



中山大學 物理与天文学院
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF PHYSICS AND ASTRONOMY

光泵磁共振实验

黄罗琳 戴鹏辉 杨舒云 丁侯凯

中山大学物理与天文学院，中国珠海市大学路 2 号，519082

山高路远，江湖悠悠

2025 年 6 月 5 日

E3: 光泵磁共振实验

实验时间:	2025 年 5 月 16 日
实验地点:	A407 光学实验室
环境信息:	室温 25°
实验人 1:	黄罗琳 22344001
实验人 2:	戴鹏辉 22344016
实验人 3:	杨舒云 22344020
实验人 4:	丁侯凯 22344009
指导老师	刘培亮

注意事项

实验报告由预习、实验和分析与讨论三部分组成，并附封面页与附件。预习报告要求课前深入研读实验手册，掌握实验原理，熟悉仪器设备及其使用方法，完成实验思考题，并提前准备实验记录表（可参考实验报告模板打印）。实验记录需客观、详细地记录实验条件、现象及数据，须使用圆珠笔或钢笔书写并签名（铅笔记录无效）。原始记录必须完整保留，包括错误和修改内容，错误更正需按标准程序进行。实验记录不得录入计算机打印，但可扫描手写笔记后打印，实验结束前须经指导教师检查并签字。数据处理与分析环节需对原始数据进行处理（除以仪器学习为主的实验外），评估数据的可靠性和合理性，并以标准格式呈现（图表需编号并规范引用）。此外，还需分析实验现象，回答实验思考题，规范引用数据，并最终得出实验结论。实验报告需在实验结束后一周内提交（特殊情况不超过两周）。

特别说明

本实验报告模板基于 MIT License 许可协议进行分发和使用，使用本模板即表示您同意遵守相关条款。本模板由组内成员 pifuyuini 与 Jade Moon 共同开发，随着我们步入高年级阶段的近代物理实验课程，实验报告的书写要求也随之提升——不再局限于套用固定格式的模板，而是更加注重参考学术论文的结构与风格来完成实验报告，这也是本模板设计的初衷。因此，与基础物理实验课程中学院提供的“标准模板”相比，本报告在架构和行文风格上均作出了一定的调整。如本报告的格式或内容与老师或助教的阅读习惯存在差异，敬请谅解。

目录

1	预习报告	4
1.1	实验目的	4
1.2	仪器用具	4
1.3	原理概述	4
1.3.1	光泵磁共振原理	4
1.3.2	铷原子能级结构	5
1.3.3	光抽运过程	5
1.3.4	弛豫过程	6
1.3.5	塞曼能级间的磁共振	6
1.3.6	光探测	7
1.4	实验前思考题	7
2	实验过程	10
2.1	系统预热和仪器调节	10
2.2	观察光抽运信号，并分析讨论	10
2.2.1	(a) 部分结果	11
2.2.2	(b) 部分结果	11
2.2.3	(c) 部分结果	12
2.2.4	(d) 部分结果	13
2.2.5	(e) 部分结果	14
2.2.6	相关分析讨论	16
2.3	测量光抽运时间和弛豫时间	17
2.3.1	实验过程	17
2.3.2	数据处理	18
2.3.3	误差分析	19
2.4	测量 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的 g_F 因子	19
2.4.1	实验过程	19
2.4.2	数据分析	19
2.4.3	误差分析	21
2.5	利用光泵磁共振方法测量地磁场	22
2.5.1	地磁场垂直分量 $B_{E\perp}$ 的测量	22
2.5.2	地磁场水平分量 $B_{E\parallel}$ 的测量	23
2.5.3	地磁场测量结果	24
2.6	研究不同偏振态的光对光抽运信号强度的影响	25

2.6.1	1/4 玻片对光束偏振态的调制机理	25
2.6.2	测量结果与拟合分析	26
2.6.3	分析讨论	27
3	实验后思考题	28
4	附录	29
4.1	补充内容	29
4.2	原始数据与桌面	29
4.3	个人签名	30



预习报告

1.1 实验目的

- ▶ 通过实验加深对原子超精细能级结构、光跃迁及磁共振现象的了解。
- ▶ 掌握光泵磁共振的光抽运原理和光探测手段，观察光磁共振信号。
- ▶ 掌握精确测量铷原子 g_F 因子和弱磁场大小的实验方法。
- ▶ 了解吸收池中原子碰撞弛豫过程及环境磁场对吸收信号的影响。
- ▶ 学会利用光泵磁共振技术开展探索性实验研究。

1.2 仪器用具

表 1: 光泵磁共振实验仪器清单

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，精度等）
1	直流电源	1	第 1 路：0~1 A 可调稳流电源； 第 2 路：0~0.2 A 可调稳流电源； 第 3 路和第 4 路：24 V/2 A、20 V/0.5 A 稳压电源
2	辅助源	1	提供三角波、方波扫场信号及温度控制电路， 设有“外接扫描”插座，可接示波器扫描输出
3	射频信号发生器	1	频率范围 100 kHz~1 MHz，输出功率在 50 Ω 负载上 ≥ 0.5 W
4	示波器	1	—
5	铷光谱灯	1	—
6	干涉滤波片	1	—
7	准直透镜	1	—
8	偏振片	1	—
9	1/4 玻片	1	—

1.3 原理概述

1.3.1 光泵磁共振原理

光泵磁共振原理可以简述成下面三个过程：

1. 首先通过光抽运过程使原子吸收某种特定的光造成能级原子数的分布偏离热平衡条件下的玻尔兹曼分布。
2. 同时作用射频电磁场后原子超精细结构塞曼子能级间发生磁共振。
3. 最后利用光探测方法探测原子对入射光的吸收，从而获得光泵磁共振的信号。

1.3.2 铷原子能级结构

本实验的研究对象选用天然的气态碱金属铷（Rb）原子。在耦合中，原子价电子总角动量与原子总磁矩的关系为

$$\boldsymbol{\mu} = -g_F \mu_B \mathbf{F} / \hbar$$

其中， g_F 为朗德因子。 ^{85}Rb 的原子也具有自旋和磁矩，相应的自旋量子数分别为 $I = 5/2$ 和 g_I 。原子的核磁矩与电子总磁矩相互作用，产生 I - J 耦合，使能级进一步分裂，形成超精细结构能级。

设原子核的角动量为 \mathbf{I} ，则原子的总角动量为

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} + \mathbf{I}$$

F 为耦合后的总量子数。 ^{85}Rb 基态有 $J = 1/2$ ，故取 $F = 2$ 和 $F = 3$ 。 ^{87}Rb 的基态有 $J = 1/2$ ，故取 $F = 1$ 和 $F = 2$ 两个值。

原子总磁矩与总角动量的关系为

$$\boldsymbol{\mu}_F = -g_F \mu_B \mathbf{F} / \hbar$$

其中，朗德因子

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

在磁场中，原子的超精细能级产生塞曼分裂（弱场时为反常塞曼效应）。根据空间量子化原理，原子总角动量在磁场方向的投影为 $m_F \hbar$ ，磁量子数可能值为 $-F, -F+1, \dots, F$ ，即分裂成 $2F+1$ 个能量间距基本相等的塞曼子能级。

在外磁场中铷原子的哈密顿量可以写成

$$\mathcal{H} = A \mathbf{I} \cdot \mathbf{J} - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$$

其中， A 为磁偶极子相互作用常数。

1.3.3 光抽运过程

实验中主要观测的是发生基态塞曼子能级之间的射频磁共振。在热平衡状态下，粒子服从玻尔兹曼分布

$$N_i = N_0 e^{-E_i / k_B T}$$

其中， k_B 为玻尔兹曼常数。

光抽运通过选择性激发,使高能级的粒子数超过低能级,这是违反玻尔兹曼分布的,但是增大粒子在超精细结构塞曼子能级间布局数之差,这种不均匀分布称为偏极化,有利于为本实验观测射频磁共振创造条件。

1.3.4 弛豫过程

在热平衡状态下,基态各子能级上的粒子数遵从玻尔兹曼分布 ($N_i = N_0 e^{-E_i/k_B T}$)。由于各子能级的能量差极小,可以近似认为各能级粒子数相等。光抽运破坏这种平衡,产生显著的非热平衡分布。系统从非平衡趋向平衡的过程称为弛豫,主要包括三种机制:

1. 铷原子与容器壁碰撞(主导弛豫途径,原子面密度约 10^{14} cm^{-2})使原子回归热平衡分布;
2. 铷原子间自旋-自旋交换弛豫(外磁场为零时消除塞曼子能级偏极化);
3. 铷原子与缓冲气体(如 N_2)碰撞,其磁矩扰动可忽略但能大幅减少器壁碰撞概率(降低6个数量级)。缓冲气体还通过无辐射跃迁使激发态原子如 ^{85}Rb 等概率返回基态,反而促进特定子能级(^{85}Rb 的 $F=3, m_F=+2$, ^{87}Rb 的 $m_F=+3$)的粒子数积累。

光抽运建立的粒子数差比玻尔兹曼分布高数个数量级,这是原子气室实验设计的重要理论基础。

1.3.5 塞曼能级间的磁共振

对于 ^{87}Rb ,在光抽运作用下,大量原子聚集到基态 $F=2, m_F=+2$ 子能级上,实现粒子数反转,直至偏极化达到饱和。在弱的外磁场 B_0 中相邻超精细塞曼子能级能量之差为

$$\Delta E = g_F \mu_B B_0$$

如果在垂直于外磁场的方向上加一频率为 ν 的射频场,当满足磁共振条件时,即

$$h\nu = \Delta E = g_F \mu_B B_0$$

在基态塞曼子能级间将发生射频受激辐射, $m_F=+2$ 子能级上的原子感应跃迁到 $m_F=+1, m_F=0$ 等能量更低的能级上。同时由于抽运光的连续照射,处于基态子能级上的粒子又将被抽运到 $m_F=+2$ 子能级上。感应跃迁与光抽运将达到一个新的动态平衡。在产生磁共振时,基态各子能级上的粒子数大于不共振时,因此对 $D_1\sigma^+$ 光的吸收增大。光跃迁速率比磁共振跃迁速率大好几个数量级,所以光抽运过程与磁共振过程可以连续的进行下去。对于 ^{85}Rb 也有类似的情况,只是光将 ^{85}Rb 抽运到基态 $F=3, m_F=+3$ 子能级上。

本次实验过程中,使用磁场固定,频率改变的扫频法来实现磁共振。使垂直于外磁场的方向上加一频率为 ν 的射频场,当满足磁共振条件时,即

$$h\nu = g_F \mu_B B_0$$

从而可以观察到铷原子对 $D_1\sigma^+$ 光的周期性吸收现象。

1.3.6 光探测

磁共振相伴随有对光吸收的变化, 因此测光强的变化即可得到磁共振的信号, 这就实现了磁共振的光探测。所以射到样品上的光同时起了抽运与探测两个作用。将一个低频射频光子 (1MHz) 转换成了一个高频光频光子 (10^8 MHz), 使得信号功率提高了 7 个数量级, 探测灵敏度大为提高。

1.4 实验前思考题

Reflection Question 1.1:

光泵磁共振与核磁共振、电子顺磁共振主要区别是什么?

- ▶ 相邻两塞曼子能级间粒子数的差别, 不是由玻尔兹曼分布所决定的, 而是利用光抽运的方法使相邻两能级间粒子数之差增加几个数量级;
- ▶ 磁共振不是通过磁偶极子跃迁所辐射或吸收的功率大小来检测, 而是测量磁偶极子共振跃迁后伴随的通过样品吸收池的偏振光强度的变化。由于光量子 (约 10^8 MHz) 比射频量子 (约 1- 10 MHz) 的能量高 7- 8 个数量级, 这样使得探测的信号功率也提高了 7-8 个数量级。通过比较可以看出, 光泵磁共振方法既保持了磁共振的高分辨率, 同时又提高了探测信号的灵敏度。

Reflection Question 1.2:

利用理论公式计算 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 基态超精细结构能级的值, 并分析在实验观测中如何区别这两种同位素的磁共振信号?

- ▶ 计算 g_F 值:
 - Rb 的两个稳定同位素 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 均处于基态 $5S_{1/2}$, 对应电子态的角动量量子数为 $L = 0$, 自旋量子数为 $S = \frac{1}{2}$, 因而 $J = \frac{1}{2}$ 。其核自旋分别为:
 - ^{87}Rb : $I = \frac{3}{2}$, 对应总角动量 $F = I \pm J = 1, 2$;
 - ^{85}Rb : $I = \frac{5}{2}$, 对应总角动量 $F = 2, 3$ 。
 - 首先计算电子态朗德因子 g_J :

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

对于 $J = \frac{1}{2}, S = \frac{1}{2}, L = 0$, 代入得:

$$g_J = 1 + \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1)}{2 \cdot \frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1)} = 1 + \frac{\frac{3}{4} + \frac{3}{4}}{\frac{3}{2}} = 1 + 1 = 2$$

- 接着利用公式计算超精细结构能级的朗德因子 g_F :

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

- 对于 ^{87}Rb ($I = \frac{3}{2}, J = \frac{1}{2}, g_J = 2$):

■ $F = 1$:

$$g_F = 2 \cdot \frac{1(1+1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1) - \frac{3}{2}(\frac{3}{2}+1)}{2 \cdot 1(1+1)} = 2 \cdot \frac{2 + \frac{3}{4} - \frac{15}{4}}{4} = 2 \cdot \left(-\frac{10}{16}\right) = -\frac{5}{4}$$

■ $F = 2$:

$$g_F = 2 \cdot \frac{2(2+1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1) - \frac{3}{2}(\frac{3}{2}+1)}{2 \cdot 2(2+1)} = 2 \cdot \frac{6 + \frac{3}{4} - \frac{15}{4}}{12} = 2 \cdot \frac{12}{48} = \frac{1}{2}$$

- 对于 ^{85}Rb ($I = \frac{5}{2}, J = \frac{1}{2}, g_J = 2$):

■ $F = 2$:

$$g_F = 2 \cdot \frac{2(2+1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1) - \frac{5}{2}(\frac{5}{2}+1)}{2 \cdot 2(2+1)} = 2 \cdot \frac{6 + \frac{3}{4} - \frac{35}{4}}{12} = 2 \cdot \left(-\frac{13}{24}\right) = -\frac{13}{12}$$

■ $F = 3$:

$$g_F = 2 \cdot \frac{3(3+1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1) - \frac{5}{2}(\frac{5}{2}+1)}{2 \cdot 3(3+1)} = 2 \cdot \frac{12 + \frac{3}{4} - \frac{35}{4}}{24} = 2 \cdot \frac{16}{96} = \frac{1}{3}$$

- 计算结果总结如下:

$$\begin{aligned} ^{87}\text{Rb}: \quad g_{F=1} &= -\frac{5}{4}, \quad g_{F=2} = \frac{1}{2} \\ ^{85}\text{Rb}: \quad g_{F=2} &= -\frac{13}{12}, \quad g_{F=3} = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

而我们的磁共振过程主要就是发生在 ^{87}Rb 的基态 $F = 2$ 的超精细能级上, 对应的朗德因子 $g_{F=2}(^{87}\text{Rb}) = \frac{1}{2}$, 以及 ^{85}Rb 的基态 $F = 3$ 的超精细能级上, 对应的朗德因子 $g_{F=3}(^{85}\text{Rb}) = \frac{1}{3}$ 。

► 区别这两种同位素的磁共振信号:

- 共振频率不同:

磁共振频率由以下公式得到

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

其中 μ_B 是玻尔磁子, B_0 是恒定磁场, h 是普朗克常数。

由于 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的 g_F 值不同, 它们的共振频率也不同。在相同磁场 B_0 下, ^{87}Rb 的共振频率高于 ^{85}Rb 。

- 超精细结构分裂不同: ^{87}Rb 的超精细分裂较大, 而 ^{85}Rb 的超精细分裂较小, 在实验中可以通过调节射频场的频率分别观测到两种同位素的共振信号。
- 信号强度不同: 由于 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 的自然丰度不同, 它们的信号强度也会有所不同。

Reflection Question 1.3:

当用铷的 D_1 光或线偏振光照射处于磁场中的铷原子时, 能否发生光抽运效应? 若入射光为椭圆偏振光时又如何?

当入射光为 π 光时, 铷原子对光有强的吸收, 但无光抽运效应; 当入射光为椭圆偏振光 (不等量的 σ^+ 和 σ^- 的混合) 时, 光抽运效应较圆偏振光小。

Reflection Question 1.4:

实验观测铷的磁共振信号时需要提供哪几个磁场？有什么要求？各起什么作用？

(1) 竖直和水平磁场

- 作用：
 - 消除地球磁场及其他环境杂散磁场对铷原子的影响，确保铷原子能级的塞曼分裂仅由实验所需的磁场控制。
 - 为后续磁场的叠加提供“零磁场”的基准环境。
- 要求：
 - 补偿精度高：通过三维亥姆霍兹线圈（或梯度补偿线圈）产生与地磁场大小相等、方向相反的磁场，需借助磁力计校准至剩余磁场小于 10^{-9} 量级。
 - 稳定性好：补偿后的剩余磁场需高度稳定，避免温度漂移或电流波动引起的干扰。

(2) 水平扫描磁场

- 作用：
 - 在垂直于光传播方向上产生静态或低速扫描的磁场，使铷原子基态的磁子能级发生塞曼分裂。
 - 通过调节磁场强度“扫描”能级间距，为磁共振提供可调的能量参考。
- 要求：
 - 亥姆霍兹线圈需设计为均匀磁场区，保证铷蒸气区域的磁场梯度极小，避免能级展宽。
 - 若需要磁场线性扫描，驱动电流需由精密控制的斜坡信号或三角波产生。
 - 需覆盖铷原子塞曼分裂对应的能级间距范围。

(3) 射频磁场

- 作用：
 - 产生交变磁场，当满足共振条件时，诱导铷原子在相邻磁子能级间跃迁（磁共振）。
 - 通过布居数的重新分布，改变透射光强。
- 要求：
 - 射频频率需与塞曼能级差严格匹配（同步可调）。
 - 射频磁场方向需与扫描磁场正交，确保有效耦合。
 - 过高的功率会引起塞曼能级跃迁的功率展宽，需优化至信号清晰可见。

Reflection Question 1.5:

本实验磁共振各发生在 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 哪些能级间？

^{87}Rb 的磁共振发生在基态的超精细能级 $F = 2$ 的塞曼子能级之间； ^{85}Rb 的磁共振发生在基态的超精细能级 $F = 3$ 塞曼子能级之间。



实验过程

2.1 系统预热和仪器调节

1. 检查主体单元光路的机械安装和调整。
2. 借助磁针，调节导轨，使主体装置的光轴与地磁场水平方向平行。

如何调节？判断方向平行的依据是什么？

将磁针放置在主体装置附近，确保磁针的指向与光轴方向一致。磁针的 N 极指向地磁场的北极方向，S 极指向地磁场的南极方向。光轴与磁针的指向平行时，即可认为光轴与地磁场水平方向平行。

3. 检查各连线是否正确。将电源前面板上的“垂直”、“水平”和辅助源前面板“扫场幅度”旋钮调到最小。
4. 接通电源，加热铷光谱灯和吸收池，约 30 分钟后，灯温、池温指示灯点亮，实验装置进入工作状态。从铷灯后面小圆窗口观察，灯泡应发出玫瑰紫色的光。

温度控制在多少时，信号最大？对于 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb ，情况是否一样？

铷光谱灯的温度通常控制在 90°C 左右，吸收池的温度控制在 55°C 左右。对于 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb ，实验室通常使用相同温度设置。

2.2 观察光抽运信号，并分析讨论

1. 调出光抽运信号，细调扫场幅度、偏振片与玻片夹角、垂直磁场电流及光路上各元件位置等，使信号达到最大；
2. 利用磁针，预先判断并记录辅助源前面板水平磁场、垂直磁场、扫场方向控制开关代表的方向状态，与地磁场方向是否同向或反向。
3. 观察和记录不同磁场情况：
 - (a) 水平、垂直磁场为零时，扫场与地磁场同向或反向，并改变扫场大小；
 - (b) 扫场与地磁场同向时，分别改变水平和垂直磁场的大小和方向；
 - (c) 扫场与地磁场反向时，重复 (b)；
 - (d) 改用三角波扫场方式，重复 (b)(c) 实验步骤；
 - (e) 改用外接扫场方式（将辅助源后面板扫场开关置“外”），信号发生器选择方波或三角波，分别改变信号输出的幅度和扫描速度等以上所有的光抽运信号，并分析形成原因。

2.2.1 (a) 部分结果

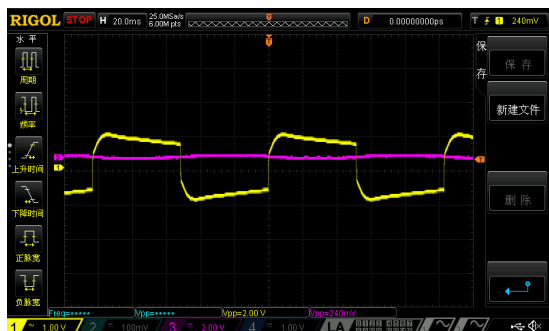


图 1: 振幅小-扫场与地磁场同向

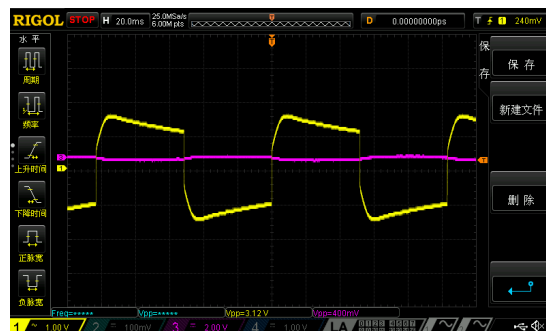


图 2: 振幅最大-扫场与地磁场同向

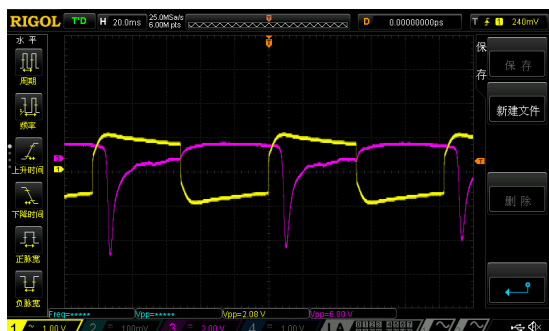


图 3: 振幅小-扫场与地磁场反向



图 4: 振幅最大-扫场与地磁场反向

当外加扫场与地磁场方向相同时，总磁场方向与地磁场一致。此时，铷原子能级的塞曼分裂随扫场强度增加而加剧，光抽运效应增强，原子对光的吸收效率提高，检测信号强度增大。

相反，当扫场方向与地磁场相反时，总磁场方向反转。尽管铷原子能级仍随扫场增强而分裂，但原子对探测光的吸收能力降低，导致信号强度减弱。

2.2.2 (b) 部分结果



图 5: 水平磁场关闭 (0.020A)，垂直磁场关闭 (0.057A)

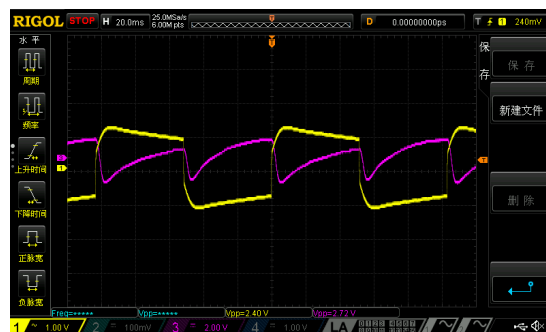


图 6: 水平磁场关闭 (0.206A)，垂直磁场开启 (0.136A)

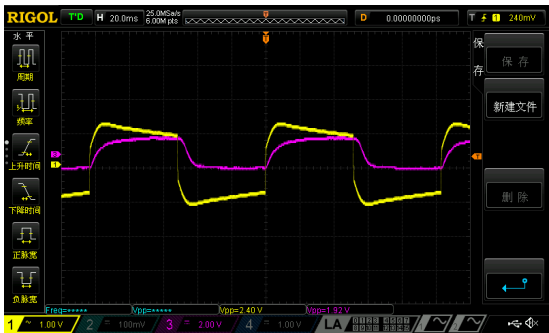


图 7：水平磁场开启 (0.067A)，垂直磁场关闭 (0.025A)

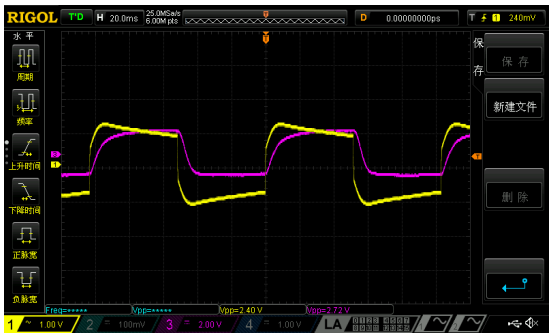


图 8：水平磁场开启 (0.084A)，垂直磁场开启 (0.212A)

实验数据显示，调节水平方向电流大小时，随着水平电流的改变，信号波形会发生偏移，且强度分布不再均匀。在调节垂直磁场时，会影响到地磁场垂直分量对于信号的影响，具体体现为，在测量时会逐步找到一个信号最大的峰值。

2.2.3 (c) 部分结果

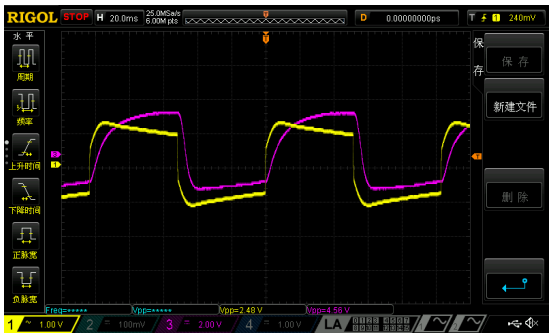


图 9：水平磁场关闭 (0.099A)，垂直磁场关闭 (0.070A)

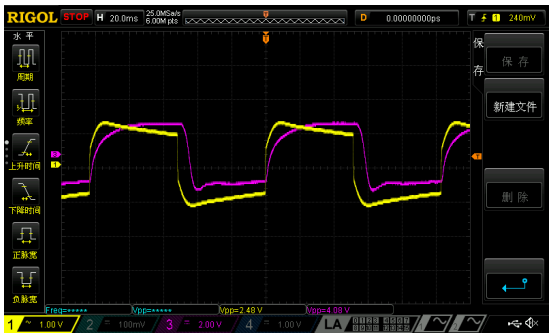


图 10：水平磁场关闭 (0.105A)，垂直磁场开启 (0.067A)



图 11：水平磁场开启 (0.066A)，垂直磁场开启 (0.082A)

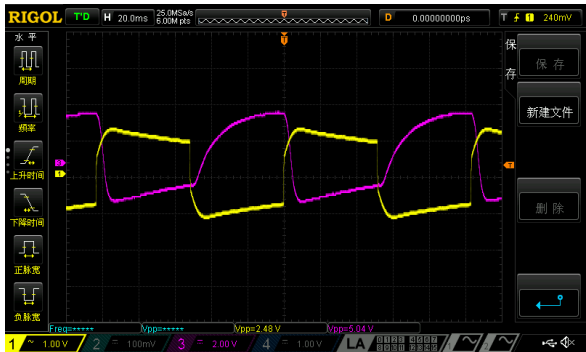


图 12：水平磁场开启 (0.134A)，垂直磁场关闭 (0.051A)

2.2.4 (d) 部分结果

扫场与地磁场反向

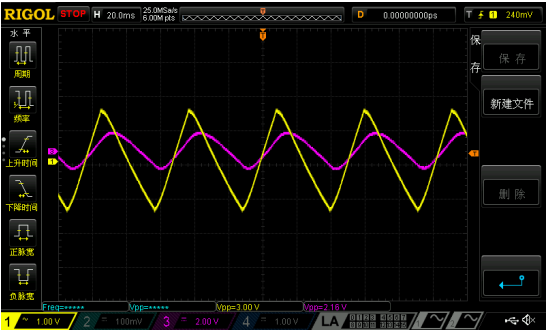


图 13: 水平磁场 off, 电流 0.165A; 垂直磁场 off, 电流 0.226A

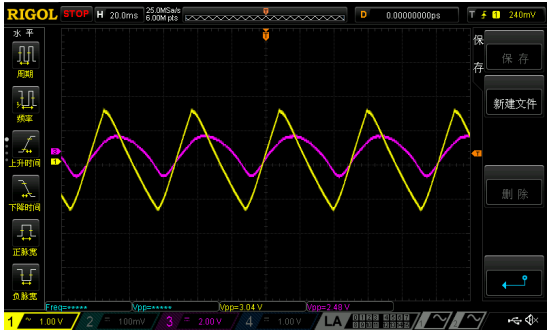


图 14: 水平磁场 off, 电流 0.203A; 垂直磁场 on, 电流 0.171A

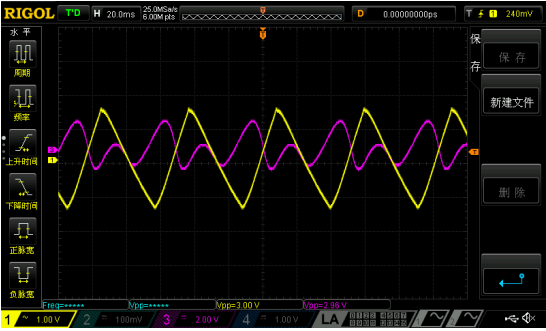


图 15: 水平磁场 on, 电流 0.132A; 垂直磁场 on, 电流 0.107A

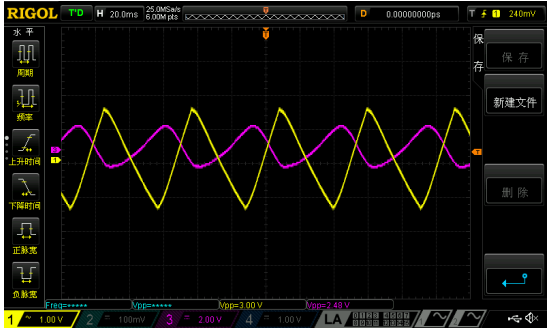


图 16: 水平磁场 on, 电流 0.243A; 垂直磁场 off, 电流 0.146A

扫场与地磁场同向

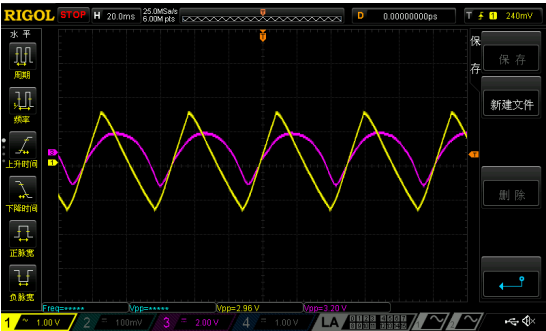


图 17: 水平磁场 off, 电流 0.030A; 垂直磁场 on, 电流 0.122A

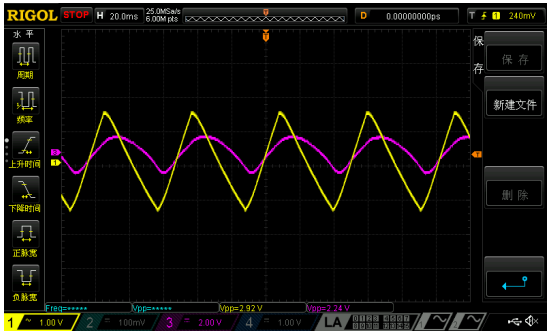


图 18: 水平磁场 off, 电流 0.090A; 垂直磁场 off, 电流 0.114A

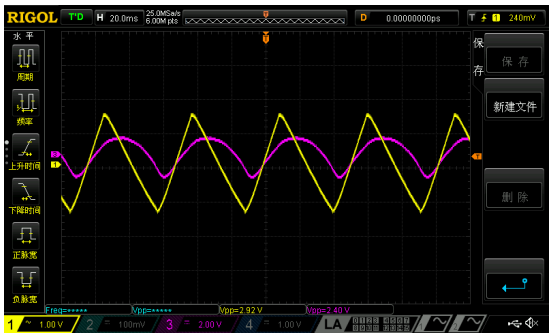


图 19: 水平磁场 on, 电流 0.017A; 垂直磁场 on, 电流 0.144A

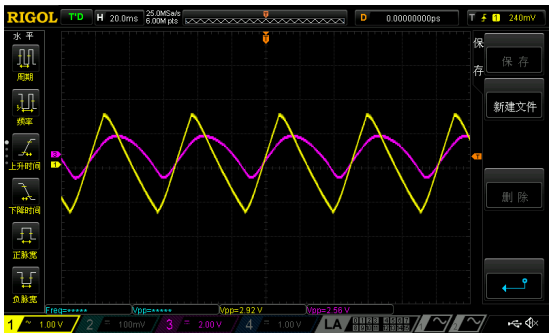


图 20: 水平磁场 on, 电流 0.052A; 垂直磁场 off, 电流 0.108A

幅值偏大和偏小



图 21: 水平磁场 0.106A, 垂直磁场 0.041A, 反向, 幅值偏大

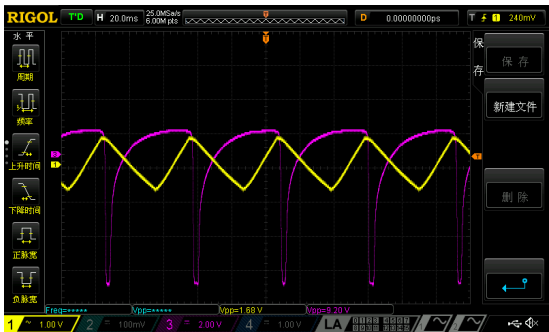


图 22: 水平电流 0.106A, 垂直磁场 0.041A, 反向, 幅值偏小

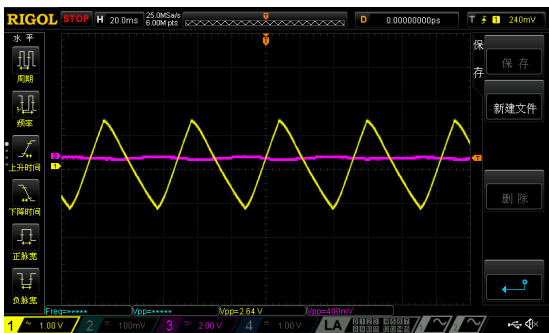


图 23: 水平磁场 0.106A, 垂直磁场 0.041A, 同向, 幅值偏大

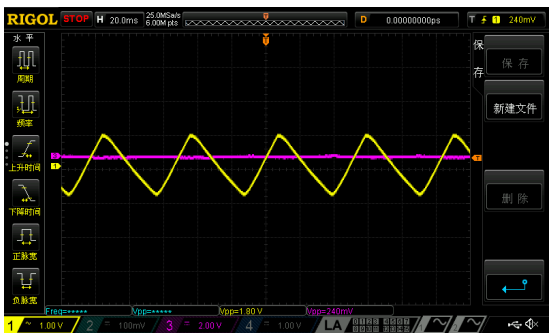


图 24: 水平磁场 0.106A, 垂直磁场 0.041A, 同向, 幅值偏小

2.2.5 (e) 部分结果

扫场与地磁场反向

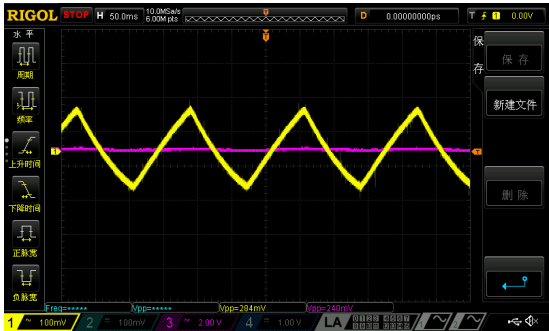


图 25: 水平磁场 off, 电流 0.110A; 垂直磁场 off, 电流 0.165A

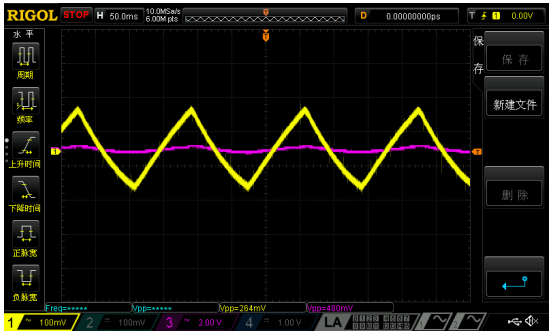


图 26: 水平磁场 off, 电流 0.119A; 垂直磁场 on, 电流 0.149A

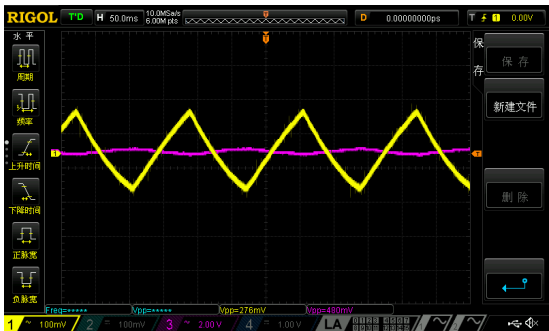


图 27: 水平磁场 on, 电流 0.018A; 垂直磁场 on, 电流 0.183A

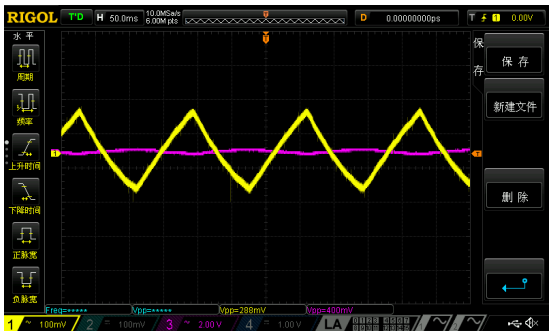


图 28: 水平磁场 on, 电流 0.084A; 垂直磁场 off, 电流 0.169A

扫场与地磁场同向

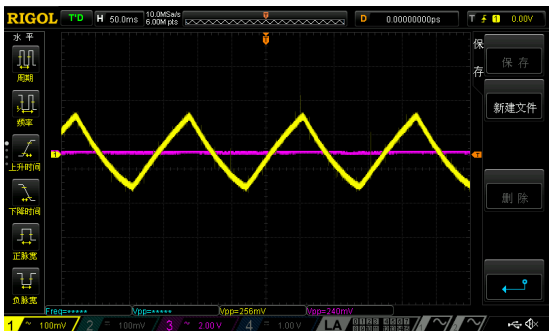


图 29: 水平磁场 off, 电流 0.049A; 垂直磁场 off, 电流 0.178A

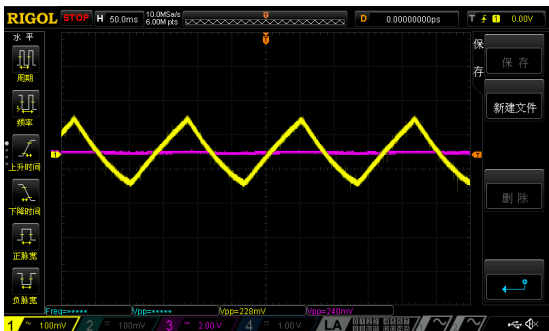


图 30: 水平磁场 off, 电流 0.074A; 垂直磁场 on, 电流 0.161A

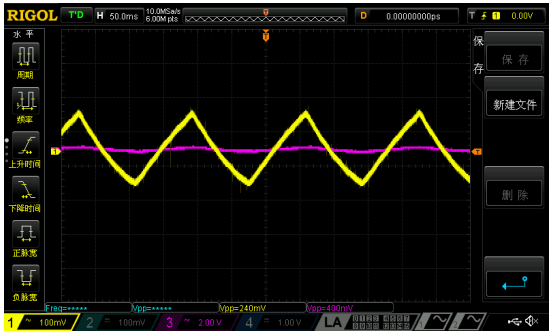


图 31: 水平磁场 on, 电流 0.056A; 垂直磁场 off, 电流 0.144A

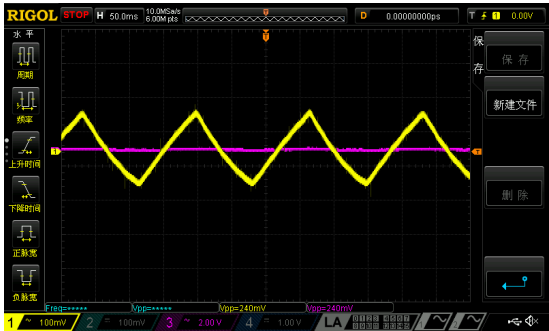


图 32: 水平磁场 on, 电流 0.165A; 垂直磁场 on, 电流 0.088A

幅值偏大和偏小



图 33: 水平磁场 off, 电流 0.063; 垂直磁场 on, 电流 0.044A; 扫场与地磁场反向, 幅值偏大



图 34: 水平磁场 off, 电流 0.063; 垂直磁场 on, 电流 0.044A; 扫场与地磁场反向, 幅值偏小

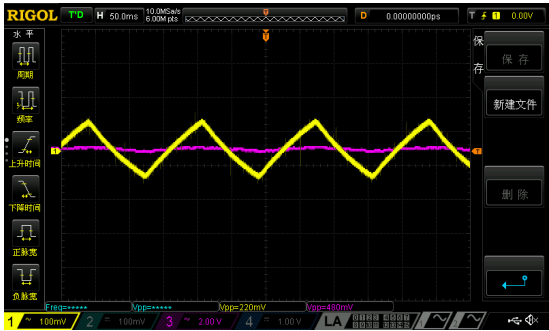


图 35: 水平磁场 off, 电流 0.063; 垂直磁场 on, 电流 0.044A; 扫场与地磁场同向, 幅值偏大

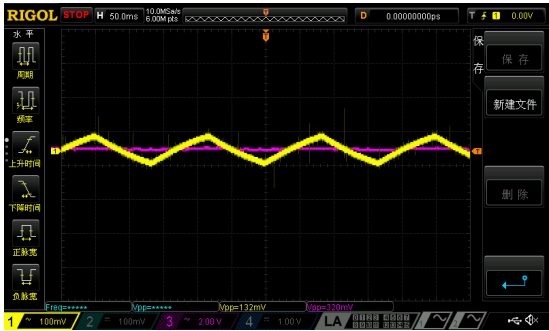


图 36: 水平磁场 off, 电流 0.063; 垂直磁场 on, 电流 0.044A; 扫场与地磁场同向, 幅值偏小

2.2.6 相关分析讨论

在本实验中，通过调节各类磁场及实验参数，发现不同条件对光抽运信号的影响如下：

- ▶ 扫场与地磁场同向时，能级分裂在原扫场上叠加地磁场后进一步加大，扫场调节过程中零磁场点偏移；光抽运信号仍能观察到，但中心偏离零点；如果未进行磁补偿，可能导致信号不对称或展宽。扫场与地磁场反向时，扫场与地磁场相互抵消，在某一时刻可能恰好出现零磁场点；如果设置合理，此时可观察到对称、明显的双峰结构信号；光抽运效果更显著，有利于研究磁场对抽运过程的影响。
- ▶ 水平方向磁场的变化对光抽运信号的影响主要体现在是否有信号以及信号是否对称。当水平磁场刚好抵消地磁场的水平分量时，光抽运信号应当在一个扫场周期内出现两次，且是等间隔的；若没有抵消，则两次信号将不会等间隔出现。
- ▶ 垂直方向的磁场对光抽运影响极大，当垂直磁场为零时（完全抵消地磁场垂直分量），光抽运信号最强、最清晰，且圆偏振光传播方向与量子化轴一致，抽运效率高。当垂直磁场不为零时，会导致量子化轴偏斜，原子“看到”的偏振变成非纯净圆偏振；会造成抽运方向混乱、跃迁通道混合，信号减弱甚至消失。

于是，我们发现要获得最佳光抽运信号的条件包括以下几点：

- ▶ 地磁场的垂直分量会偏转原子的量子化轴，使得激光偏振不再是纯粹的 σ^+ ，从而破坏了光抽运的选择性激发过程，降低抽运效率和光抽运信号强度。使用垂直方向的亥姆霍兹线圈精确抵消地磁垂直分量后，系统的偏振条件最优化，抽运效率最高，信号最强。
- ▶ 当扫场磁场方向与地磁场一致，且扫场幅度控制在合适范围内（能够使能级从简并到分裂并再次简并），可以形成稳定的抽运与去极化过程，信号清晰对称、幅值最大。
- ▶ 方波扫场有利于观察明显的抽运变化，而三角波扫场则提供更平滑的信号曲线。
- ▶ 外接扫场方式可精确控制扫场波形，有利于高质量信号的提取；扫描速度较慢时，可观察到更清晰的信号结构，有助于定量分析；扫描速度过快时，因铷原子抽运过程存在响应时间，信号展宽或减弱；幅度过小时磁场变化不足，无法形成完整的塞曼结构，信号不明显；

2.3 测量光抽运时间和弛豫时间

2.3.1 实验过程

采用外接方波扫场方式，当光抽运信号达到最大时，改变信号发生器信号输出扫描速度，通过直接或拟合方式测出 τ_1 和 τ_2 。

扫描速度过快能否准确测出弛豫时间？

在光泵磁共振实验中，扫描速度过快会导致无法准确测量弛豫时间，主要原因在于磁场变化的时间尺度与原子系统的响应时间不匹配。弛豫时间包括描述纵向恢复过程的 τ_1 和横向退相干过程的 τ_2 ：对于 τ_2 而言，过快的扫描会使系统未完成弛豫即受干扰，导致共振峰出现展宽、功率加宽或峰值偏移等失真现象；对于 τ_1 的测量，快速扫描会使透射光信号无法完整反映光抽运的建立/恢复过程，造成测量值 τ_1^{meas} 显著小于真实值 τ_1^{true} 。为确

保测量精度，建议将扫描周期 T 设置为至少 5 倍 τ_1 ，使系统有充分时间完成弛豫过程。

2.3.2 数据处理

测量两种弛豫时间 τ_1 和 τ_2 的方法如下：

- 1. τ_1 ：通过分析信号的时域衰减曲线，定位相邻的峰值（peak）和谷值（valley），计算两者之间的时间间隔。
- 2. τ_2 ：对信号衰减段进行指数函数拟合，模型为 $A(t) = A_0e^{-Bt} + C$ 。通过最小二乘法优化拟合参数，取 $\tau_2 = 1/B$ 。
- 3. 直接从示波器导出的数据是使用单位时间（unit time）做单位的，需要用采样率（1000Sa/s）进行修正。

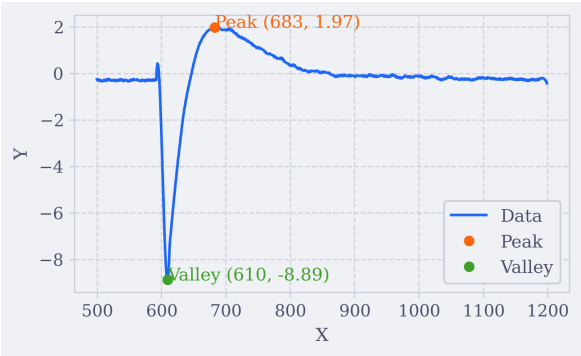


图 37：弛豫时间峰谷

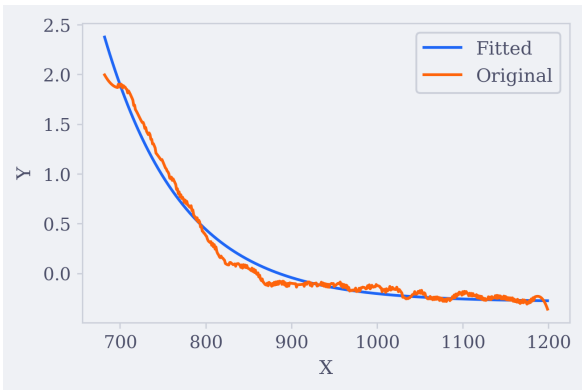


图 38：指数函数拟合

表 2：指数拟合系数与时间常数测量结果

指数系数 $B \text{ (unit time)}^{-1}$	$\tau_1 \text{ (s)}$	$\tau_2 \text{ (s)}$	频率 (mHz)
0.015 75	7.90×10^{-2}	6.35×10^{-2}	500
0.013 87	6.90×10^{-2}	7.21×10^{-2}	600
0.014 72	7.50×10^{-2}	6.79×10^{-2}	700
0.010 99	7.30×10^{-2}	9.10×10^{-2}	800
0.013 94	7.00×10^{-2}	7.17×10^{-2}	900
0.014 77	8.00×10^{-2}	6.77×10^{-2}	1000
均值	7.43×10^{-2}	7.23×10^{-2}	—
标准差	4.55×10^{-3}	9.67×10^{-3}	—

最终结果如下：

$$\tau_1 = 7.43 \times 10^{-2} \pm 4.55 \times 10^{-3}\text{s}$$

$$\tau_2 = 7.23 \times 10^{-2} \pm 9.67 \times 10^{-3} \text{s}$$

2.3.3 误差分析

1. 采样误差: 实验数据是离散采样的, 测量出的值可能与真实值有一定偏差, 并且对于仪器本身给出的采样率, 需要进行修正。
2. 信号噪声: 噪声对于实验结果的影响直接体现在无法确定一个渐近线的值, 在使用指数拟合之前, 我们尝试了其他寻找 τ_2 的方法, 但是由于信号存在波动, 无法找到一个准确的值, 最终选择了指数函数拟合。

2.4 测量 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的 g_F 因子

2.4.1 实验过程

观察磁共振信号, 并测量 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 基态超精细结构 g_F 因子。

实验采用三角波信号作为水平扫场信号。在水平磁场线圈中通入特定强度的电流 I , 同时在垂直方向施加射频磁场。首先调整水平线圈产生的磁场方向, 使其与扫场信号及地磁场的水平分量方向一致。

通过逐步增大射频场的频率, 可以观测到核磁共振现象。对于每一个给定的电流值 I , 系统会呈现两个明显的共振峰: 较低频率 ν_1 对应于 ^{85}Rb 原子的共振, 较高频率 ν_2 则对应于 ^{87}Rb 原子的共振。记录这些特征频率与对应电流的关系。

随后, 将水平磁场方向反转, 重复上述测量过程, 获取反向磁场条件下 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的共振频率 ν_1 和 ν_2 随电流 I 变化的实验数据。

2.4.2 数据分析

B_0 由如下公式计算:

$$B_0 = \frac{16\pi}{5^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{NI}{r} \times 10^{-7} (\text{T})$$

根据水平方向的总磁场:

$$B = B_0 + B_{E_{\parallel}} + B_S$$

调节水平磁场与其他两水平分量同向时:

$$h\nu_1 = g_F \mu_B (B_0 + B_{E_{\parallel}} + B_S)$$

调节水平磁场与其他两水平分量反向时:

$$h\nu_2 = g_F \mu_B (B_0 - B_{E_{\parallel}} - B_S)$$

最终得出如下关系：

$$g_F = \frac{h}{\mu_B \cdot B_0} \cdot \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$$

测量相关数据如表3所示，根据数据对 g_F 进行拟合，得出如图39和图40的拟合结果。

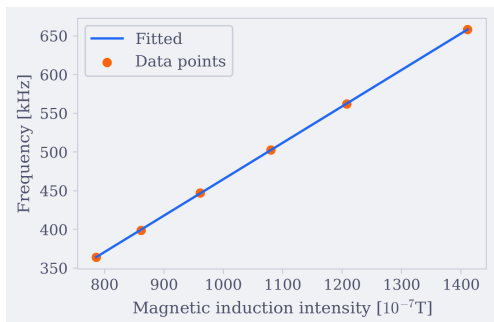


图 39: ^{85}Rb 拟合曲线

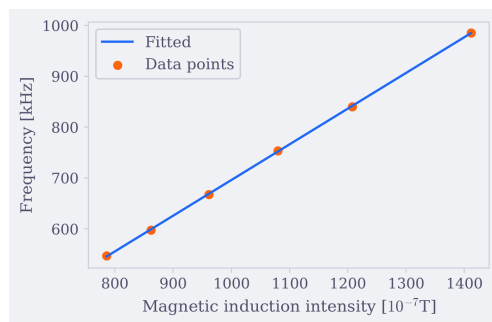


图 40: ^{87}Rb 拟合曲线

表 3: 水平磁场线圈电流与共振频率

电流 I/A	$B_0/\text{GS} (\times 10^{-4})$	$\nu_1^{87}(\text{kHz})$	$\nu_1^{85}(\text{kHz})$	$\nu_2^{87}(\text{kHz})$	$\nu_2^{85}(\text{kHz})$	$\frac{\nu_1^{87} + \nu_2^{87}}{2}(\text{kHz})$	$\frac{\nu_1^{85} + \nu_2^{85}}{2}(\text{kHz})$
0.298	1.3829	782	523	1188	793	985.0	658.0
0.255	1.1834	634	423	1046	701	840.0	562.0
0.228	1.0581	550	367	956	638	753.0	502.5
0.203	0.9421	461	309	874	585	667.5	447.0
0.182	0.8446	393	261	802	536	597.5	398.5
0.166	0.7704	340	227	753	501	546.5	364.0

最终根据拟合结果给出，实验测得铷原子朗德 g 因子数据如下：

► ^{85}Rb 测量值： $g_F = 0.3433 \pm 0.0009$

► ^{87}Rb 测量值： $g_F = 0.5121 \pm 0.0019$

如何区分 ν^{85} 和 ν^{87}

通过朗德 g 因子公式：

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

由于 ^{87}Rb 的核自旋 $I = 3/2$ 而 ^{85}Rb 的 $I = 5/2$ ，计算可得：

$$g_F^{87} > g_F^{85}$$

根据共振频率公式：

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

显然有：

$$\nu^{87} > \nu^{85}$$

磁共振信号与光抽运信号的区别？

(1) 能量来源不同

- ▶ 光抽运信号：能量来源于光能（如圆偏振光）
- ▶ 磁共振信号：能量来源于射频场电磁能 $E_{\text{rf}} = h\nu$ 和磁场能 $E_B = \mu_B B_0$

(2) 实验条件不同

- ▶ 光抽运信号：扫场速度需匹配原子弛豫时间 τ ($\Delta t \sim \tau$)
- ▶ 磁共振信号：射频频率需满足共振条件 $\nu = \frac{g_F \mu_B B_0}{h}$

(3) 信号特征不同

- ▶ 光抽运信号：
 - 呈现指数型曲线 $I(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau})$
 - 时间响应：慢变过程 ($\tau \sim 1 \text{ ms}$ 量级)
- ▶ 磁共振信号：
 - 呈现洛伦兹型共振峰 $\Delta I \propto \frac{1}{1 + (\nu - \nu_0)^2 T_2^2}$
 - 时间响应：瞬时响应 ($\Delta t \sim 1 \text{ } \mu\text{s}$ 量级)

2.4.3 误差分析

- ▶ ^{85}Rb 测量结果： $g_F = 0.3433 \pm 0.0009$ （理论值 0.3334）
- ▶ ^{87}Rb 测量结果： $g_F = 0.5121 \pm 0.0019$ （理论值 0.4998）

$$^{85}\text{Rb} \text{ 相对误差} = \left| \frac{0.3433 - 0.3334}{0.3334} \right| \times 100\% \approx 2.97\%$$

$$^{87}\text{Rb} \text{ 相对误差} = \left| \frac{0.5121 - 0.4998}{0.4998} \right| \times 100\% \approx 2.46\%$$

误差来源分析：

1. **磁场相关误差：**线圈几何参数的制造公差，电流测量设备的系统偏差，磁场空间分布的不均匀效应。
2. **频率控制误差：**射频信号源的频率调节精度限制，参考时钟的长期稳定性问题。

- 3. 电磁环境干扰：实验室背景电磁噪声污染，仪器间电磁耦合导致的信号失真。
- 4. 光学系统误差：偏振光学元件的安装对准偏差，环境磁场补偿的残余分量。
- 5. 温度效应误差：吸收池温度波动引起的信号漂移，温度敏感的系统响应特性变化

2.5 利用光泵磁共振方法测量地磁场

2.5.1 地磁场垂直分量 $B_{E\perp}$ 的测量

扫场信号使用方波信号，让垂直磁场与地磁场垂直分量方向相反，调节垂直线圈直流电流，改变垂直磁场大小，使得抽运信号幅度最大，此时的垂直磁场大小即为 $B_{E\perp}$ 。

调节过程中，记录下不同垂直线圈电流 I_{\perp} 及对应的抽运信号幅度 V_{pp} 如下表：

表 4: 垂直线圈电流与抽运信号幅度关系

I_z (A)	0.013	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.041	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065
$signal_z$ (V)	2.00	2.12	2.28	2.38	2.54	2.90	2.92	2.64	2.42	2.29	2.11	2.05

为获取信号最大时对应的电流值，对实验数据进行洛伦兹函数拟合，拟合函数形式为：

$$\text{Lorentzian}(x; A, x_0, \gamma, B) = A \cdot \frac{\gamma^2}{(x - x_0)^2 + \gamma^2} + B$$

拟合结果参数如下：

- ▶ 振幅 $A = 0.9086$ V
- ▶ 中心位置 $x_0 = 0.0406 \pm 0.0005$ A
- ▶ 半高宽 $\gamma = 0.0091$ A
- ▶ 基线偏移 $B = 1.9682$ V
- ▶ 决定系数 $R^2 = 0.971469$

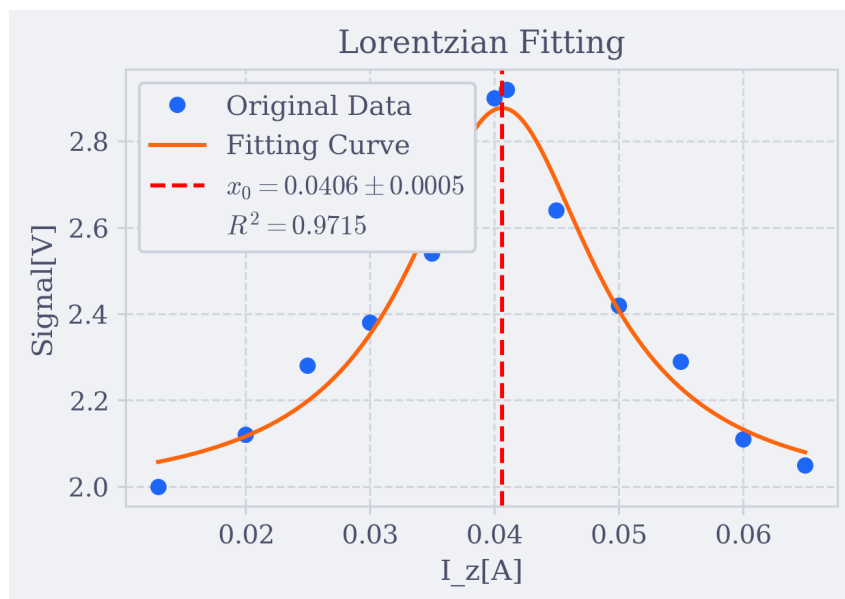


图 41: 拟合曲线

记录下光抽运信号最大时，垂直线圈的电流为0.0406 A，且两个垂直磁场线圈是串联的，数字表的电流是流过单个线圈的电流，电流需要乘 2。根据公式：

$$B = \frac{16\pi NI \times 10^{-7}}{5^{\frac{3}{2}} \cdot r} (\text{T})$$

计算可得：

$$B_{E\perp} = 2.388\,567 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 3.054\,210 \times 10^{-7} \text{ T}$$

2.5.2 地磁场水平分量 $B_{E\parallel}$ 的测量

地磁场水平分量的测量方法：

根据水平方向的总磁场：

$$B = B_0 + B_{E\parallel} + B_S$$

调节扫场与其他两水平分量同向时：

$$h\nu_1 = g_F\mu_B(B_0 + B_{E\parallel} + B_S)$$

调节扫场磁场与其他两水平分量反向时：

$$h\nu_2 = g_F\mu_B(B_0 + B_{E\parallel} - B_S)$$

最终得出如下关系：

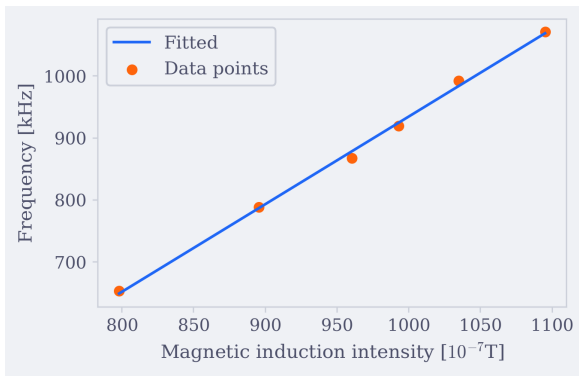
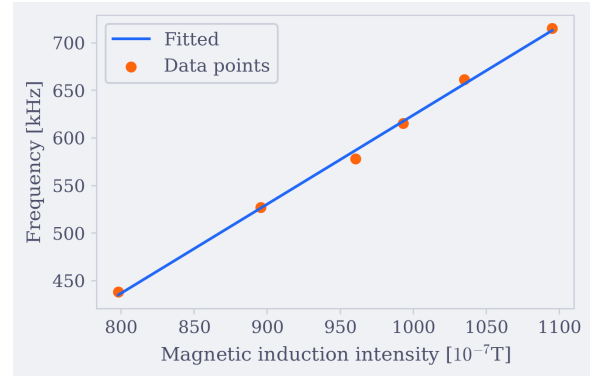
$$B_{E\parallel} = \frac{h}{g_F\mu_B} \cdot \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} - B_0$$

测量相关数据如表5所示，根据数据进行拟合，得出如图42和图43的拟合结果。

对两组数据分别进行线性回归：

表 5: 地磁场水平分量测量, 水平磁场线圈电流与共振频率数据

水平磁场电流 (A)	ν_1^{87} (kHz)	ν_1^{85} (kHz)	ν_2^{87} (kHz)	ν_2^{85} (kHz)
0.172	362	242	291	196
0.193	358	239	430	288
0.207	473	315	394	263
0.214	421	282	498	333
0.223	532	355	460	306
0.236	498	333	573	382

图 42: ^{87}Rb 拟合曲线图 43: ^{85}Rb 拟合曲线

► ^{87}Rb 拟合结果计算得出: $B_{87} = 3.463\,236 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 2.530\,420 \times 10^{-6} \text{ T}$

► ^{85}Rb 拟合结果计算得出: $B_{85} = 3.404\,010 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 2.610\,477 \times 10^{-6} \text{ T}$

取两组测量结果的平均值:

$$B_{xy} = \frac{B_{87} + B_{85}}{2} = 3.433\,623 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 1.817\,802 \times 10^{-6} \text{ T}$$

2.5.3 地磁场测量结果

► 水平分量: $B_{xy} = 3.433\,623 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 1.817\,802 \times 10^{-6} \text{ T}$ (取 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 平均值)

► 垂直分量: $B_z = 2.388\,567 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 3.054\,210 \times 10^{-7} \text{ T}$ (由拟合结果电流 0.0406 A 计算)

► 总磁场强度: $B_{\text{earth}} = \sqrt{B_{xy}^2 + B_z^2} = 4.182\,705 \times 10^{-5} \text{ T} \pm 1.502\,409 \times 10^{-6} \text{ T}$

► 地磁倾角: $\theta = \arctan\left(\frac{B_z}{B_{xy}}\right) = 34.82^\circ \pm 1.46^\circ$

标准参考值为:

► 总磁场强度: $B_{\text{ref}} = 45\,595.2 \text{ nT} = 45.5952 \text{ mT}$

► 地磁倾角: $\theta_{\text{ref}} = 33^\circ 58' \approx 33.9667^\circ$

误差分析:

$$\text{磁感应强度相对误差} = \left| \frac{41.8127 - 45.5952}{45.5952} \right| \times 100\% \approx 8.30\%$$

$$\text{倾角相对误差} = \left| \frac{34.82 - 33.9667}{33.9667} \right| \times 100\% \approx 2.51\%$$

误差来源分析:

1. 水平分量测量中 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的 1.7% 差异
2. 垂直方向电流 0.0406 A 的标定误差
3. 线圈半径 $r = 0.1530\text{ m}$ 的制造公差

2.6 研究不同偏振态的光对光抽运信号强度的影响

2.6.1 1/4 波片对光束偏振态的调制机理

实验中采用 $D1\sigma^+$ 偏振光作为入射光, 其作用是将铷原子抽运到基态 $5^2S_{1/2}$ 超精细结构的 $F = 2, m_F = +2$ 塞曼子能级上。1/4 波片在快慢轴间引入 $\pi/2$ 相位延迟, 其琼斯矩阵表示为:

$$\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta) = \mathbf{R}^T(\theta) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + i \sin^2 \theta & (1-i) \sin \theta \cos \theta \\ (1-i) \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta + i \cos^2 \theta \end{pmatrix}$$

对于初始线偏振光 $\mathbf{E}_i = E_0 \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}$, 出射光场为:

$$\mathbf{E}_o = \mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta) \mathbf{E}_i = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta - \alpha) \cos \theta + i \sin(\theta - \alpha) \sin \theta \\ \cos(\theta - \alpha) \sin \theta - i \sin(\theta - \alpha) \cos \theta \end{pmatrix}$$

当 $\theta - \alpha = 45^\circ$ 时, 出射光满足 $|E_{ox}| = |E_{oy}|$ 且相位差 $\Delta\phi = \pi/2$, 形成完美圆偏振光:

$$\mathbf{E}_o|_{\theta=45^\circ} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad (\text{右旋圆偏振})$$

信号强度与角度的关系为:

$$S(\theta) = S_{\text{max}} \left| \frac{E_{ox} - iE_{oy}}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{S_{\text{max}}}{2} [1 + \sin(4\theta)]$$

► 典型角度下的偏振态:

$$\theta = 0^\circ: \quad \mathbf{E}_o = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{x 方向线偏振})$$

$$\theta = 45^\circ : \quad \mathbf{E}_o = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad (\text{右旋圆偏振})$$
$$\theta = 22.5^\circ : \quad \mathbf{E}_o = E_0 \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{8} \\ i \sin \frac{\pi}{8} \end{pmatrix} \quad (\text{椭圆偏振})$$

2.6.2 测量结果与拟合分析

测量得出如下数据：

表 6: 角度-信号强度对应关系测量数据（双周期对比）

周期 1		周期 1		周期 2		周期 2	
角度/°	信号强度/V	角度/°	信号强度/V	角度/°	信号强度/V	角度/°	信号强度/V
0	1.26	180	0.90	345	2.90	165	2.58
15	2.10	195	1.98	330	2.58	150	3.12
30	2.26	210	2.58	315	1.50	135	2.52
45	1.58	225	1.94	300	0.30	120	1.14
60	0.32	240	0.58	285	0.32	105	0.18
75	0.14	255	0.10	270	1.82	90	0.60
90	1.20	270	0.82	255	2.90	75	2.42
105	2.50	285	2.10	240	2.82	60	3.28
120	2.56	300	2.58	225	1.74	45	2.70
135	1.84	315	2.18	210	0.94	30	1.52
150	0.46	330	0.74	195	0.26	15	0.20
165	0.10	345	0.20	180	0.70	0	0.42
		360	1.28				

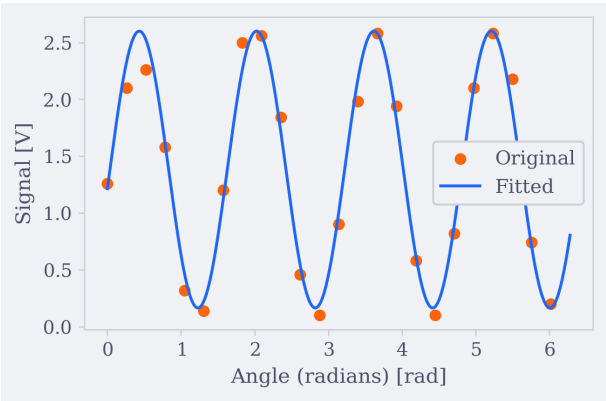


图 44: 拟合曲线

拟合参数

$$A = 1.217590 \pm 0.049880$$
$$\omega = 3.943445 \pm 0.020722$$

$$\phi = -0.138968 \pm 0.075250$$

$$C = 1.382204 \pm 0.034878$$

相关系数为 $R^2 = 0.966049$ ，拟合效果很好，结合图像来看，振幅随角度的变化整体上符合理论预期。误差来源主要为光学器件转动角度的读取精度不高，读数不够精确，此外信号噪声同样会对读数结果产生影响。

2.6.3 分析讨论

在本实验中，我们测量了不同角度下 1/4 波片调制出的偏振光对铷原子光抽运信号的影响。通过对比两周期内的信号强度变化，可以明显观察到随波片角度变化，抽运信号呈现明显的周期性波动，这与偏振态的变化规律密切相关。

1. 由表 6 可知，信号强度形成一个 90° 为周期的波动规律；而 1/4 波片对线偏振光的调制效果为：每旋转 180° ，输出偏振态经历一次完整变化 ($\sigma^+ \rightarrow$ 线偏振 $\rightarrow \sigma^- \rightarrow$ 线偏振 $\rightarrow \sigma^+$)。说明在光抽运信号强度上， σ^+ 与 σ^- 并无明显差异。
2. 而每 90° 一个周期会出现一次信号强度最小值，与线偏振光出现的频率相符，说明线偏振光无法持续积累定向态，几乎无法形成抽运信号。



实验后思考题

Reflection Question 3.1:

1. 理论分析如何利用偏振片和 $1/4$ 波片获得圆偏振光？在改变入射光偏振状态的过程中，如何判断入射光接近圆偏振光？

要产生圆偏振光，需要使线偏振光的偏振方向与 $1/4$ 波片光轴成 45° 角。此时 o 光和 e 光振幅相等且产生 $\pi/2$ 相位差，合成后形成圆偏振光。当夹角为 0° 或 90° 时，出射光仍为线偏振光；其他角度则产生椭圆偏振光。

判断圆偏振光可通过光抽运效应实现。圆偏振光 (σ^+ 或 σ^-) 会将原子抽运到特定磁子能级 (如 $m_F = +2$)，产生最强抽运信号。线偏振光因 σ^+ 和 σ^- 成分抵消而信号最弱，椭圆偏振光信号强度介于两者之间。当检测到最大抽运信号时，即可确认入射光接近圆偏振态。

Reflection Question 3.2:

2. 能否利用 D2 σ^+ 光对铷进行光抽运？为什么？

D2 线 ($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$) 不适合高效光抽运。这是因为 $5^2P_{3/2}$ 激发态的 $J = 3/2$ 导致其有四个超精细能级，原子在自发辐射时会以非均匀分支比返回多个基态子能级，破坏偏极化效果。

相比之下，D1 线 ($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$) 因其 $J = 1/2$ 特性，仅有两个超精细能级 ($F' = I \pm 1/2$)，使用 σ^+ 光时原子可被有效抽运到 $m_F = +2$ 能级。D2 线的复杂跃迁路径会导致部分原子返回低 m_F 态，显著削弱光抽运效率。

Reflection Question 3.3:

3. 当垂直磁场方向不为零且扫场不过零，能否观察到光抽运信号？在这种条件下，试分析示波器显示的光吸收信号形成原因。

即使存在非零垂直磁场且扫场不过零，仍可能观测到光抽运信号，但信号强度会减弱且形态异常。这是因为残余磁场分量会改变塞曼能级分裂方式，影响原子的抽运和弛豫过程。

示波器显示的光吸收信号主要来源于两个机制：一是静态塞曼分裂导致部分能级仍可发生选择定则允许的跃迁；二是扫场分量使系统产生非平衡态布居。当垂直磁场较小时，可能观察到畸变的光抽运曲线；若磁场过强，则可能仅检测到恒定吸收背景或杂乱波动。

Reflection Question 3.4:

4. 实现塞曼能级间的磁共振条件是什么？如何区别磁共振信号与光抽运信号？

磁共振需要满足能量匹配条件 $\Delta E = h\nu$ ，即射频光子能量等于塞曼能级间距。对于 ^{87}Rb 原子，当外加磁场 B 使塞曼分裂 $\Delta E = g_F \mu_B B$ 与射频频率 ν 匹配时即发生共振。

区分两类信号：磁共振信号是射频诱导的能级跃迁，表现为尖锐的共振峰，与磁场过零点无关；而光抽运信号是磁场过零时原子布居数重新分布的结果，呈现先下降后恢复的缓变曲线。