式中磁量子数  $m_F = F, F-1, \dots, -F$ 。这意味着具有量子数  $F$  的超精细结构中的各能级在外磁场  $B$  中将进一步分裂为  $(2F+1)$  个塞曼子能级, 相邻能级间距相等且由式 (5) 确定。 $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  基态及最低激发态的精细结构、超精细结构和在外磁场中塞曼子能级结构如图 1 所示。

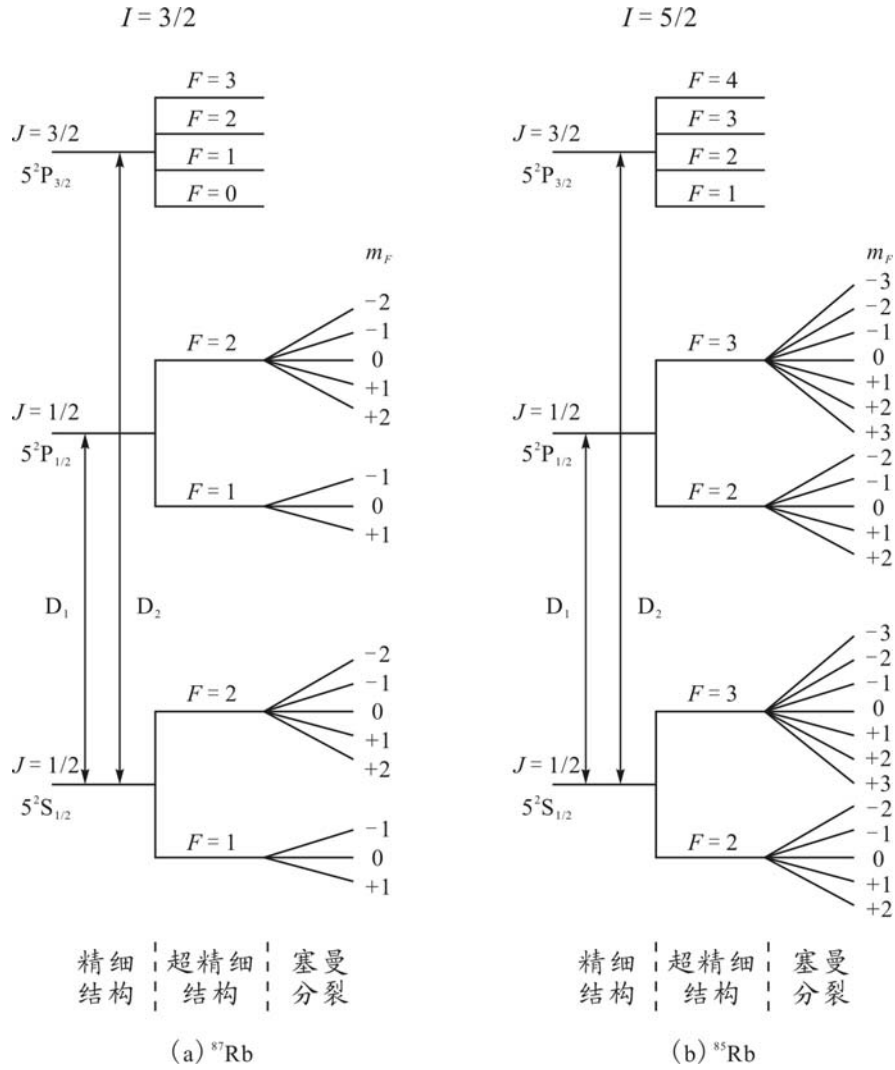


图 1  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的基态及最低激发态能级示意图

## (二) 光抽运产生偏极化

在热平衡状态下, 各能级的粒子数遵从玻耳兹曼分布, 能级  $E_1$  和  $E_2$  上粒子数之比

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\Delta E/kT} \quad (6)$$

式中  $\Delta E = E_2 - E_1$  为两个能级间的能量差,  $N_1$  和  $N_2$  分别为能级  $E_2$  和  $E_1$  的原子数,  $k$  为玻耳

兹曼常数。由于超精细塞曼子能级间的能量差很小，可以近似地认为这些子能级上的粒子数相等。

光抽运建立在光跃迁过程角动量守恒的基础上，通过带偏振光激发原子，使原子能级的粒子布居数发生改变。由于光波中磁场对电子的作用远小于电场对电子的作用，故光对原子的激发，可以看成是光波的电场部分起作用。设偏振光的传播方向与外磁场  $B$  同方向，左旋圆偏振  $\sigma^+$  光的角动量为  $+\hbar$ ；右旋圆偏振  $\sigma^-$  光的角动量为  $-\hbar$ ；线偏振  $\pi$  光可看成是两个旋转方向相反的圆偏振光的叠加，其角动量为零。

偏振光激发时，光跃迁遵守选择定则

$$\Delta L = \pm 1, \Delta F = 0, \pm 1, \Delta m_F = \pm 1 \quad (7)$$

当入射  $D_1\sigma^+$  光作用于  $^{87}\text{Rb}$  时，在  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$  的激发跃迁中，由于  $\sigma^+$  光子的角动量为  $+$ ，只能产生  $\Delta m_F = +1$  的光跃迁。基态  $m_F = +2$  子能级上粒子若吸收光子必将跃迁至  $m_F = +3$  的能态，由于  $5^2P_{1/2}$  各子能级最高为  $m_F = +2$ ，因此基态中  $m_F = +2$  子能级的粒子受  $D_1\sigma^+$  光激发产生跃迁的几率为零。 $D_1\sigma^+$  光只能将基态中除  $m_F = +2$  以外各子能级的原子激发到  $5^2P_{1/2}$  的相应子能级上，如图 2 (a) 所示。

跃迁到  $5^2P_{1/2}$  上的原子通过自发辐射及无辐射跃迁两种过程，以相等的几率回到基态  $5^2S_{1/2}$  各个子能级。如图 2 (b) 所示。这样，经过多次受激  $\rightarrow$  返回，基态  $m_F = +2$  子能级上的粒子数只增不减，即基态其他能级上的粒子被抽运到基态  $m_F = +2$  子能级上，从而达到粒子布居数偏极化的目的。

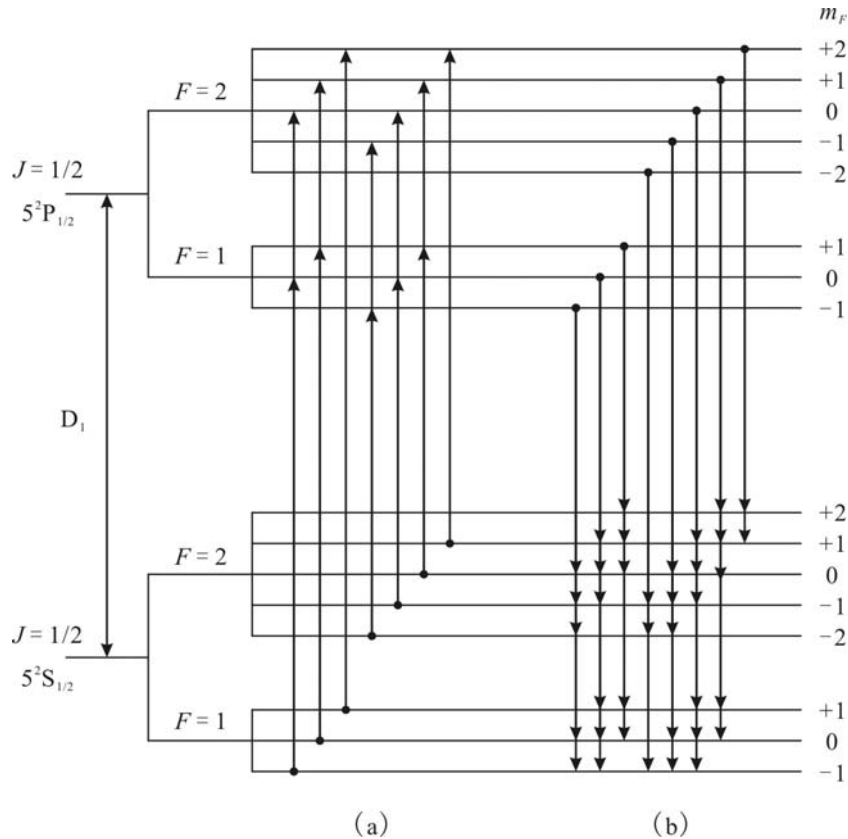


图 2 光抽运过程

(a)  $^{87}\text{Rb}$  基态受  $D_1\sigma^+$  光激发跃迁， $m_F = +2$  能态产生跃迁的几率为零

(b)  $^{87}\text{Rb}$  激发态粒子以相等几率返回基态

同理，若入射光  $D_1\sigma^-$  作用于  $^{87}\text{Rb}$  时，则大量粒子将被抽运到  $m_F = -2$  子能级上。若入射  $D_1\pi$  光，由于角动量为零不符合  $\Delta m_F = +1$  选择定则，不能产生受激非平衡分布，从而不能产生光抽运效应。

对于  $^{85}\text{Rb}$ ，若入射  $D_1\sigma^+$  光作用，粒子将被抽运到  $m_F = +3$  子能级上；入射  $D_1\sigma^-$  光时，粒子将被抽运到  $m_F = -3$  子能级上；同理，入射  $D_1\pi$  光不能产生光抽运效应。

### （三）弛豫过程

光抽运使原子系统能级分布偏极化而处于非平衡状态，但弛豫过程令系统趋向于平衡分布状态，促使系统趋于平衡的机制可以是原子之间或原子与周围其它物质的相互作用及能量交换。在实验过程中要保持铷原子布居数有较大的偏极化程度，有效办法是尽量减少铷原子之间以及铷原子与容器壁的碰撞几率。通常，在铷样品泡内充入氮或氖等惰性气体作为缓冲物质，其密度比样品泡中铷蒸气的原子密度约大 6 个数量级，从而有效减少铷原子与容器壁的碰撞机会。由于缓冲气体的磁性很弱，它们与铷原子碰撞时对铷原子状态的扰动极小，从而能保持铷原子分布的高度偏极化。当然缓冲气体不可能完全抑制弛豫过程，所以光抽运不可能把基态上的原子全部抽运到特定的子能级上。

铷样品泡温度对原子系统的弛豫过程有很大影响。铷样品泡温度升高，铷蒸气的原子密度增加，铷原子与容器壁之间以及铷原子相互之间的碰撞机会增加，必将导致铷原子能级布居数偏极化减少。若铷样品泡温度太低，铷蒸气的原子数目太少，则抽运信号幅度很小不利于实验观测。因此，实验将铷样品泡温度控制在  $40\sim 55^\circ\text{C}$  之间。

### （四）磁共振与光检测

光抽运使铷原子能级粒子数分布偏极化达到饱和之后，铷蒸气不再吸收入射的圆偏振光，从而使透过铷样品泡的光强增大。若在垂直产生塞曼分裂的外磁场  $B$  的方向施加一频率为  $\nu$  的射频磁场，当  $\nu$  和  $B$  之间满足磁共振条件

$$h\nu = g_F \mu_B B \quad (8)$$

时，便发生塞曼子能级之间的共振跃迁现象，这种现象称为磁共振。跃迁遵守选择定则

$$\Delta F = 0, \Delta m_F = \pm 1 \quad (9)$$

若入射光  $D_1\sigma^+$  作用于  $^{87}\text{Rb}$ ，由于满足式（8）的射频场使占居  $m_F = +2$  能级的粒子跃迁至  $m_F = +1$  能级，相继又跃迁至  $m_F = 0, -1, -2$  等各子能级上。因此，发生磁共振时，处于  $m_F = +2$  子能级的粒子数小于饱和状态的原子数，即，磁共振使原子分布的退偏极化。与此同时， $D_1\sigma^+$  光的作用又将基态中非  $m_F = +2$  的原子抽运到  $m_F = +2$  的子能级上。磁共振跃迁和光抽运相互竞争与制约将使原子系统达到一个新的动态平衡。

$D_1\sigma^-$  光作用于  $^{87}\text{Rb}$  时，动态平衡存在于  $m_F = -2$  与  $m_F = -1, 0, 1, 2$  子能级之间； $D_1\sigma^+$  光作用于  $^{85}\text{Rb}$ ，是  $m_F = +3$  与非  $m_F = +3$  能级粒子数分布的竞争； $D_1\sigma^-$  光作用于  $^{85}\text{Rb}$ ，则是  $m_F = -3$  与非  $m_F = -3$  的动态平衡。

为了达到满足式（8）的磁共振吸收，通常采用固定外磁场  $B$  改变射频场频率  $\nu$  或固定射频场频率  $\nu$  改变外磁场  $B$  两种实验观测技术，前者称为扫频法，后者称为扫场法。

由上述分析可知，在偏极化状态下样品对入射光的吸收甚少，特别是当处于饱和状态时，透过铷样品泡的圆偏振光达到恒定；一旦发生磁共振跃迁，样品对圆偏振光的吸收随之增大，透过样品泡的光强减弱。从而，只要测量通过铷样品泡透射圆偏振光强的变化即可达到检测磁共振吸收信号的目的。由此可见，投射到样品的圆偏振光既起抽运作用又可通过透射光强变化检测磁共振信号，即一束光起到了抽运和检测两重作用。

由于天然铷样品含有  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$ ，从上述分析可知，它们都能被  $D_1\sigma^+$  或  $D_1\sigma^-$  光抽运而产生磁共振吸收，实验上可以根据它们对应的朗德因子  $g_F$  不同加以区分。

### 【实验技术方法】

光泵磁共振实验装置由主体单元和辅助设备组成，如图 3 所示。

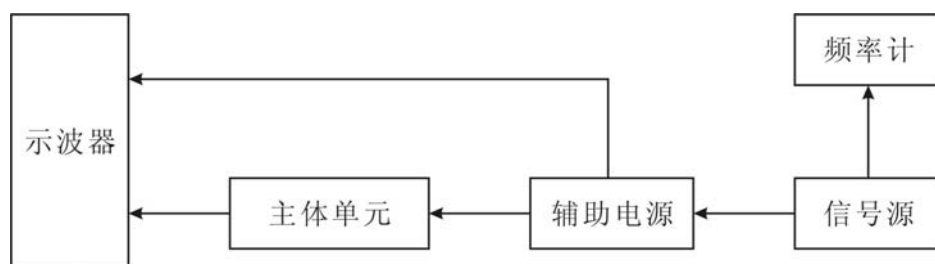


图 3 光泵磁共振实验装置方框图

主体单元结构如图 4 所示，各元件的用途说明如下：

1. **抽运光源** 主要由高频振荡器（频率约为 55~65 MHz）、控温装置（80~90℃）和铷原子光谱灯组成。

2. **样品和磁场** 天然成分铷原子和密度约大 6 个数量级的缓冲气体充在直径为 52 mm 的玻璃泡内。在铷样品泡的两侧对称放置一对射频线圈，为铷原子磁共振跃迁提供射频。铷样品泡和射频线圈均置于圆柱形恒温槽（吸收池）内，槽内温度为 40~55℃连续可调。吸收池放置在两对亥姆霍兹线圈的中心。各组亥姆霍兹线圈在铷样品泡处所产生的磁场由下式求得

$$B = 4.496 \frac{NI}{r} \times 10^{-3} \quad (10)$$

式中， $N$  为线圈每边匝数， $I$  为流经线圈的励磁电流强度（A）， $r$  为线圈的有效半径（m），计算得到的磁场  $B$  的单位是 Gs。产生塞曼分裂的是水平方向的总磁场，包括直流磁场、扫场和地磁场水平分量。

3. **光信号检测** 透过铷样品泡的光束经焦距为 77 mm 凸透镜  $L_2$  会聚到光电探测器上，经转化为电信号放大用于实验观测。

4. **辅助设备** 辅助设备包括辅助源、射频信号发生器、数字频率计和（双通道）示波器。示波器通常采用双通道方法：一个通道观测扫场信号；另一个通道观测光抽运和磁共振信号。

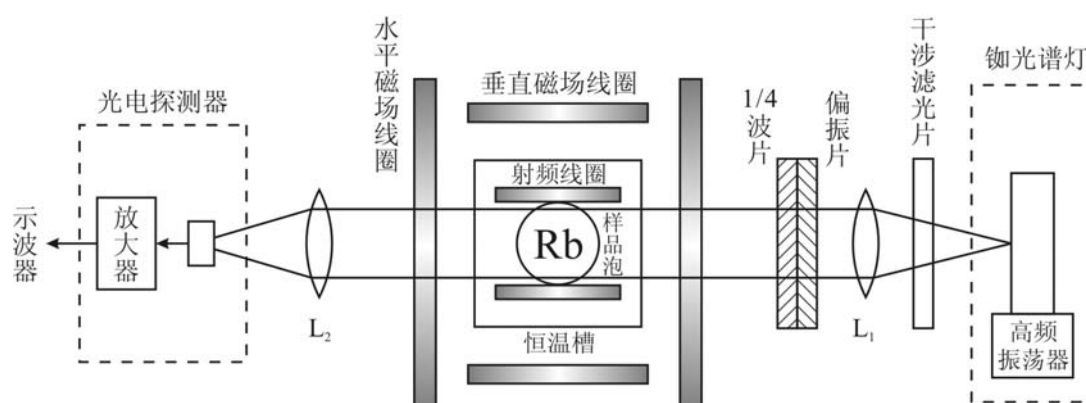


图 4 实验装置主体单元示意图

### 【实验内容】

#### （一）实验系统调节

（1）主体单元放置远离电磁场干扰。借助指南针使导轨安放于地磁场水平分量方向上，调节光源、透镜、铷样品泡和光电检测器件使各元件共轴。

(2) 确认实验系统各部分连接正确, 接通 DH807A 电源开关, 置“池温”按钮于“ON”位置。开示波器电源, 或启动计算机数据采集系统。

(3) 预热约 20 分钟。灯温指示灯亮, 铷光谱灯点燃并发出紫红色光; 池温指示灯亮, 吸收池进入正常工作状态。

(4) 调节凸透镜  $L_1$  位置使出射平行光束作用于铷样品泡上; 调节凸透镜  $L_2$  将平行光束会聚到光电检测器使检测光强最大。

(5) 调节偏振片和  $1/4$  波片与光轴的夹角, 结合下一步“光抽运信号观测”使光抽运信号最大, 并旋紧锁定环。

以上调节确保实验装置达到最佳状态, 在随后的磁共振信号观测中尽可能避免碰触主体单元各个元件, 以期获得准确的实验数据。

## (二) 光抽运信号观测

采用方波和三角波磁场都能观测光抽运信号, 但方波能较快地通过零点建立正向或反向磁场, 故观测光抽运信号时常使用方波磁场。刚加磁场的一瞬间, 铷原子基态各塞曼子能级上的粒子数接近热平衡分布, 可认为各子能级上的粒子数近似相等, 对  $^{87}\text{Rb}$  来说约有  $7/8$  的粒子可吸收  $D_1\sigma^+$  光, 因此这一瞬间对光的吸收最强。随着粒子逐渐被抽运到  $m_F = +2$  子能级上, 能吸收  $D_1\sigma^+$  光的粒子数减少而对光的吸收减少, 透过铷样品泡的光强逐渐增强。当抽运到  $m_F = +2$  子能级上的粒子数达到饱和时, 透过铷样品泡的光强达最大而不再变化。直到磁场过零 (指水平方向的总磁场过零) 并反向时, 塞曼子能级跟随着发生简并随即再分裂。当能级简并时, 塞曼子能级消失而使铷原子失去了偏极化。但当磁场反向重新分裂后各子能级上的粒子数近乎相等, 此时对 (相当于)  $D_1\sigma^-$  光的吸收达到最大 (粒子被抽运到  $m_F = -2$  的子能级上)。上述过程周而复始, 从而可在示波器上观测到周期性光抽运信号。

实验中用于观测光抽运信号的方波或三角波磁场较弱, 地磁场足以产生较大的影响。通过采用不同波形扫场, 分别观测水平线圈或竖直线圈磁场以及改变它们的励磁电流大小和方向对光抽运信号的影响。

当竖直线圈产生的磁场完全抵消地磁场垂直分量时, 光抽运信号达到最大值。保持这一状态的竖直线圈励磁电流大小和方向, 以便更好地进行磁共振信号观测。

## (三) 磁共振信号观测

光抽运信号反映了铷原子基态  $5^2S_{1/2}$  和最低激发态  $5^2P_{1/2}$  超精细结构塞曼子能级之间的光学跃迁, 可观测的光抽运吸收源于周期性变化且穿越零点的磁场。在磁场正向零点反向的过程中, 塞曼子能级表现为分裂→简并→再分裂, 而粒子布居数经历了极化→退极化→再极化的变化。同理, 可观测的磁共振吸收信号源于粒子布居数极化与退极化的物理变化。与纯光抽运过程不同, 磁共振过程的退极化是由满足于式 (8) 的射频跃迁来实现的, 这是区分两种物理现象的实验判据。

对于选定的射频场频率  $\nu$ , 改变外磁场  $B$  使满足式 (8), 可以获得  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的磁共振信号; 对于设定的外磁场  $B$ , 改变射频场频率  $\nu$  使满足式 (8), 同样可以获得  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的磁共振信号。为便于实验操作, 采用扫场法, 且选用三角波扫场进行实验观测。确认合成磁场垂直分量为零 (光抽运信号达到最大), 调节适量的射频场幅度, 选择适当射频场频率 (300~400 kHz) 和信号功率输出, 详细观测  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  磁共振信号随三角波扫场强度和方向的变化情况。分析以上所观测到现象的物理过程, 理解磁共振信号处于三角波扫场的波谷、波峰及腰部的实验条件, 从而选择便于观测的实验测量参考点, 进行朗德因子  $g_F$  分析。

## (四) 测量朗德因子 $g_F$

通过测量磁共振对应的射频场频率  $\nu$  和外磁场  $B$ , 由式 (8) 可确定  $g_F$  值。事实上, 在实验中外磁场  $B$  包括了水平亥姆霍兹线圈产生的磁场  $B_P$ 、扫场  $B_S$  以及地磁场水平分量  $B_{//}$ , 即

$$B = B_p + B_s + B_{//} \quad (11)$$

磁场  $B_p$  可通过测量水平亥姆霍兹线圈励磁电流  $I$ ，并由式 (10) 求得。通常，在实验测量中采用固定的扫场  $B_s$  (大小和方向)，而地磁场水平分量  $B_{//}$  可认为是恒定值，从而  $(B_s + B_p)$  为常数。在扫场法中，对于每预设频率  $\nu$  的射频场，通过测量磁共振对应的正向和反向水平磁场的平均值，即可求得朗德因子  $g_F$ 。

当偏振光的传播方向与外磁场  $B$  同向，实验使用的左旋圆偏振光  $D_1\sigma$  起  $\sigma^+$  作用，它将  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  粒子分别抽运到  $m_F = +3$  和  $m_F = +2$  能级；当偏振光的传播方向与外磁场  $B$  逆向，实验用偏振光  $D_1\sigma$  起  $\sigma^-$  作用而将  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  粒子分别抽运到  $m_F = -3$  和  $m_F = -2$  能级。显然这是两种不同的物理过程，合理的数据分析必须基于相同物理过程的实验测量。由式 (8) 和 (11)，可得

$$h\nu = g_F \mu_B B_p + g_F \mu_B (B_s + B_{//}) \quad (12)$$

在实验过程中地磁场水平分量  $B_{//}$  和扫场大小与方向保持恒定，若在实验测量中吸收峰定位方法保持一致，式 (12) 中第二项  $g_F \mu_B (B_s + B_{//})$  必为常数。因此，同一磁共振信号对应的一组  $(\nu, B_p)$  为线性关系。通过线性拟合，可以获得  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  分别在  $\sigma^+$  和  $\sigma^-$  作用时的实验结果。

#### 【测量数据和数据处理】

用方波磁场作为扫场时，观察到光抽运信号如图 5 所示。

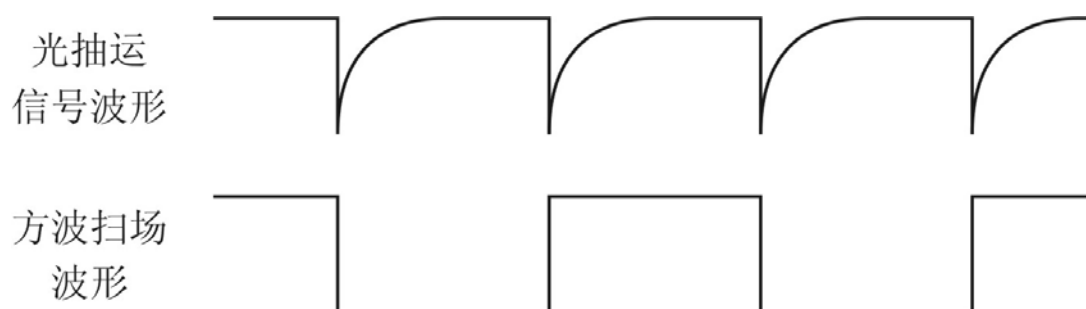


图 5 方波扫场的光抽运信号

调节扫场幅度、垂直场大小和方向，使光抽运信号幅度最大，处于实验的最佳工作点，此时垂直场电流为 0.048 A。改用三角波扫场，调节射频信号发生器频率，可观察到磁共振信号如图 6 所示。

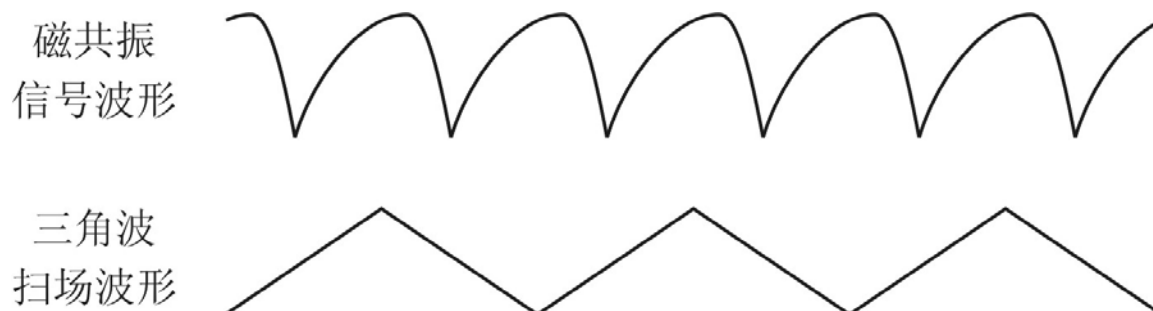


图 6 三角波扫场的磁共振信号

设定射频场频率，缓慢增加水平场强度，记录共振信号的出现时的水平场电流和方向，得到表 1。

表 1 共振时水平场电流

射频场频率 $\nu$ / kHz	正向电流 1 $I_1^+$ / A	正向电流 2 $I_2^+$ / A	反向电流 1 $I_1^-$ / A	反向电流 2 $I_2^-$ / A
400	0.084	0.144	-0.160	-0.219
500	0.114	0.189	-0.189	-0.265
600	0.144	0.237	-0.219	-0.310
700	0.174	0.282	-0.250	-0.357
800	0.204	0.327	-0.281	-0.402
900	0.236	0.371	-0.312	-0.448
1000	0.265	0.415	-0.342	-0.493

表 2 光磁共振实验仪 30000-2874 的参数

参数	水平场线圈	扫场线圈	垂直场线圈
线圈匝数	250	250	100
有效半径 / mm	237.4	242.0	153.0

将表 1 和表 2 的数据代入式 (10) 计算水平磁场，得到表 3

表 3 共振时水平场磁感应强度

射频场频率 $\nu$ / kHz	正向磁场 1 $B_1^+$ / Gs	正向磁场 2 $B_2^+$ / Gs	反向磁场 1 $B_1^-$ / Gs	反向磁场 2 $B_2^-$ / Gs
400	0.199	0.341	-0.379	-0.518
500	0.270	0.447	-0.447	-0.627
600	0.341	0.561	-0.518	-0.734
700	0.412	0.668	-0.592	-0.845
800	0.483	0.774	-0.665	-0.952
900	0.559	0.878	-0.739	-1.061
1000	0.627	0.982	-0.810	-1.167

以射频场频率 $\nu$ 为横轴，水平场磁感应强度为纵轴，用表 3 数据描点，得到四组数据点，再分别作线性拟合，得到图 7。



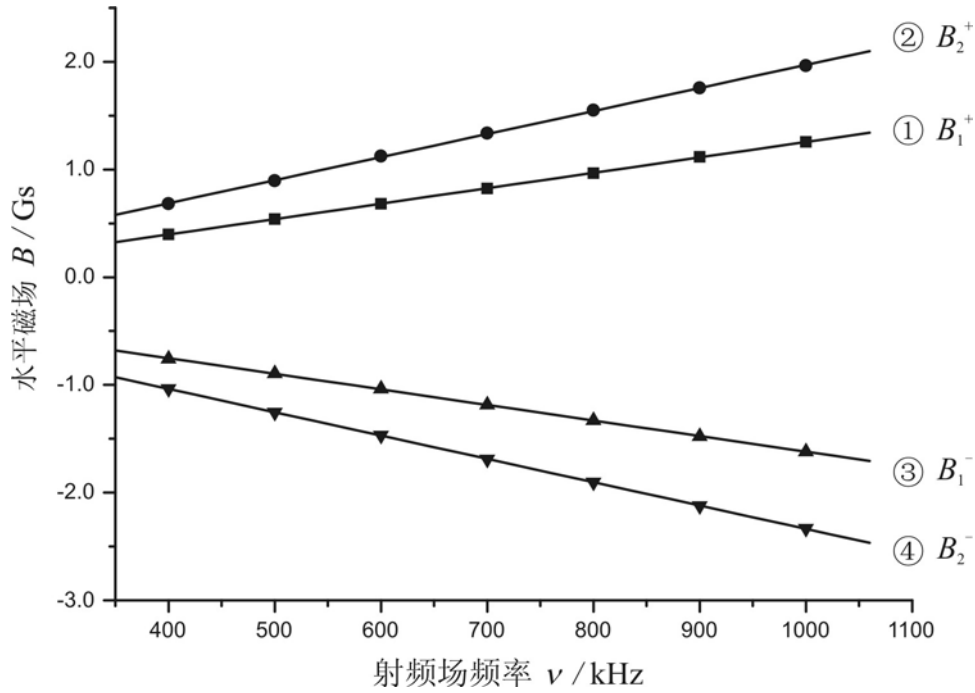


图 7 共振时水平磁场与射频场频率的关系

线性拟合得到如下四条直线，由式（12）知朗德因子  $g_F$  与直线斜率  $K$  的关系为

$$g_F = \frac{h}{K\mu_B} \quad (13)$$

其中玻尔磁子  $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ ，普朗克常数  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

计算结果如下：

直线①( $B_1^+ \sim \nu$ ): 斜率  $K_① = (1.430 \pm 0.006) \times 10^{-3} \text{ Gs/kHz}$ ，朗德因子  $g_{F①} = 0.500 \pm 0.002$ ，线性相关系数的绝对值为 0.99997。

直线②( $B_2^+ \sim \nu$ ): 斜率  $K_② = (2.14 \pm 0.02) \times 10^{-3} \text{ Gs/kHz}$ ，朗德因子  $g_{F②} = 0.334 \pm 0.002$ ，线性相关系数的绝对值为 0.99992。

直线③( $B_1^- \sim \nu$ ): 斜率  $K_③ = (-1.440 \pm 0.007) \times 10^{-3} \text{ Gs/kHz}$ ，朗德因子  $g_{F③} = 0.496 \pm 0.003$ ，线性相关系数的绝对值为 0.99995。

直线④( $B_2^- \sim \nu$ ): 斜率  $K_④ = (-2.160 \pm 0.004) \times 10^{-3} \text{ Gs/kHz}$ ，朗德因子  $g_{F④} = 0.3308 \pm 0.0007$ ，线性相关系数的绝对值为 0.99999。

可见，①和③是  $^{87}\text{Rb}$  受到  $D_1\sigma^+$  和  $D_1\sigma^-$  光抽运时的直线，②和④是  $^{85}\text{Rb}$  受到  $D_1\sigma^+$  和  $D_1\sigma^-$  光抽运时的直线。

### 【讨论分析】

1. 实验过程中如何区分光抽运与磁共振信号？如何区分  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的磁共振信号？

光抽运信号是在只有方波扫场而无射频磁场的情况下观察到的，磁共振信号是在加了频率和磁感应强度满足磁共振条件（8）的射频磁场并采用三角波扫场后观察到的，两者的波形不一样，如图 5 和图 6 所示。在相同的射频场频率下， $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的磁共振信号出现时

的水平磁场大小不一样，这是由于  $^{85}\text{Rb}$  的朗德因子理论值 ( $g_F = 1/3$ ) 与  $^{87}\text{Rb}$  朗德因子理论值 ( $g_F = 1/2$ ) 不一样导致的，由实验数据测得朗德因子  $g_F$  后就可以看出哪些信号属于  $^{85}\text{Rb}$ ，哪些信号属于  $^{87}\text{Rb}$ 。

2. 为什么实验测量中同一物理过程采用扫场不变且相同的磁共振信号定位方法可以满足 ( $\nu, B_P$ ) 的线性关系？

在实验过程中只要地磁场水平分量  $B_{//}$  和扫场大小与方向保持恒定，并且在实验测量中吸收峰定位方法保持一致，则式 (12) 中的第二项  $g_F \mu_B (B_S + B_{//})$  必为常数。因此，由式 (12) 知同一磁共振信号对应的一组 ( $\nu, B_P$ ) 为线性关系。

3. 采用不同的磁共振信号定位方法影响朗德因子  $g_F$  的实验结果吗？

只要对同一磁共振信号的定位方法统一标准，不同的磁共振信号定位方法就只是导致实验数据的整体平移而已，不会造成拟合直线的斜率变化，从而不会影响朗德因子  $g_F$  的实验结果。但有些磁共振信号定位方法由于在实验共振信号点不明显，难以统一定位标准，容易造成人为误差，从而影响朗德因子  $g_F$  的实验结果。因此，应该选择实验共振信号点明显的磁共振信号定位方法。

4. 如何理解曲线拟合方法在  $B_P < |B_S + B_{//}|$  情形的合理性？曲线拟合所求得的截距的物理意义是什么？

在  $B_P < |B_S + B_{//}|$  情形，实验曲线与  $B_P > |B_S + B_{//}|$  情形相比有所不同，但由于曲线拟合方法本身符合实验物理原理，两种情形朗德因子  $g_F$  的实验结果应基本相同，可见曲线拟合方法在  $B_P < |B_S + B_{//}|$  情形下依然有其合理性。由式 (12)，曲线拟合所求得的截距为  $-(B_S + B_{//})$ ，其物理意义是扫场  $B_S$  与地磁场水平分量  $B_{//}$  之和的负值。

5. 若磁场垂直分量不为零，实验结果如何？

答：若磁场的垂直分量不为零，光抽运信号的幅度将不会达到最大，不处在最佳的实验工作点，可能会增大偶然误差。

6. 如何测量实验所在处的地磁场？

先使扫场和水平场与地磁场水平分量方向相同，测得射频场频率  $\nu_1$ ；再按动扫场及水平场方向开关，使扫场和水平场的方向与地磁场水平分量的方向相反，测得射频场频率  $\nu_2$ 。这样，地磁场水平分量所对应的频率就是  $\nu = (\nu_1 - \nu_2)/2$ ，已经排除了扫场和水平磁场的影响。于是，地磁场的水平分量为

$$B_{//} = \frac{h\nu}{\mu_B g_F}$$

因为实验时垂直磁场正好抵消了地磁场的垂直分量，所以从数字表头指示的垂直场电流及垂直亥姆霍兹线圈参数就可以确定地磁场垂直分量  $B_{\perp}$ 。于是求得实验所在地的地磁场。