

# 光泵磁共振中信号波形的分析

李力恺 物理系 08300190043

指导老师 周鲁卫

## 摘要

分析光泵磁共振实验中出现的各种信号波形，对其背后的产生机理进行解释

## 关键词

光抽运，磁共振，铷原子超精细结构，塞曼分裂

## 实验原理

### 一、光泵磁共振

- 1、用光抽运的方法使原子的粒子数分布产生重大变化，放大测量信号；
- 2、抽运光同时可用作测量光，使测量对象从低频电磁波变为高频光波，从而提高测量的精度

### 二、铷原子基态及最低激发态能级

- 1、轨道角动量与自旋角动量耦合（L-S 耦合），精细结构能级  
电子总角动量 $P_J$ ，轨道角动量 $P_L$ ，自旋角动量 $P_S$ 满足如下关系：

$$P_J = P_L + P_S$$

铷原子基态为 $5^2 S$ ， $L=0$ ，只有 $5^2 S_{\frac{1}{2}}$ 态，不发生分裂；

最低激发态为 $5^2 P$ ， $L=1$ ，分裂为 $5^2 P_{\frac{1}{2}}$ ， $5^2 P_{\frac{3}{2}}$ 两态；

电子总磁矩为：

$$\begin{cases} \mu_J = g_J \frac{eP_J}{2m} \\ g_J = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \end{cases}$$

- 2、电子角动量与核自旋角动量耦合（I-J 耦合），超精细结构能级  
原子总角动量 $P_F$ ，电子总角动量 $P_J$ ，核自旋角动量 $P_I$ 满足如下关系：

$$P_F = P_I + P_J$$

铷有 $^{87}\text{Rb}$ （丰度 27.85%）和 $^{85}\text{Rb}$ （丰度 72.15%）两种同位素，对应的  $I$  分别为 $\frac{3}{2}$ 和 $\frac{5}{2}$ ，由此造成二者不同的超精细结构。

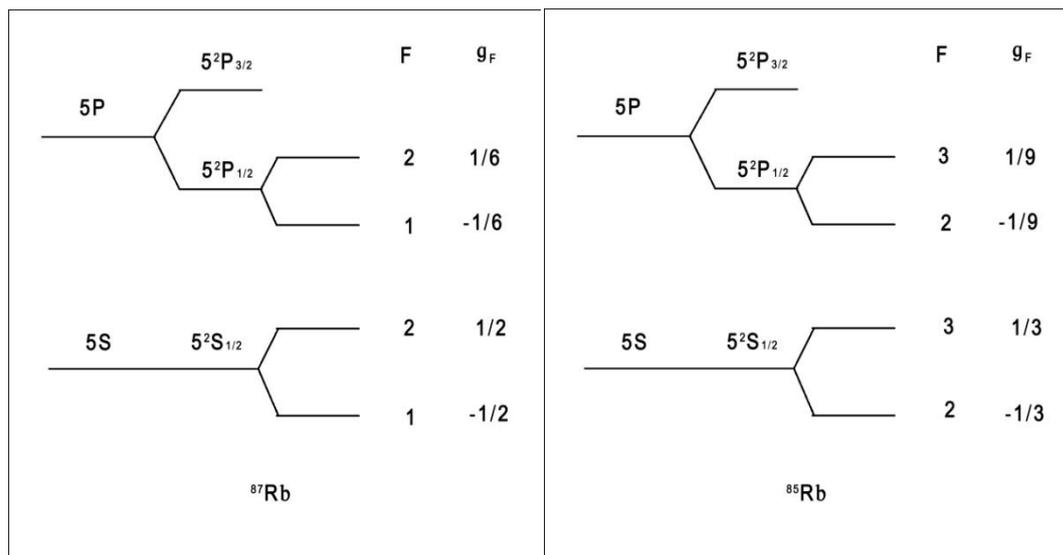


图 1、铷原子的超精细结构，左边为<sup>87</sup>Rb原子，右边为<sup>85</sup>Rb原子

原子总磁矩为：

$$\begin{cases} \mu_J = g_F \frac{e\mu_B}{2m} \\ g_F = g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} \end{cases}$$

3、塞曼分裂

$$\begin{cases} E = -\mu_F \cdot B \\ \mu_F = F, F-1, \dots, -F \end{cases}$$

由此造成的能级分裂如下

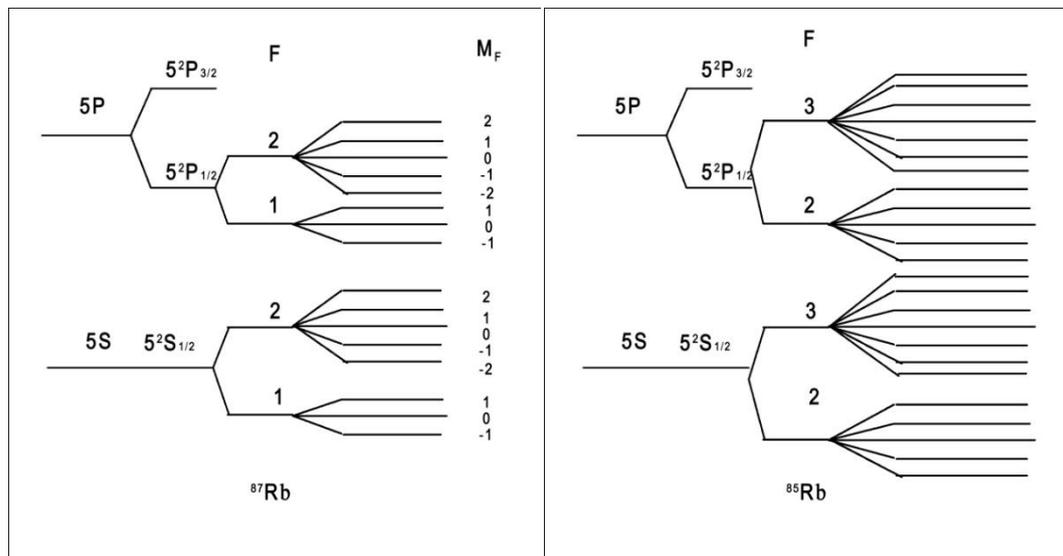


图 2、铷原子的塞曼分裂示意图，左边为<sup>87</sup>Rb原子，右边为<sup>85</sup>Rb原子

相邻塞曼能级的能量差为：

$$\Delta E = g_F \mu_B B$$

当输入射频信号频率 f 满足：

$$hf = 2\pi g_F \mu_F B$$

电磁波吸收极大。

### 三、粒子偏极化及弛豫过程

#### 1、偏极化及其目的

当<sup>87</sup>Rb气体接收到D<sub>1</sub>σ<sup>+</sup>的左旋偏振光时，由于光子具有单一的自旋方向，铷原子需遵守以下的跃迁规则：

$$\begin{cases} \Delta F = 0, \pm 1 \\ \Delta M_F = +1 \end{cases}$$

而铷原子的自发辐射满足：

$$\begin{cases} \Delta F = 0, \pm 1 \\ \Delta M_F = \pm 1 \end{cases}$$

由于<sup>87</sup>Rb的M<sub>F</sub>最大为2，故M<sub>F</sub> = 2上的粒子不能跃迁，粒子数有增无减，使得布居数差增大。同理，对于<sup>85</sup>Rb，M<sub>F</sub> = 3上的粒子数只增不减。

通过光抽运增大布居数差，可有效地增强共振吸收信号的强度。

#### 2、弛豫过程

自然状态下，粒子能量分布服从波尔兹曼分布，通过光泵抽运实现偏极化后，例子有通过粒子间碰撞以及与器壁碰撞恢复波尔兹曼分布的趋势，称为弛豫过程。实际试验装置中通过充入氮气的方式减弱碰撞过程，从而增大弛豫时间，增强偏极化效果。

### 四、磁共振与光探测

当原子分布偏极化达到饱和后，对D<sub>1</sub>σ<sup>+</sup>光不再吸收；而当射频光子频率满足 $hf = 2\pi g_F \mu_F B$ 时，由于射频光子具有任意的自旋方向，将产生如下的选择定则：

$$\begin{cases} \Delta F = 0 \\ \Delta M_F = \pm 1 \end{cases}$$

M<sub>F</sub> = 2（对<sup>85</sup>Rb原子为M<sub>F</sub> = 3）上的粒子将可以向其它能级跃迁，使偏极化状态被破坏，铷原子将继续吸收D<sub>1</sub>σ<sup>+</sup>光，系统达到动态平衡。

实际操作中，可通过保持磁场强度不变改变射频频率（扫频）或保持射频频率不变改变磁场（扫场）的方式实现共振吸收，并通过探测D<sub>1</sub>σ<sup>+</sup>光的透射强度得知系统对于D<sub>1</sub>σ<sup>+</sup>光的吸收情况，从而判断系统状态。

## 实验现象与分析

### 一、光抽运信号观察

1、首先在不加水平和垂直方向恒定磁场的情况下，加入与地磁场方向同向的水平方波扫场型号，出现如下波形：



图 3、不加水平和垂直的恒定磁场，加入与地磁场同向的扫场信号，获得的波形

可以看出，从光电池获得的信号中出现了负向信号。而光电池在接收到光照时应输出单一方向的电压，无法解释观察到的负向信号。仔细检查光电池接线，发现除光电池输出电缆外，光电池还接有一标有“电源”的电缆，推测光电池的大致工作电路如下：

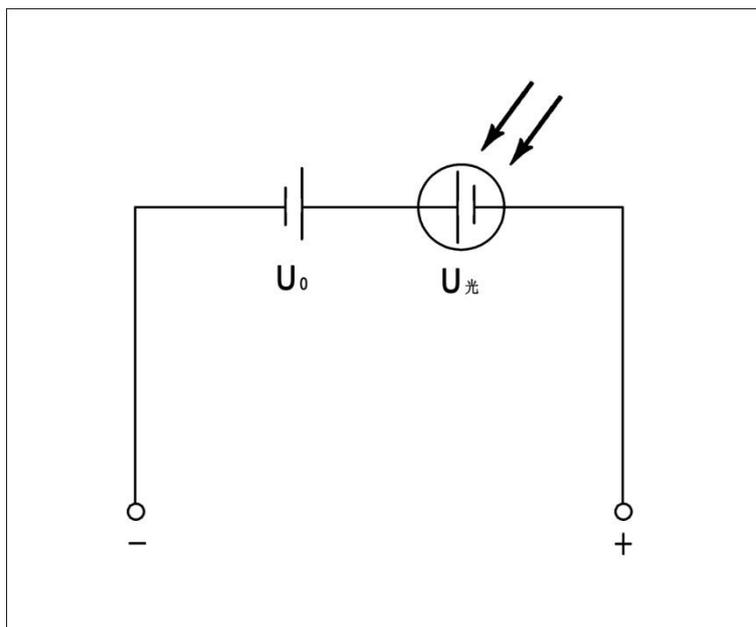


图 4、光电探测器工作示意图

当光没有被吸收时，光电池接收到全光照，此时设定恒压源电压  $U_0$  与光电池电压相等，输出电压为零；当光有吸收时，光电池接收到的光强减弱，输出电压  $U_{光}$  减小，整个电路输出电压为  $U=U_0-U_{光}$  升高。这样使得光电探测器的输出信号幅度就代表了系统对光的吸收强度。按照这个思路，光电探测器输出负向信号，说明光电池接收到的光信号强于光源照明强度，即铷原子气体不但没有吸光反而放出光子。分析其产生原理如下：

当未在垂直方向加入磁场时，垂直方向存在地磁场的垂直分量。此时，铷原子发生塞曼分裂，对入射的  $D_1\sigma^+$  光子产生吸收；但由于垂直方向磁场的存在，使得选择定则被打破，电子不但被抽运到  $M_F = 2$ （对  $^{85}\text{Rb}$  原子为  $M_F = 3$ ）能级上，其它各激发态上也有较多的电子。这

时若加上水平方向扫场磁场，原有的塞曼分裂能差被加大，各能级上的电子由于不受选择定则的限制可自由地向低能级跃迁，从而辐射出大量光子，使光电探测器输出负向信号。由该机理可以推测，当加上垂直磁场抵消地磁场垂直分量后，原有的负向信号应当消失。试验中发现，当在垂直方向加入 0.055A 的恒定磁场电流时，负向信号大大减弱，如下图：

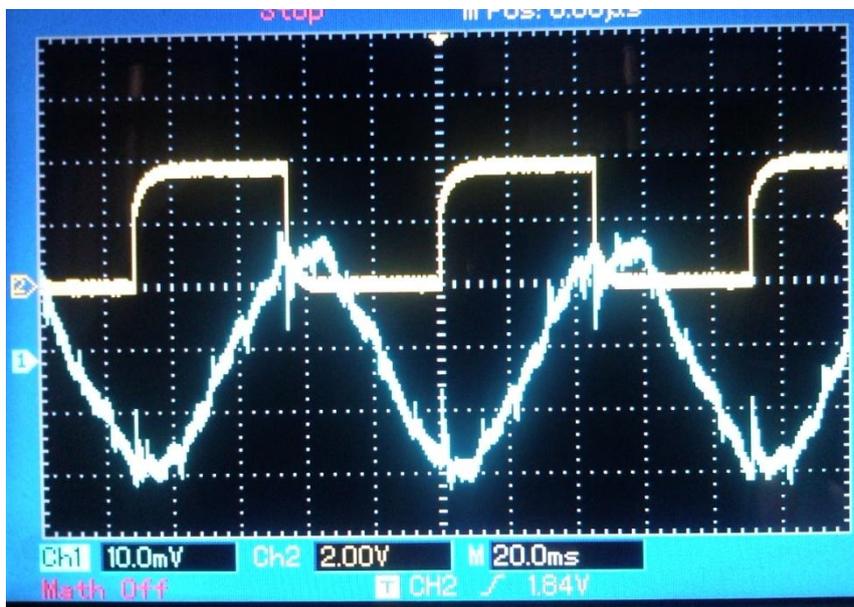


图 6、抵消地磁场垂直分量后的信号波形

此时，由于只存在水平磁场，在选择定则的限制下，电子集中在  $M_F = 2$ （对<sup>85</sup>Rb原子为  $M_F = 3$ ）能级上且不能向其他能级跃迁，故只有少量其它能级的电子在加上磁场后向低能级跃迁发出光子，产生微弱的负向信号。当负向信号最小时，所加的垂直磁场即为地磁场的垂直分量。此时垂直磁场电流为 0.055A，计算得出磁场强度为：

$$B_{gy} = 1.62 \times 10^{-5} \text{T}$$

在此基础上，若继续加强垂直方向上的磁场，则选择定则又被破坏，负向信号再次加强。实验观察到的现象与该推论相符。

2、抵消地磁场垂直分量，使方波信号与地磁场水平分量相反。这时刻观察到如下信号：

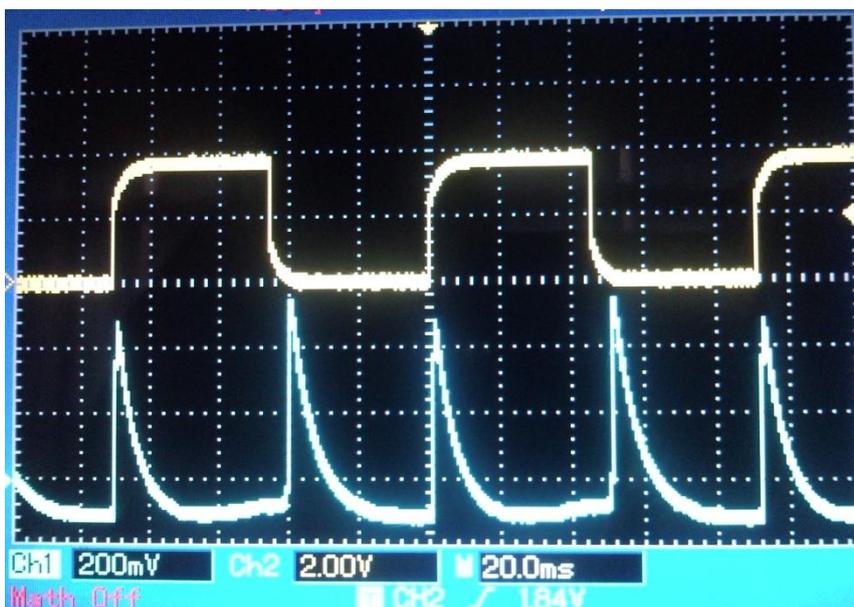


图7、加入与地磁场水平分量反向的扫场信号后获得的信号波形

对于该信号可作如下解释。当加入扫场时，铷原子发生塞曼分裂，对抽运光吸收，信号上出现吸收峰；而当扫场减小为零时，加在铷原子上的磁场要经历先减小为零再反向增大的过程。当磁场减小为零时，塞曼分裂简并，各能级上原子数回归波尔兹曼分布，此时再增大反向磁场，则又出现塞曼分裂，铷原子再次吸收光子，信号出现吸收峰。因此，在扫场信号变化的一个周期里可以观察到两个吸收峰。

由以上论述可以看出，产生吸收峰的关键在于磁场需要有一个先变为零再增大的过程，使原有的饱和态被打破，这是观察光抽运信号的关键。

### 3、在此基础上再进行进一步的探究

当加入与扫场方向同向的水平恒定磁场时，发现对应扫场减小点的吸收峰变小，而对应扫场增大点的吸收峰不变。最后两峰简并为一峰，位置在扫场增大的点。分析是由于加入的水平磁场抵消了地磁场的水平分量，使得扫场减小到零时实际反向磁场几乎为零，吸收极其微弱。在此基础上继续增大水平磁场，则磁场不再出现零点，吸收峰消失。这时的水平磁场的大小应等于地磁场水平分量的大小。实验测得此时水平磁场电流为 0.102A，由此计算出水平磁场大小为：

$$B_{gx} = 4.66 * 10^{-5}T$$

同时可计算出地磁场与水平方向夹角为：

$$\theta = \arctg\left(\frac{B_{gy}}{B_{gx}}\right) = 19.17^\circ$$

同理，当所加水平恒定磁场方向与扫场方向相反时，对应扫场增大点的吸收峰变小，而对应扫场减小点的吸收峰不变。最后两峰简并为一峰，位置在扫场减小的点。分析是由于加入的水平磁场抵消了扫场的，使得加入扫场时实际正向磁场几乎为零，吸收极其微弱。在此基础上继续增大水平磁场，则磁场不再出现零点，吸收峰消失。实验现象与该推论相符。

若不加水平恒定磁场，只改变扫场信号的幅度，同样可以观察到信号吸收峰的变化。由于一开始使用的扫场强度已经为最大值，故只能减小扫场强度。发现随扫场幅度减小，对应扫场增大点的吸收峰变小，而对应扫场减小点的吸收峰不变。最后两峰简并为一峰，位置在扫场减小的点。这与加入与扫场方向相反的恒定磁场所产生的现象相类似，分析是由于当扫场幅度小到与地磁场水平分量相近时，加入扫场时实际正向磁场几乎为零，吸收极其微弱。在此基础上继续增大水平磁场，则磁场不再出现零点，吸收峰消失。实验现象与该推论相符。

4、改为加入三角波扫场（方向与地磁场水平分量相反），发现吸收峰分布在信号波峰与波谷之间的位置。分析在这些位置上，地磁场水平分量与扫场共同作用使磁场方向反向，出现吸收峰的原理与加方波时类似，这里不作赘述。在此基础上，发现当加入与地磁场反向的水平恒定磁场时，吸收峰向信号波波谷靠近，最后在波谷处简并成一个吸收峰，如图：

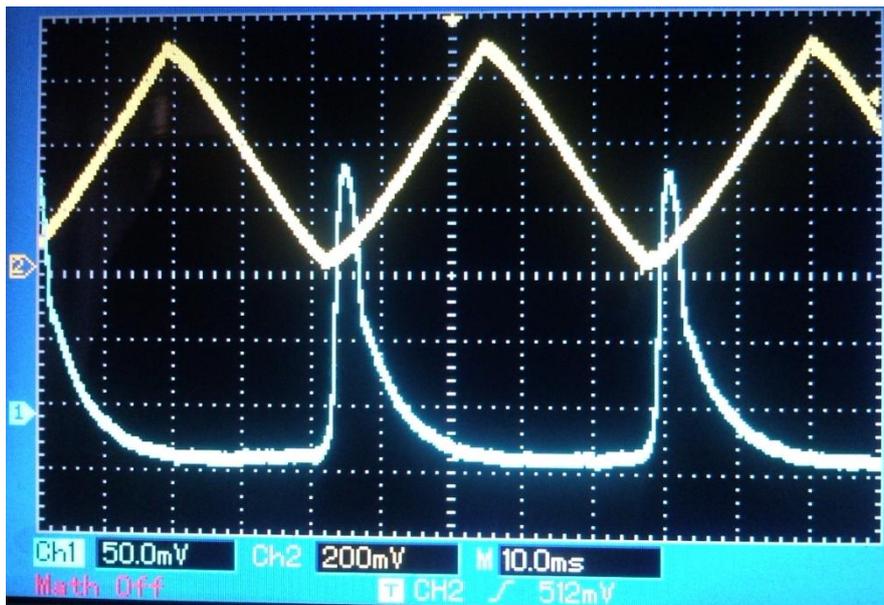


图 8、加入三角波后的信号波形。此时，水平磁场强度等于地磁场水平分量

此时，地磁场分量几乎被抵消，峰谷值对应的水平磁场强度几乎为零。在这基础上，若继续增大水平磁场，则吸收峰消失。实验现象与该推论相符，如图：



图 9、加入三角波后的信号波形。此时，水平磁场强度略大于地磁场水平分量强度

同理，若加入与扫场方反向的水平磁场或者减小扫场信号的幅度，则吸收峰向信号波峰位置靠近，最后在波峰处发生简并。此时，波峰处对应的实际水平磁场几乎为零。若继续增大水平恒定磁场强度或减小扫场幅度，则吸收峰消失。实验现象与推论相符。吸收峰消失时，对应扫场信号幅度为 680mv，故在后面观察抽运信号时应保证扫场幅度起码小于该幅度以保证抽运信号不会出现。

## 二、共振吸收信号观察及分析

先加入三角波扫场以及与扫场同向的恒定水平磁场。此时，若增大射频信号频率，则吸收峰向信号波峰处靠拢，最终消失；而若减小射频信号频率，吸收峰向信号波谷靠拢，最终消失。分析这种情况下，信号波峰对应的就是磁场的最大值，而波谷对应磁场最小值。此时，若增

大射频频率，则对应吸收峰的磁场增大，吸收峰向波峰靠近，当所需磁场大于波峰对应的磁场时，铷原子不再吸收射频光子，吸收峰消失；反之，若减小射频频率，则对应吸收峰的磁场减小，吸收峰向波谷靠近，当所需磁场小于波峰对应的磁场时，铷原子不再吸收射频光子，吸收峰消失。

同理，若所加水平恒定磁场与扫场方向相反，则信号波峰对应的是磁场的极小值，波谷对应磁场的极大值。这时，若增大射频频率，吸收峰向波谷靠拢并最终消失；若减小射频频率，吸收峰向波峰靠拢，最终消失。

实验中同时观察到，若吸收峰向波峰或波谷靠近，前锋的大小总是大于后峰，如图：

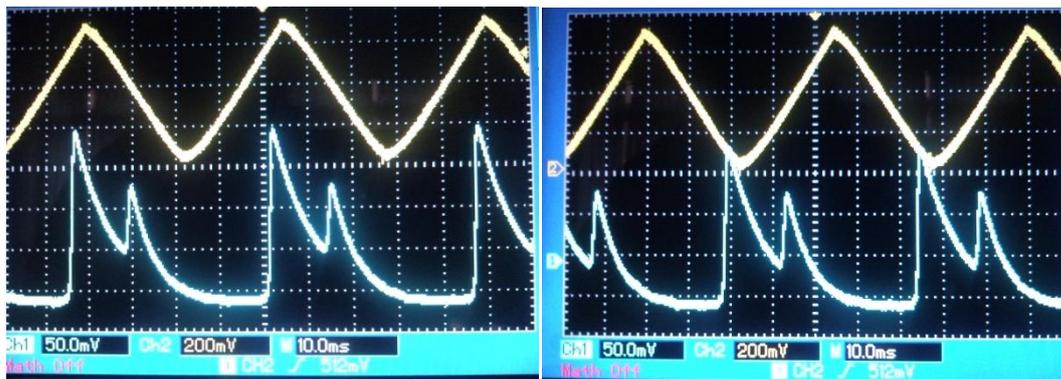


图 10、加入三角波后的共振吸收波形。左为吸收峰向波峰靠拢的情况，右为吸收峰向波谷靠拢的情况

分析原理如下。当磁场变化到与射频频率相对应，满足：

$$hf = 2\pi g_F \mu_F B$$

铷原子吸收射频光子，电子可自由向各能级跃迁，饱和态被打破，铷原子对光线的吸收也加强，出现吸收峰（前）。此时，铷原子布居数差最大，因此吸收最为强烈；当磁场继续变化离开吸收磁场时，铷原子相对缓慢地向饱和态恢复。这时，磁场到达波峰（或波谷）再次扫回吸收磁场时，铷原子再次吸收射频光子，对光线吸收也加强，再次出现吸收峰（后峰）。但当前后峰距离很近时，铷原子还未从前峰中恢复到饱和态就再次形成后峰，故后峰的布居数差小于前者，共振吸收强度也小于前者。