

復旦大學

实验报告

姓名 尹翔 专业 物理 年级 10300290009 组 B12 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录:

光泵磁共振实验

[实验目的]

1. 了解实验原理, 包括光抽运技术及磁共振技术, 体会整套实验原理的精妙, 并测量地磁场的水平分量.
2. 了解 Rb 原子内部的精细与超精细结构, 通过光泵磁共振测 ^{85}Rb 与 ^{87}Rb 的 g_F 因子, 与理论值作比较.

[实验原理]

1. Rb 原子的基态与第一激发态的能级

Rb 是一价碱金属, 基态 $5^2S_{1/2}$, 最低激发态 $5^2P_{1/2}$, $5^2P_{3/2}$ 双重态

* 碱金属双线: D_1 : 794.76 nm ($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$)

D_2 : 780.00 nm ($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$)

* 精细结构 L-S (轨道-自旋) 耦合

$$\begin{cases} \vec{\mu}_J = -g_J \frac{e}{2m} \vec{P}_J \\ g_J = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \end{cases}$$

$$J = |L-S|, \dots, L+S$$

\vec{P}_J : 电子总角动量

g_J : 朗德因子, 反映物质内部运动的重要物理量

* 超精细结构 I-J 耦合 (电子-核)

$$\begin{cases} \vec{\mu}_F = -g_F \frac{e}{2m} \vec{P}_F \\ g_F = g_J \left(\frac{1}{2} + \frac{J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} \right) \end{cases}$$

$$F = |I-J|, \dots, I+J$$

復旦大學

实验报告

姓名 _____ 专业 _____ 年级 _____ 班 _____ 组 _____ 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录:

由于 Rb 元素在自然界有两种同位素，核磁矩 I 不同

^{87}Rb (27.85%) ^{85}Rb (72.15%)

$$I = 3/2$$

$$I = 5/2$$

* Zeeman 分裂

加上磁场(弱,不至于破坏 I - J 耦合), 沿磁场方向每一超精细能级裂成 $(2F+1)$ 个能级, 两超精细能级间能量级差相等.

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

2. 光抽运效应.

用 ^{87}Rb 的 D_1 光 (左旋圆偏振光, 具有 \hbar 的角动量) 照射塞曼分裂后的 Rb 原子, 有选择定则:

$$\Delta L = \pm 1, \quad \Delta F = \pm 1, 0, \quad \Delta M_F = \pm 1$$

对此自发辐射(退激)的选择定则 $\Delta M_F = \pm 1, 0$

受激时 $M_F = +2$ 的跃迁几率为 0, 退激时有新的原子退回 $M_F = +2$, 从而 $M_F = +2$ 子能级上的粒子数大大增加, 实现了光抽运, 即偏极化.

3. 磁共振

在能级分裂方向再加一射频场 $B(\nu)$, 若满足

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

此时能级间发生共振跃迁, 偏极化率被破坏, 光抽运又重新使偏极化饱和, 实验上可以观测到透射光强减小(因为 Rb 蒸汽偏极化饱和被破坏, 又重新开始吸收 D_1 光), 直至达到新的平衡.

本实验采用扫场法, 固定 ν , 改变 B_0 , 得到射频场.

扫场是为了得到周期性变化的磁场所, 以使抽运/共振信号周期性地在探测器上.

復旦大學

实验报告

姓名 _____ 专业 _____ 年级 _____ 班 _____ 组 _____ 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录

本实验原理的核心:

1. 光轴透光同样作为探测光, 观察探测光(透射光)的强度变化可观察光轴透光和磁共振过程, 同时这也意味着信号功率的 $10^7 \sim 10^8$ 数量级的增强.
2. 通过充入缓冲气体延长偏振光的弛豫时间
3. 使超精细结构能级分裂的弱磁场与地磁场 10^{-5} mT 同数量级, 实验中必须谨慎处理地磁场影响, 当然这也意味着通过本实验过程可以精确测量地磁场大小.

[实验内容与装置]

1. 调整光路, 使光轴信号最大
2. 分别以方波、三角波扫场, 观察不同条件下的信号形状与幅度变化.
3. 加上射频场, 改变 ν 调出共振信号, 测量 R_b 的 ν , 与理论值相比较
4. 测量地磁场水平分量

实验装置:

DH807A 型光磁共振实验装置、信号发生器、IT4400 数字示波器

[实验结果]

1. 调整光路, 使光轴与地磁场方向平行, 旋转 $1/4$ 波片使出射圆偏振光 R_{\perp} 透光最大.
- 分别观察方波、三角波扫场在不同条件下的信号形状(包括扫场、垂直场、水平场的方向与大小)的变化.

復旦大學

实验报告

姓名 _____ 专业 _____ 年级 _____ 班 _____ 组 _____ 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录:

具体的波形变化参见实验记录本, 这里只总结结论:

1) 垂直场的作用是抵消地磁场的垂直分量, 使塞曼分裂方向与光轴垂直, 实验中测得 $I_{\perp} = -0.065A$ 时, 信号最大, 对应 $B_{\perp} = -0.0191 mT$, 可以认为是地磁场的垂直分量大小。

2) 水平方向上有 $\vec{B}_{总} = \vec{B}_{地||} + \vec{B}_{扫} + \vec{B}_{偏}$, 不管是调谐还是扫场, $\vec{B}_{扫}$ 方向与 $\vec{B}_{地||} + \vec{B}_{偏}$ 反向, 才能观察到较好的光抽运信号; $B_{偏}$ 越大, 偏极化饱和率越高。

张石南:
依据?

总之, 典型的光抽运信号必须在扫场的变化过程中历经 $B_{总} = 0$

饱和和反饱和, 使偏极化消除, 从而重新进行光抽运的。
和, 如何测饱和率?

2. 测量 R_b , R_b 的 g_F 因子

实验条件: 垂直线圈电流 $I_{\perp} = 0.065A$, 调谐扫场 $V_{pp} = 0.4V$, 射频场幅度很弱, 为正弦波。

实验数据如下:

水平电流 / A		0.250	0.350	0.449
共振峰 1	ν_1 / kHz	660	986	1316
	ν_2 / kHz	993	1318	1617
	$g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$	0.5000	0.4979	0.4991
共振峰 2	ν_1 / kHz	441	662	878
	ν_2 / kHz	658	880	1098
	$g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$	0.3324	0.3332	0.3328

復旦大學

实验报告

姓名 _____ 专业 _____ 年级 _____ 班 _____ 组 _____ 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录:

其中, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $M_B = 0.927 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$

$$B = \frac{16\pi}{5^{3/2}} \times \frac{N}{r} \times I \times 10^{-4} \text{ mT} \quad (N = 250 \text{ 匝}, r = 0.2379 \text{ m})$$

对于共振峰 1.

$$\bar{g}_F = \frac{0.5000 + 0.4979 + 0.4991}{3} = 0.499$$

对于共振峰 2.

$$\bar{g}_F = \frac{0.3324 + 0.3332 + 0.3328}{3} = 0.3328$$

根据理论推算, ^{87}Rb 的 $g_F = 1/2$, ^{85}Rb 的 $g_F = 1/3$

可见共振峰 1 即为 ^{87}Rb 共振峰, 实验测量值 $g_F(^{87}\text{Rb}) = 0.499$

$$\text{相对误差 } \eta_1 = \frac{1/2 - 0.499}{1/2} = 0.2\%$$

又, 共振峰 2 即为 ^{85}Rb 的共振峰, 测量值 $g_F(^{85}\text{Rb}) = 0.3328$

$$\text{相对误差 } \eta_2 = \frac{1/3 - 0.3328}{1/3} = 0.16\%$$

3. 测量地磁场的水平分量

概

实验条件: 垂直场线圈电流 $I = 0.065 \text{ A}$

扫场 (三角波) $V_{pp} = 0.4 \text{ V}$

射频场幅度弱, 正弦波.

分别测量几组不同共振峰在 B_0 , B_0 方向相反的频率 ν_1, ν_2 .

復旦大學

实验报告

姓名 _____ 专业 _____ 年级 _____ 班 _____ 组 _____ 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录:

水场电流/A		ν_1 / kHz	ν_2 / kHz	$B_{ii} = \frac{h}{m_0 g \mu_B} \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} / \text{mT}$	\bar{B}_{ii} / mT
0.396	87Rb	1821	1472	0.02494	
	85Rb	1215	982	0.02497	
0.396 0.300	87Rb	1505	1153	0.02515	0.02504
	85Rb	1001	772	0.02454	$\sigma(B_{ii}) / \text{mT}$
0.498	87Rb	2162	1804	0.02558	0.0003
	85Rb	1439	1205	0.02508	

故实验测得的地磁场水平分量

$$B_{ii} = (0.0250 \pm 0.0003) \text{mT}$$

[实验分析]

1. 从实验测量得到的两个磁能值的相对误差 $\eta(87\text{Rb}) = 0.2\%$, $\eta(85\text{Rb}) = 0.16\%$

可以体会到本实验过程的精度是很高的, 包括测量地磁场的水平分量

这只是统计不准确性, 表明可重复性.

$\sigma(B_{ii}) = 0.0003 \text{mT}$ 并可验证这一点,

但测量不准确性

不应由探测器

亦非由线圈

实验的过程中, 对于波形的分析, 只要从 $B_x = B_0 + B_{\text{扫}} + B_{\text{地}}$ 出发一般

都对波形进行合理解释。从上式也可以看出, 实验的误差来源可能是

线圈未与地磁场水平分量完全平行, 也许表达一种可能, 还是确实存在?

復旦大學

实验报告

姓名 _____ 专业 _____ 年级 _____ 班 _____ 组 _____ 日期 _____ 评阅人 _____

实验记录:

3. 本实验对光探测和信号放大部分尚欠缺深入研究,事实上,对于信号处理部分的未知,使得我们无奈对共振线宽进行粗略的把握,故本实验并没有测量共振峰的共振线宽。进一步的实验可以针对探测条件和信号处理条件做深入研究,包括光电池及放大器的电子学性质。

4. 实验中比较有趣的现象是所谓的“八峰八谷”,在共振频率 ν 的 $1/n$ 处(n 为整数)同样可以观察到共振波形,且 n 越大,波形幅度越小。多量子跃迁效应是比较合理的解释,当射频场强度较大时, 2π 相差的射频间可通过虚能级进行跃迁,只要仪器精度足够高,即能观察到这样高阶的多量子效应。

5. 具体实验讨论可参考实验记录本。

[实验结论]

通过光泵磁共振实验,测得了 ^{87}Rb , ^{85}Rb 的 g_F 因子分别为0.4990、0.3328,与理论值的相对误差为0.2%和0.16%,实验还测得地磁场水平分量为 $B_{||} = (0.0280 \pm 0.0003) \text{ mT}$ 。

以上两组实验充分体现了实验的精妙,及其在精细测量方面的良好应用。

参考文献:

95.

第5.1.