

# 磁场量子精密测量

廖荣

中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026

合肥国家实验室, 合肥 230088

## 1 实验目的

- 复习碱金属原子的能级结构。
- 理解光泵浦原理和基于法拉第效应的光探测原理。
- 理解 SERF 效应及其实验观测条件, 掌握 SERF 效应的实验观测方法。
- 在 SERF 效应下测量不同大小磁场下碱金属原子进动频率与弛豫时间的变化。
- 掌握 SERF 磁力计的组成结构和实验调节方法, 将实验装置的灵敏度调节到最佳状态。
- 理解灵敏度测量步骤, 测量出 SERF 磁力计的灵敏度谱图、计算出磁力计带宽等参数。

## 2 实验原理

详见预习报告。

## 3 实验装置

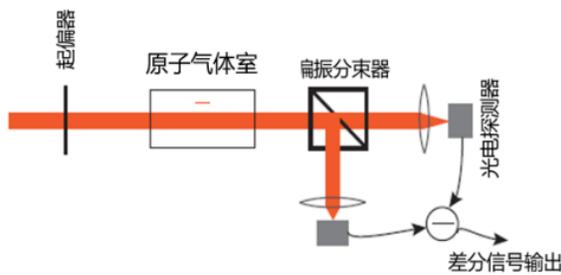


图 1: 实验装置图

本实验中搭建的 SERF 高灵敏度原子磁力计基于前文提到的正交泵浦光-探测光方式, 默认 z 方向为泵浦方向, x 方向为探测方向, 使用  $87\text{Rb}$  原子作为工作气体。原子气体室通过高频交流电加热, 置于坡莫合金磁屏蔽桶内部, 并有三轴线圈控制内

部磁场环境; 泵浦光使用与铷 D1 线共振的圆偏光, 探测光使用铷 D2 线附近的线偏光; 使用平衡探测的方式进行旋转角探测, 两探测器的差分信号通过采集卡录入电脑中进行数据处理。

## 4 实验内容和结果

### 4.1 调整探测光至初始工作状态

首先扫描吸收谱, 得到工作点为  $1796.0573\Omega$ 。

### 4.2 优化灵敏度

得到电流为  $1.5\text{mA}$ , 温度为  $157^\circ\text{C}$  时灵敏度最高, 为  $38.5242\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

### 4.3 测出灵敏度谱, 拟合得出磁力计带宽

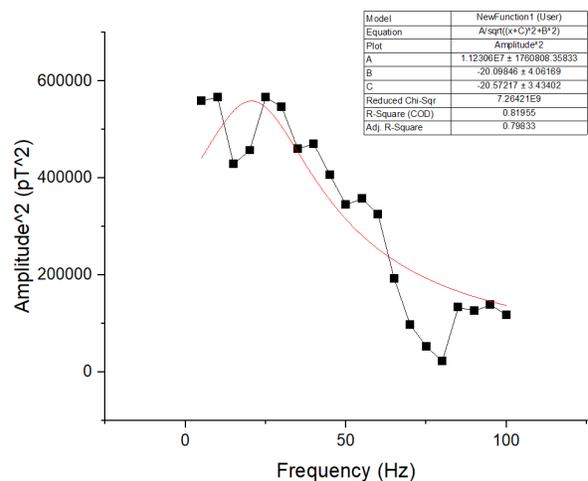


图 2: 磁力计带宽

带宽为  $20\text{Hz}$  左右。

## 5 思考题

### 5.1 碱金属原子磁力计使用何种碱金属作为研究体系能达到最高测磁灵敏度？为什么？各个碱金属的优势与劣势各是什么？

使用 Cs 可以达到最高的测磁灵敏度。因为原子序数大的原子自旋交换效应强。劣势是自旋破坏效应也相应到强。原子序数小的原子自旋交换效应弱且自旋破坏效应也相应的弱。

### 5.2 $^{87}\text{Rb}$ 原子两个超精细结构对应的塞曼能级能量大小为何一个与 $m_F$ 正相关，一个与 $m_F$ 负相关。

带入  $F = I + S$

$$g_F \approx g_S \frac{F(F+1) - I(I+1) + S(S+1)}{2F(F+1)} \quad (1)$$

$$= \pm g_S \frac{S}{F}$$

### 5.3 在光泵浦过程中，不加猝灭气体是否可以完成极化？能否用与铷原子 D2 线共振的激光进行泵浦？为什么？

不可以，与墙壁相互作用和碰撞会引发能级的移动以及退相干，淬灭气体可以减少此效应。此外，碰撞会引发自旋交换效应，会使极化率不高。此外，淬灭气体可以吸收自发辐射光子防止极化到破坏。

$5^2P_{3/2}$  到  $5^2S_{1/2}$  跃迁产生的谱线称为 D2 线，因在激发态  $5^2P_{3/2}$  中存在  $m_F = +3$  子能级，因此处于基态  $m_F = +2$  子能级上的粒子可以跃迁到激发态。故无法完成 pumping 过程。

### 5.4 原子固有进动频率 $\omega_0$ 与 SERF 态下的进动频率 $\omega_{SERF}$ 在极化度 $P=1$ 时是相等的，请分析原因

$P = 1, q = 4, g_S = 2$

$$\omega_{SERF} = \frac{g_S \mu_B B}{q \hbar} = \frac{\mu_B B}{2 \hbar} = \omega_0 \quad (2)$$

### 5.5 请给出另一种测量横向弛豫时间 T2 的方法。并与实验内容中给出的方法对比优劣势。

自旋回声技术 (spin-echo technique)。这种方法通过在施加一个  $\pi/2$  的脉冲将自旋方向翻转后，再施加一个  $\pi$  的脉冲，使自旋重新恢复到与初始状态相反的方向。在一段时间后，再通过一个  $\pi/2$  的脉冲来反转自旋方向，这样就会产生自旋回声信号。通过测量每一个自旋回声信号的衰减情况，可以得到自旋体系的横向弛豫时间 T2。

自旋回声技术的优势在于它可以消除一些不可控的因素，例如外界磁场的均匀性或原子间的相互作用，从而得到更准确的横向弛豫时间。此外，自旋回声技术也更容易操作和实现，不需要复杂的调制光源或磁场强度的调节。

### 5.6 通常情况下一台原子磁力仪各种弛豫大小是无法改变的，只能改变泵浦光泵浦速率 R 的大小。假设磁场方向为 y 方向，试结合 Bloch 方程的准静态解，确定泵浦方向极化率 $P_z$ 多大时，原子磁力仪的灵敏度模拟值 $\frac{P_x}{\Omega_y}$ 最大

$$P_z = 1$$

### 5.7 为何在平衡探测中要将初始的探测器的差分值至调零附近？如果初始值不是零是否可以完成探测？

因为要保证两路光强一致。可以完成探测。

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \sin^2 \left( \theta - \frac{\pi}{4} \right) \\ I_2 = I_0 \cos^2 \left( \theta - \frac{\pi}{4} \right) \end{cases}$$

图 3: 平衡探测两路光电流

两个式子相除算出  $\theta$ 。

**5.8 实验原理中已确定灵敏度表达式  $Sensitivity = B/SNR \times \sqrt{\tau}$ ，那么原子磁力仪的灵敏度大小是否受到实验中采样频率  $\sqrt{\tau}$  的影响呢？为什么**

灵敏度受采样频率影响，但这种影响与器件和仪器无关。积分时间如果过长可能会有其他低频噪

声介入，实际测量精度不能无限提高。

**5.9 屏蔽筒和雪弗板为何使用黑色？**

吸收外界光，避免光子进入样品池造成噪声。