

光泵磁共振实验

Xuan yi, 复旦大学核科学与技术系

摘要: 本实验使用光泵磁共振实验装置探究了光抽运过程和磁共振过程, 观察了光抽运和磁共振的信号, 并借此测量了 ^{87}Rb 的 $5^2P_{1/2}(F=2)$ 态和 ^{85}Rb 的 $5^2P_{1/2}(F=3)$ 态的 g_F 因子, 然后测量了地磁场的方向和强度。

关键词: 磁共振 光抽运 (超) 精细结构

一、引言

磁共振波谱技术是利用物质在微波场或射频场中的共振跃迁来研究原子的精细、超精细结构及它们在磁场中的塞曼分裂的有效方法, 它的分辨率远优于一般的光谱技术。当测量所涉及的能级间距小于 kT 时 (其中 k 为波尔兹曼常数, T 为样品的温度), 热平衡条件下, 能级间的粒子布居数差别很小; 若样品又是气态原子, 波谱技术也面临如何提高共振信号强度的难题。

A.Kastler 等人提出用圆偏振光激发气态原子以实现原子在所研究能级间的布居数差 (偏极化), 并以泵浦光的强度变化来探测射频场激发的原子磁共振, 巧妙地用频率在 1014 Hz 量级的光信号的变化来探测共振频率在 106 Hz 量级的跃迁过程, 大大提高了探测灵敏度。A.Kastler 因对上述光抽运技术的贡献获得 1966 年诺贝尔物理学奖。

目前, 光泵磁共振方法基础研究中广泛有应用。因为它使弱信号的检测方便易行, 还大大促进了相关计量技术 (如弱磁场的测量等) 的发展。

本实验的物理内容很丰富。学生在实验过程中不仅要体验其物理思想的精妙, 而且要认真观察实验过程中出现的各种物理现象, 结合已有的知识, 深入分析现象背后的物理过程, 这将有利于我们加深对原子物理的理解, 体会实验方法对有关研究的巨大促进。

二、实验目的

要体验其物理思想的精妙, 而且要认真观察实验过程中出现的各种物理现象, 结合已有的知识, 深入分析现象背后的物理过程, 这将有利于我们加深对原子物理的理解, 体会实验方法对有关研究的巨大促进。

三、实验原理

3.1 原子能级和（超）精细结构

原子核外电子在库伦场中，产生离散的束缚能级，产生了能级结构。

考虑电子自旋和轨道角动量耦合

$$\hat{H}_{SO} = b(r)\mathbf{S} \cdot \mathbf{L} = b(r)\frac{\mathbf{J}^2 - \mathbf{L}^2 - \mathbf{S}^2}{2}$$

若轨道角动量量子数为 L ，则总角动量量子数分裂为 $j = l \pm \frac{1}{2}$ 两种能量的轨道，轨道分裂能为

$$E_{SO} = \beta_{nl} \frac{j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)}{2} = \begin{cases} \frac{l}{2}\beta_{nl} & j = l + \frac{1}{2} \\ -\frac{l+1}{2}\beta_{nl} & j = l - \frac{1}{2} \end{cases}$$

原子核的核磁矩和电子总磁矩的耦合效应，造成了超精细结构。

$$\vec{\mu}_I = -g_I \mu_B \frac{\mathbf{I}}{\hbar}, \hat{H}_{\text{hfA}} = -\vec{\mu}_I \cdot \mathbf{B}_e = A_I \cdot \frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{J}}{\hbar^2}$$

同精细结构一样，使用角动量耦合，得到超精细结构量子数 F 。

$$E_{\text{hfA}} = E_F = \frac{A_I}{2}(F(F+1) - I(I+1) - J(J+1))$$
$$F = I + J, \dots, |I - J|$$

如果此时加上外磁场，则角动量的磁场分量 m_F 会继续产生能级分裂

$$E_B = m_F g_F B_0 \mu_B$$
$$g_F = g_I \frac{F(F+1) + I(I+1) - j(j+1)}{2F(F+1)} + g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + j(j+1)}{2F(F+1)}$$

由于 $g_I \ll g_J$ ，我们有

$$g_F \approx g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + j(j+1)}{2F(F+1)}$$

3.2 磁矩和 g 因子

一个重要的常数是波尔磁矩

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$$

电子的轨道磁矩为

$$\vec{\mu}_L = -\mu_B g_L \frac{\mathbf{L}}{\hbar}, g_L = 1$$

电子的自旋磁矩为

$$\vec{\mu}_S = -\mu_B g_S \frac{\mathbf{S}}{\hbar}, g_S = 2.00$$

考虑电子的自旋轨道耦合

$$\vec{\mu} = -\mu_B g_J \frac{\mathbf{J}}{\hbar}$$

$$g_J = g_S \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} + g_L \frac{j(j+1) + l(l+1) - s(s+1)}{2j(j+1)}$$

同理可以计算

$$g_F = g_I \frac{F(F+1) + I(I+1) - j(j+1)}{2F(F+1)} + g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + j(j+1)}{2F(F+1)}$$

通常核自旋磁矩很小，可以忽略

$$g_F \approx g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + j(j+1)}{2F(F+1)}$$

3.3 Rb 原子数据

铷元素在自然界有两种同位素， ^{87}Rb 占 27.85%， ^{85}Rb 占 72.15%。两种同位素的能级不一样，此外，它们的核自旋不同， $I_{85} = \frac{5}{2}$, $I_{87} = \frac{3}{2}$ 。

相关参数在 (1-2) 中有非常细致的测量数据。

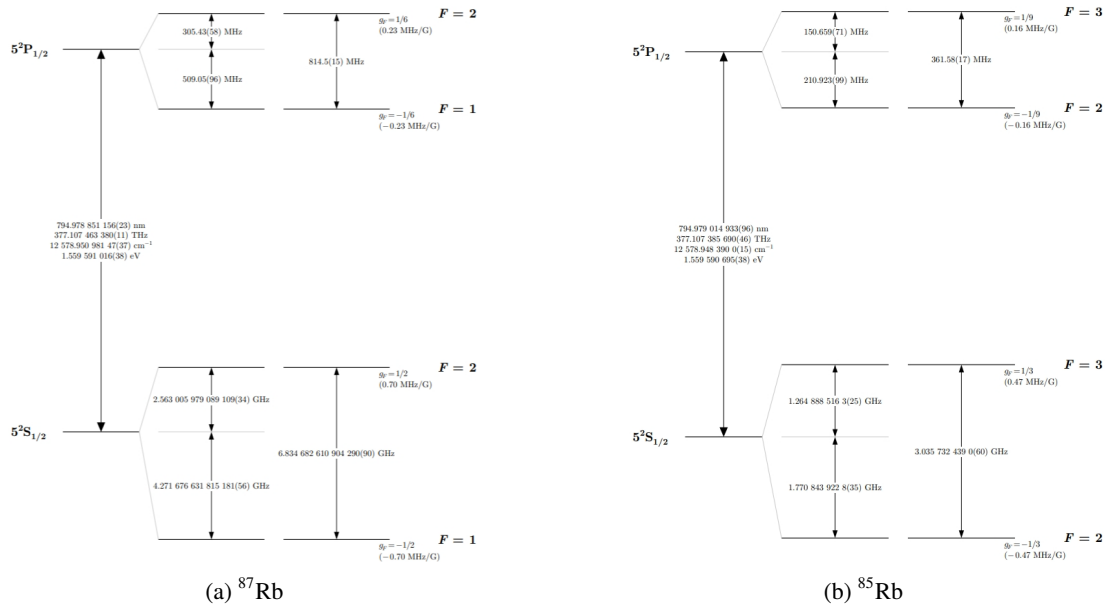


图 1 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 的低能级超精细结构 (1-2)

3.4 光泵和抽运

原子受到左旋偏振光 $D_1\sigma^+$ 照射时，向上跃迁遵循的跃迁选择定则为

$$\Delta F = 0, \pm 1, \Delta M_F = +1$$

受到磁量子数的选择定则限制，处于磁量子数 $M_F = +2$ 的状态无法向上跃迁。因为它的跃迁状态必须是 $M_F = +3$ ，这个状态必须在 $F = 3$ 的量子态下才存在，但是 ^{87}Rb 的 $5^2P_{1/2}$ 能级分裂的 5 量子数上限为 2。所以无法跃迁。

同理，受到右旋偏振光照射时，向上跃迁的选择定则为

$$\Delta F = 0, \pm 1, \Delta M_F = -1$$

选择定则会限制处于 $M_F = -2$ 的状态无法向上跃迁。

若考虑向下跃迁（退激辐射），则遵循的选择定则为

$$\Delta F = 0, \pm 1$$

综合考虑光激发跃迁和退激的选择定则，左旋偏振光照射时原子最终都将处于 $M_F = +2$ 的量子态，而右旋偏振光照射时，原子都将处于 $M_F = -2$ 的量子态。实现了原子能级的偏极化，如图2所示。对于 ^{85}Rb ，则超精细结构量子数 $F = 2, 3$ ，两种偏振光的抽运过程将会使得原子能级都处于 $M_F = -3$ 和 $M_F = +3$ 的状态。

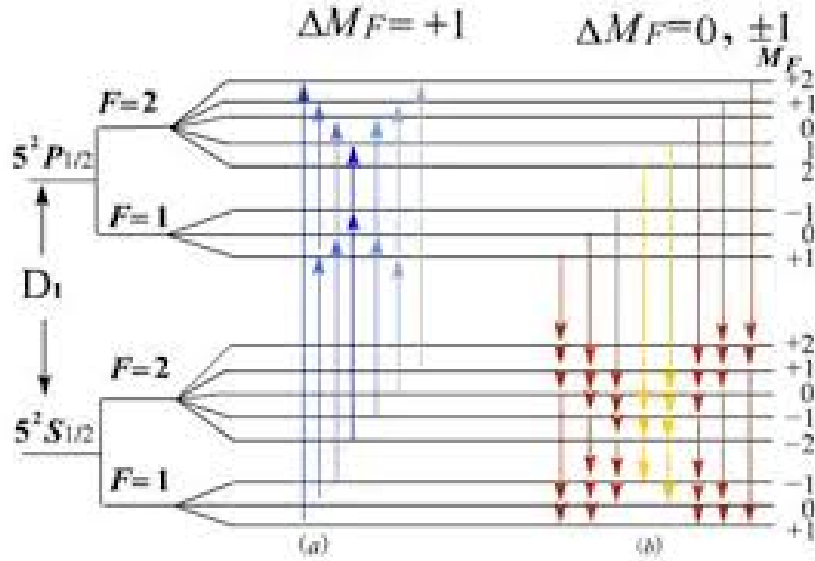


图 2 ^{87}Rb 原子光抽运过程

如果磁场的方向发生改变，就意味着电子的偏极化状态会发生改变，即样品泡会吸收圆偏振光。导致出射的圆偏振光变弱。光电倍增管就会在原本稳定的信号（稳定的偏极化状态会使得样品无法吸收圆偏振光）中产生向下的凹陷，这个凹陷可以通过示波器观察到，这就是抽运信号。我们将在后面的结果中观察到这个凹陷。

顺带提及，在自然光中，各种偏振光都存在，就无法导致原子能级锁定在磁量子数的边缘。

3.5 磁共振

在垂直于产生塞曼能级分裂的磁场上增加一个交变磁场，频率为 ν ，当满足共振条件

$$h\nu = g_F\mu_B B \tag{1}$$

时，塞曼能级之间产生感应（磁）跃迁，遵守的选择定则为 $\Delta F = 0, \Delta M_F = \pm 1$ 。

考虑对饱和偏极化的 Rb 原子进行磁共振，不难发现磁共振会破坏偏极化分布，从而使得偏极化可以继续发生。最终光抽运和磁共振会达到一个动态平衡。光跃迁速率比磁共振跃迁速率大几个数量级，因此光抽运与磁共振的过程就可以连续地进行下去。

四、实验装置

表 1 实验仪器

仪器名称	仪器编号	数量
NDS102U 数字示波器	H1831112	1
DH807A 型光磁共振实验装置电源	20110618	1
DH807A 型光磁共振实验装置辅助源	200604025	1
DDS 函数信号发生器	12B04055	1
光泵磁共振实验装置		

其中光泵磁共振实验装置如图3所示

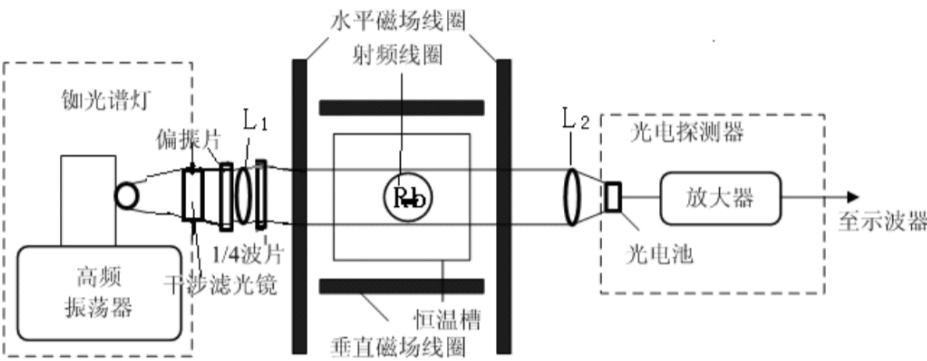


图 3 光泵磁共振实验装置

实验装置如图 7 所示，光源为铷原子光谱灯，由高频振荡器（频率约为 55 ~ 65 MHz），控温装置（80℃ ~ 90℃）及铷灯泡组成。铷灯泡在高频电磁场的激励下进行无极放电而发光，产生铷光谱，包括 $D_1 = 7948 \text{ \AA}$ 及 $D_2 = 7800 \text{ \AA}$ 光谱线。 D_1 谱对应着从 $5^2P_{1/2}$ 跃迁到 $5^2P_{1/2}$ 的能量， D_2 谱对本实验有害，通过滤光片去除。偏振片可用高碘硫酸奎宁偏振片，1/4 波片可用 40 μm 左右的云母片，使 D_1 线成为圆偏振光。透镜 L_1 使光源

发出的光变为平行光（焦距较小为宜），可用 $f = 5 \sim 8\text{cm}$ 的凸透镜，透镜 L_2 将透过样品泡的平行光会聚到光电接收器上。

主体中央为铷样品泡及磁场线圈部分。同位素比例为天然成分的铷和缓冲气体充在一直径为 $52\mu\text{m}$ 的玻璃泡内。这里一共有四组线圈，分别产生射频场、水平磁场、水平扫场和竖直磁场。

- 在铷样品泡的前后两侧对称放置一对小射频线圈，它为铷原子磁共振跃迁提供**射频场**。铷样品泡和射频线圈都置于圆柱形恒温槽内，称之为**吸收池**。槽内温度控制在最佳范围内温度。吸收池安放在两对亥姆霍兹线圈的中心。
- 一对竖直线圈产生的磁场用以抵消地磁场的竖直分量。
- 水平线圈有两套绕组，一组在外，为产生**水平直流磁场**的线圈，在它的电路上额外串联了一个 1Ω 的标准电阻，用以精测水平线圈的励磁电流。
- 水平线圈有两套绕组，另一组在内，为**扫场线圈**，扫场是在直流磁场上叠加的一个调制磁场（方波或三角波），值得注意的是，叠加上去的这个磁场始终是单极性的，即扫场扫面过程中的方向不会改变，在 0 和某个值之间来回变化。

我们也是通过监测串联在回路中的采样电阻来监测调制磁场的特性。使铷原子的超精细结构能级发生塞曼分裂的是水平方向的总磁场。

实验装置电源部分线框图如图4所示

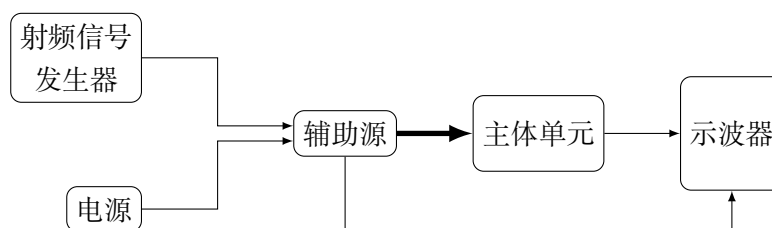


图 4 实验装置电源部分线

电源提供水平场和垂直场电流，射频信号发生器产生射频场，两者都经过辅助电源由 24 芯电缆与主体单元联接起来。由示波器观察共振信号和由辅助电源提供的扫场信号。

五、实验过程

5.1 仪器调整

实验受到磁场影响很大，一起调整的目的在于消除地磁场的影响，只留下和主体单元中抽运光的传播方向一致的外磁场。方法是利用竖直线圈消除垂直方向的磁场，调整仪器的水平偏转位置使得抽运光的传播方向和地磁场水平方向一致。具体操作如下

Step 1: 将光源、透镜、样品泡、光电接收器调节准直，调节凸透镜位置使得出射光为平行光。

Step 2: 在光路中的适当位置添加滤光片和 1/4 波片，1/4 波片的光轴方向和线偏振方向夹角为 $\pi/4$ ，以得到圆偏振光。实验中可以借助抽运信号幅度最大来判断 1/4 波片夹角、透镜的准直和位置是否达到预期。

Step 3: 调节实验磁场（地磁场水平分量）的方向也正好在仪器光轴上，我们采用的办法是先将水平场调节到最零（最小），调节扫场方向使得扫场和地磁场方向相反，产生完整的抽运信号。调节仪器的偏转方向和垂直场使得抽运信号尽可能均匀（相邻两次的抽运信号形状尽可能接近）。

5.2 磁场的测量

测量线圈的尺寸和匝数，获得电流和磁场之间的关系。

亥姆霍兹线圈轴心处的磁场可以用下面的公式计算

$$B = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (2)$$

其中 I 是线圈的电流， R 是线圈的半径， N 是线圈匝数， μ_0 是真空磁导率。

本实验中电流是通过采样电阻测得的，而采样电阻测量的实际上是总电流。如果线圈采用串联解法，则直接采用公式即可；如果线圈采用并联接法，则公式中的 I 应当改为 $I/2$ ，即

$$B = \frac{4}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (3)$$

本实验使用的光泵磁共振实验仪上，水平场磁场线圈和扫场线圈是用的并联接线，垂直场线圈用的是串联接线。

5.3 抽运信号的观察

5.3.1 磁场方向的研判

反复调节水平场和扫场的方向，观察到在某种情况下，无论如何设置水平场和扫场的幅度，都不会观察到抽运信号。而此时如果只改变水平场方向，则当水平场强度较小的时候，不会产生抽运信号；随着水平场强度增大，能够产生抽运信号；如果水平场继续增大，则又不会产生抽运信号。上述过程可解释可以参考图5。

这个过程实验现象具有鲜明且独特的特征，实验中可以借此来判断系统的方向。原讲义中提到的方法，要求水平场的大小可以调节为 0，进而使用磁针判断方向，而我们实验中发现水平场的大小无法调节到 0。

5.4 抽运信号的观察

使用不同的扫场，加入或不加入竖直线圈磁场及水平线圈磁场，以及改变它们的励磁电流大小和方向都将影响光抽运信号。

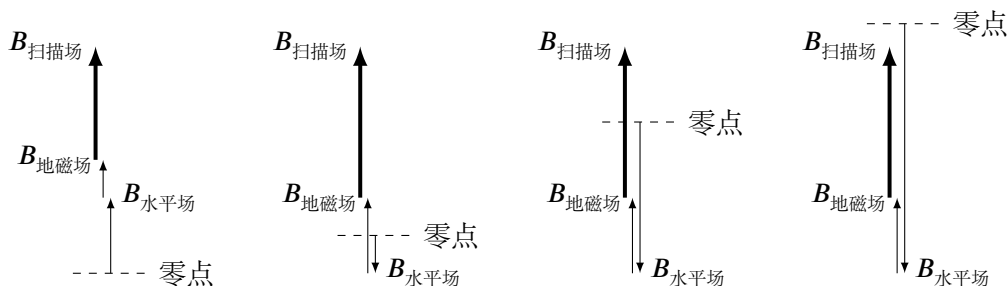


图5 磁场方向关系和抽运信号产生：扫描场是在0和给定幅度之间扫描，故将其加粗，水平场的调节通过调节电路中电流大小实现。根据抽运信号发生的机制（第3.4节），如果扫描场导致磁场方向改变（过零）就会产生抽运信号

在记录光抽运信号时要将信号幅度调至最大。实验中要求仔细观察光抽运信号，详细记录其产生的条件，分析各抽运信号的产生原因。

我们在实验中采用的方案是观察5中只有水平场反向的情况下（右三图），抽运信号从产生到消失的过程。这时我们主要观察的过程

并在能产生抽运信号的情况下，观察竖直场大小对抽运信号的影响。同时观察了一些其它条件下其它场的大小对抽运信号的影响。

5.5 磁共振信号的观察

在合适的条件下，加入射频场并调节到合适的幅度，观察磁共振信号，注意区分这到底抽运信号还是磁共振信号。

我们的做法是观察5中三场同向的情况下（左一图），设置合适的射频场和幅度，观察是否产生凹陷。因为此时三场通向，必然不可能发生抽运信号。

5.6 g_F 因子的测量

将扫场改为三角波，设置扫场的幅度在0.8 V一下。将射频场的幅度也设置的较小，本实验中设为1.2 V。下面的操作对水平场的电流分别为0.3, 0.4, 0.5的情况下重复。

设置扫场、水平场、地磁场水平方向同向，调节射频场的频率，观察到产生的磁共振信号，继续调节射频场的频率使得磁共振信号的凹陷对准扫场的波峰。注意样品中存在 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 两种同位素，存在两个频率 $\nu_1^{(87)}$, $\nu_1^{(85)}$ 可以达到同样的效果。我们需要将两个频率都测量出来，它们分别对应到两种同位素不同的 g_F 因子。

为了区分 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 共振谱线，当水平磁场不变时，频率高的为 ^{87}Rb 的谱线。

我们还要设置水平场反向，然后再次调节射频场的频率使得磁共振信号的凹陷对准扫场的波峰。同样的这里也要为两个同位素分别测量两个频率 $\nu_2^{(87)}$, $\nu_2^{(85)}$ 。

我们计算 g_F 因子的方法如下

$$\begin{aligned} h\nu_1 &= g_F \mu_B (B_{\text{水平场}} + B_{\text{扫描场}} + B_{\text{地磁场}}) \\ h\nu_2 &= g_F \mu_B (B_{\text{水平场}} - B_{\text{扫描场}} - B_{\text{地磁场}}) \\ \Rightarrow g_F &= \frac{h(\nu_1 + \nu_2)}{2\mu_B B_{\text{水平场}}} \end{aligned} \quad (4)$$

这里解释一下公式中的符号。磁共振条件实际上不关注外场的方向如何，只关注外场的大小。即实际上公式(1)中应当是 B 的大小 $|B|$ 。我们前面的设置水平场较大而扫场较小，磁场的方向由水平场主导，使得

$$|-B_{\text{水平场}} + B_{\text{扫描场}} + B_{\text{地磁场}}| = B_{\text{水平场}} - B_{\text{扫描场}} - B_{\text{地磁场}}$$

5.7 地磁场的测量

这里的测量思路和上面相同，不同的是我们需要测量扫场、水平场与地磁场水平分量方向相同的条件下的共振信号，以及同时使得扫场和水平场平分量改变后的共振信号。

$$\begin{aligned} h\nu_1 &= g_F \mu_B (B_{\text{水平场}} + B_{\text{扫描场}} + B_{\text{地磁场}}) \\ h\nu_3 &= g_F \mu_B (B_{\text{水平场}} + B_{\text{扫描场}} - B_{\text{地磁场}}) \\ \Rightarrow B_{\text{地磁场}} &= \frac{h(\nu_1 - \nu_3)}{2\mu_B g_F} \end{aligned} \quad (5)$$

这只是地磁场的水平方向，然后我们借助竖直场强度计算地磁场的数值强度，最后计算出地磁场的倾角和大小。

六、实验结果和分析

6.1 磁场的测量

亥姆赫兹线圈的参数为如表2所示

表 2 亥姆赫兹线圈的参数

物理量	水平场线圈	垂直场线圈
线圈匝数	250	100
有效半径/m	0.2459	0.1530

我们水平场线圈采用了并联接法，垂直场线圈采用了串联解法。根据5.2节，计算磁场和电流之间的比例系数为 k ，则

$$B = kI$$

$$k_{\text{水平场}} = 457.1 \mu\text{T A}^{-1}, k_{\text{扫场}} = 476.3 \mu\text{T A}^{-1}, k_{\text{垂直场}} = 587.7 \mu\text{T A}^{-1}$$

6.2 抽运信号的观察

6.2.1 方波下的抽运信号

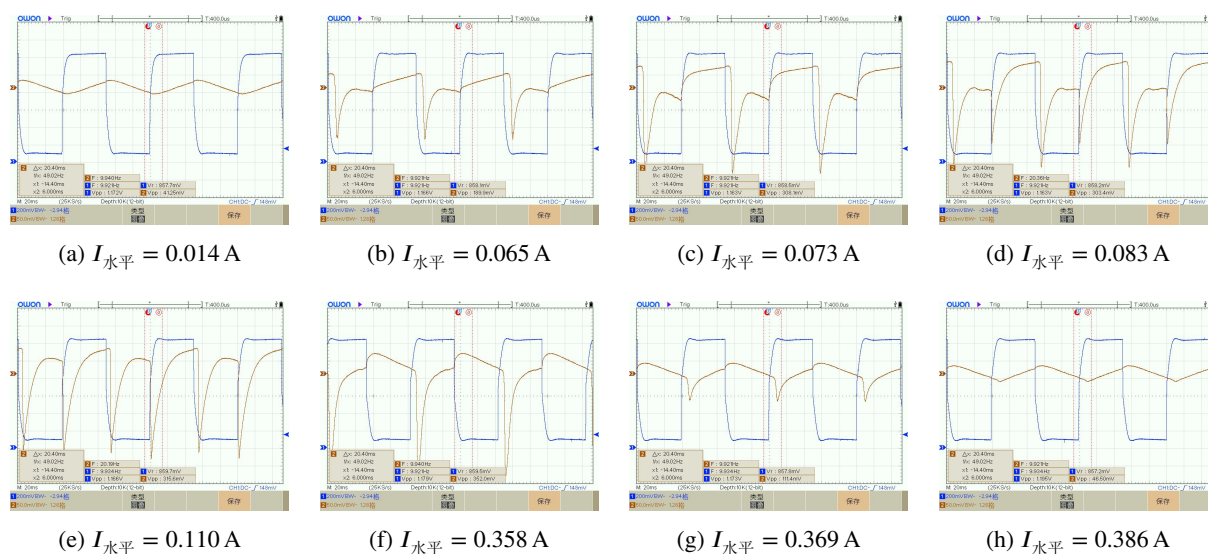


图6 抽运信号观察——方波

我们控制扫场和地磁场方向相同，使得水平场从最小开始增大，如图5后三种情形所示。在扫场模式为方波信号的情况下，测量结果如图6所示，图中 CH1 为扫场信号，而 CH2 是光电探测器上检测到的信号。

可见当水平场参数较小时，没有抽运信号。

当抽运信号开始增加时，在下降沿处开始产生抽运信号，这是因为方波信号不够理想，在边沿处存在一定的突起，而这个突起使得磁场过零，导致产生抽运信号，这可能是因为传输线之间存在阻抗不匹配所致。

当水平场信号继续增大一些，在上升沿处也开始产生抽运信号，但可以明显的观察到信号略微增大时，两个抽运信号不对称。

当水平场信号处于适当幅度的时候，前后半周期产生抽运信号基本对称。

当水平场信号继续增大，当水平场和地磁场之和接近扫场上边沿时，就会使得下降演处的抽运信号先开始消失，然后上升沿出的抽运信号也开始消失，这同样是因为边沿处非理想突起造成的。

当水平场信号继续增大，抽运信号消失，这是因为水平场信号足够强，覆盖了扫场和地磁场，使得磁场不再过零。

6.2.2 三角波下的抽运信号

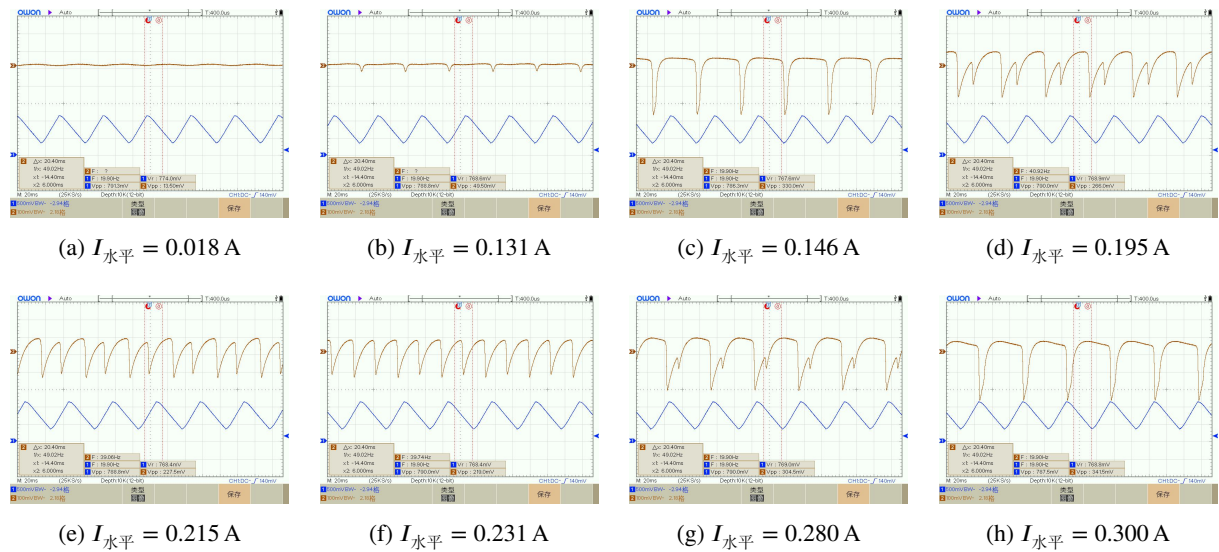


图 7 抽运信号的观察——三角波

在扫场模式为方波信号的情况下，测量结果如下7所示，图中 CH1 为扫场信号，而 CH2 是光电探测器上检测到的信号。

可见当水平场参数较小时，没有抽运信号。

当抽运信号开始增加时，三角波波谷处开始产生抽运信号，因为磁场在此处开始过零，如图7b和图7c所示。

当水平场信号继续增大一些，当信号幅度处于扫场中间水平是，就会在上升处和下降处产生两次抽运，如图7d、7e、7f和图7g所示。

当水平场信号继续增大，三角波波峰处产生抽运信号，如图7h所示，原理和图7c一致。

当水平场信号继续增大，抽运信号消失。

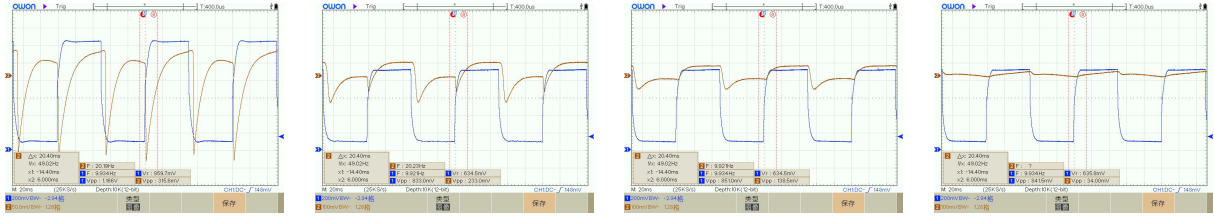
6.2.3 垂直场抽运信号的影响

设置水平场电流为 $I = 0.013 \text{ A}$ （当时的最小值），设置扫场方向和地磁场方向相反。我们观察了垂直场增大对抽运信号的影响，结果如图8b、8c、8d所示。

此时垂直场电流处于 0.060 A 时抽运信号最均匀，情况和图6e一致，所以将其放到图8中对比。

当垂直场电流增大，抽运信号变得不对称，如图8b、8c，这时因为对垂直场而言，入射光实际上是线偏振光，即两种圆偏振光的叠加，而不是单一方向的圆偏振光。总体的效果是使得装置观察到的信号不是完全的单一方向的圆偏振光，而存在一定程度的另一方向的圆偏振光，所以会对抽运信号产生干扰，产生不对称。

当垂直场信号很大的情况下，入射光几乎就是线偏振光，这不会引起抽运，如图8d所示。



(a) $I_{\text{垂直场}} = 0.060 \text{ A}$, 水平场电流为 $I = 0.013 \text{ A}$ (b) $I_{\text{垂直场}} = 0.078 \text{ A}$ (c) $I_{\text{垂直场}} = 0.144 \text{ A}$ (d) $I_{\text{垂直场}} = 0.404 \text{ A}$

图 8 抽运信号的观察——垂直场

6.3 g_F 因子和地磁场的测量

通过反转磁场方向来测量 g_F 因子以及地磁场水平分量，测量结果如表3所示

信号来源	$I_{\text{水平场}}/\text{A}$	$B_{\text{水平场}}/\mu\text{T}$	ν_1/kHz	ν_2/kHz	ν_3/kHz	g_F 因子	g_F 平均值	$B_{\text{地磁场}}/\mu\text{T}$
85Rb	0.3	137	1768	188	1391	0.510	0.511	26.4
	0.4	183	2091	520	1725	0.510		25.6
	0.5	229	2421	855	2045	0.512		26.2
87Rb	0.3	137	125	929	0.339	0.339	0.340	26.2
	0.4	183	347	1146	0.341	0.341		26.2
	0.5	229	569	1365	0.341	0.341		26.0

表 3 g_F 因子和地磁场的测量

6.3.1 g_F 的计算

测量结果显示

$$g_{F,85\text{Rb}} = 0.511, g_{F,87\text{Rb}} = 0.340 \quad (6)$$

和理论计算值 (1-2) 的结果

$$g_{F,85\text{Rb}} = \frac{1}{2}, g_{F,87\text{Rb}} = \frac{1}{3}$$

的相对误差分别为 2.2% 和 2.0%

6.3.2 地磁场的计算

地磁场的水平分量的平均值为

$$B_{\text{地磁场}}^{\parallel} = 26.1 \mu\text{T} \quad (7)$$

垂直场刚好抵消地磁分量时，电流为 $I_{\text{地磁场}} = 0.060$ ，则地磁场垂直分量为

$$B_{\text{地磁场}}^{\perp} = k_{\text{地磁场}} \cdot I_{\text{地磁场}} = 35.3 \mu\text{T} \quad (8)$$

故地磁的倾斜角和大小为

$$\alpha = \arctan \frac{B_{\text{地磁场}}^{\perp}}{B_{\text{地磁场}}^{\parallel}} = 53.52^{\circ}$$
$$B_{\text{地磁场}} = \sqrt{\left(B_{\text{地磁场}}^{\perp}\right)^2 + \left(B_{\text{地磁场}}^{\parallel}\right)^2} = 43.9 \mu\text{T}$$

七、实验结论

- 通过光泵磁共振实验装置观察到了抽运信号和磁共振，验证了光泵抽运过程的原理以及磁共振的原理；
- 测量了 ^{87}Rb 的 $5^2P_{1/2}(F=2)$ 态以及 ^{85}Rb 的 $5^2P_{1/2}(F=3)$ 态的 g_F 因子，测量结果为

$$g_{F,^{85}\text{Rb}} = 0.511, g_{F,^{87}\text{Rb}} = 0.340$$

和理论值的相对误差分别为 2.2% 和 2.0%；

- 使用上述的 g_F 以及竖直的磁场线圈测量了地磁场的大小和方向，地磁场的大小为 $43.9 \mu\text{T}$ ，地磁场的倾角为 53.52° ；

八、参考文献

- [1] Daniel A. Steck, ‘‘Rubidium 85 D Line Data,’’
- [2] Steck, Daniel A. ‘‘Rubidium 87 D line data.’’ (2001).