

^{85}Rb 灯对 ^{87}Rb 原子的光抽运

杨 丰 刘淑琴 董太乾

(北 京 大 学)

1983 年 4 月 22 日收到

提 要

本文对用 ^{85}Rb 灯不经滤光泡直接对 ^{87}Rb 吸收泡的光抽运作了观测, 得到了比传统的用 ^{87}Rb 灯经 ^{85}Rb 滤光泡对 ^{87}Rb 吸收泡进行光抽运更强的基态 $0-0$ 跃迁共振讯号. 并在一定温度下观察到负的共振讯号. 到目前为止, 还不能对这种负的共振讯号作出解释. 同时还测量了共振线宽和光频移. 对在 ^{87}Rb 原子频标中应用的可能性作了评述.

在 ^{87}Rb 原子频标中经常采用传统的光抽运方案: 用一个 ^{87}Rb 光谱灯经过 ^{85}Rb 滤光泡, 再对 ^{87}Rb 吸收泡进行光抽运^[1], 如图 1 所示. 它利用的原理为: ^{85}Rb 的 A 线与 ^{87}Rb

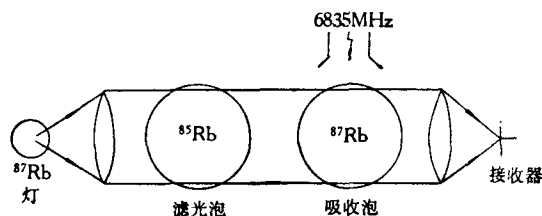


图 1 传统的光抽运方案

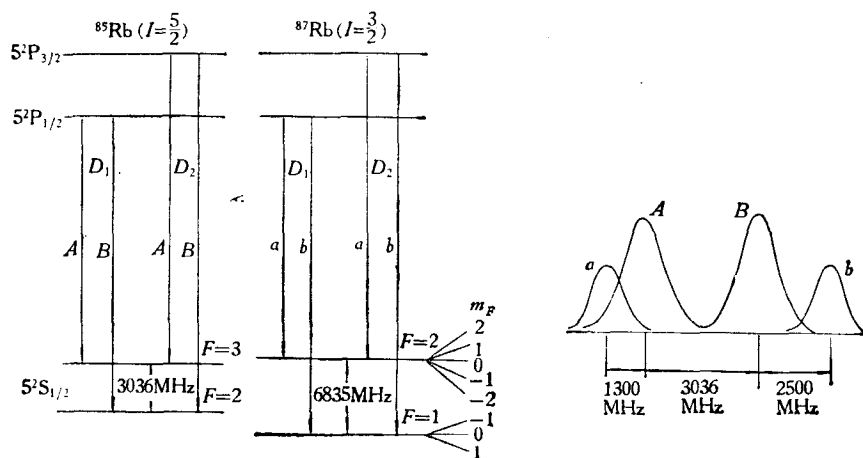
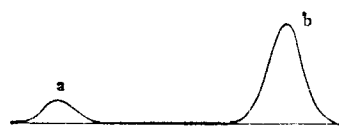
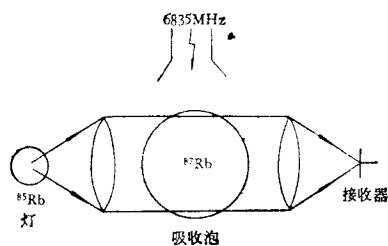
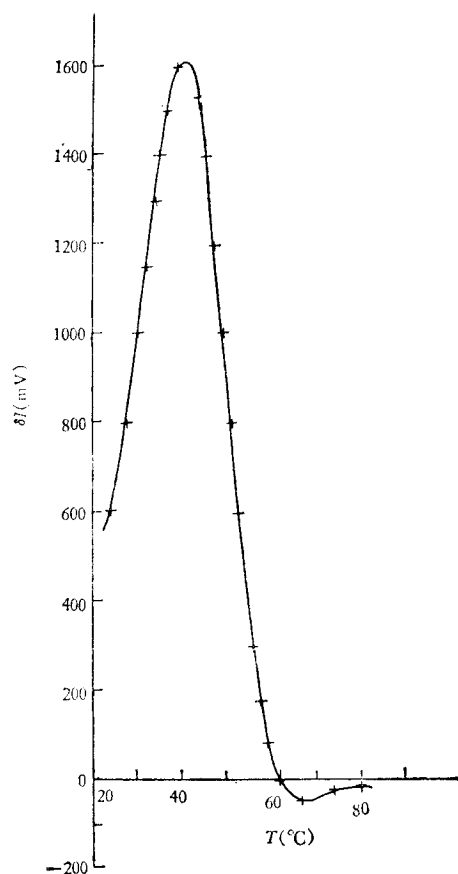


图 2 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的能级图和有关光谱线的相对位置

的 a 线离得较近, 而 B 线与 b 线离得较远, 如图 2 所示. 因而 ^{85}Rb 滤光泡能基本上滤掉 ^{87}Rb 灯发射的 a 线而剩下 b 线去抽运 ^{87}Rb 吸收泡中的原子, 如图 3 所示. 只要抽运光足够强, 结果可以使得全部 ^{87}Rb 原子都集中到 $F=2$ 的五个子能级上去.

图3 经过 ^{85}Rb 滤光泡后 a, b 线的相对强度图4 ^{85}Rb 灯抽运 ^{87}Rb 吸收泡的方案图5 $\delta I-T$ 曲线

显然,如果用 ^{85}Rb 光谱灯不经滤光泡直接对 ^{87}Rb 吸收泡进行光抽运,也是一种可行的抽运方案. Arditi 等人利用这种抽运方案作过 ^{87}Rb 原子束频标的实验^[2]. 此时起光抽运作用的主要是 ^{85}Rb 灯发出的 A 线,而 B 线基本上不起作用. 只要抽运光足够强,抽运的结果应该是全部 ^{87}Rb 原子集中到 $F=1$ 的三个子能级上.

我们把此抽运方案用到 ^{87}Rb 吸收泡的光抽运实验中,并测量了 ^{87}Rb 基态 $0-0$ 跃迁的共振讯号强度、线宽和光频移. 实验装置如图4所示. 实验结果如下:

1. 共振讯号强度 δI

我们测量了在不同吸收泡温度 T 下的共振讯号强度,结果如图5所示. 由图5可以看出讯号最强的温度在 40°C 左右. 这是在 ^{85}Rb 灯供电电压不是最佳电压(最佳电压对应最强的抽运光)时测的曲线. 如果把 ^{85}Rb 灯供电电压调至最佳电压,则在 40°C 时可得最大讯号为 2.5 V (该讯号是光电管的输出电压经一级放大后得到的). 为了与传统用的 ^{87}Rb 灯经 ^{85}Rb 滤光泡再抽运 ^{87}Rb 吸收泡的方案对比,我们也在同样的实验条件下测了传统抽运方案的共振讯号强度,也把 ^{87}Rb 灯供电电压调至最佳电压,在 $T=56^\circ\text{C}$ 时得到最大讯号为 1.7 V . 这一点很容易从 ^{87}Rb 原子的能级结构加以说明. 因为在此抽运方案中,光抽运的结果是全部 ^{87}Rb 原子集中在 $F=1$ 的三个子能级上,所以对于 $0-0$

跃迁的两个能级来说粒子数差约等于 $N/3$, 其中 N 为吸收泡中 ^{87}Rb 原子的总数. 而在传统的光抽运方案中, 光抽运的结果是全部 ^{87}Rb 原子集中在 $F=2$ 的五个子能级上, 所以对于 $0-0$ 跃迁的两个能级来说粒子数差约等于 $N/5$. 因此前者对应的共振讯号强度与后者对应的共振讯号强度之比应该是 $5:3$. 这与实验结果基本一致.

另外, 由图 5 可以看出在 65°C 附近共振讯号变成负值. 这意味着 $0-0$ 跃迁共振发生时透过 ^{87}Rb 吸收泡的光强反而增加. 为了试图解释这负讯号的出现, 我们求解粒子数方程.

设 ^{87}Rb 原子基态各子能级自下而上编号为 $1, 2, \dots, 8$, 它们的粒子数各为 n_i , 总粒子数为 N , τ 为弛豫时间, $W_{\text{r.f.}}$ 为微波引起的单位时间的跃迁几率, W_A 和 W_B 分别为 A 线和 B 线单位时间光抽运的跃迁几率. 则粒子数方程为

$$\begin{aligned}\frac{dn_1}{dt} &= -n_1 W_B + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_1 - \frac{1}{8} N}{\tau}, \\ \frac{dn_2}{dt} &= -n_2 W_B + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_2 - \frac{1}{8} N}{\tau} + W_{\text{r.f.}}(n_6 - n_2), \\ \frac{dn_3}{dt} &= -n_3 W_B + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_3 - \frac{1}{8} N}{\tau}, \\ \frac{dn_4}{dt} &= -n_4 W_A + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_4 - \frac{1}{8} N}{\tau}, \\ \frac{dn_5}{dt} &= -n_5 W_A + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_5 - \frac{1}{8} N}{\tau}, \\ \frac{dn_6}{dt} &= -n_6 W_A + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_6 - \frac{1}{8} N}{\tau} - W_{\text{r.f.}}(n_6 - n_2), \\ \frac{dn_7}{dt} &= -n_7 W_A + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_7 - \frac{1}{8} N}{\tau}, \\ \frac{dn_8}{dt} &= -n_8 W_A + \frac{1}{8} W_B \sum_{i=1}^3 n_i + \frac{1}{8} W_A \sum_{i=4}^8 n_i - \frac{n_8 - \frac{1}{8} N}{\tau}.\end{aligned}$$

令 $\frac{dn_i}{dt} = 0 (i = 1, 2, \dots, 8)$, 就可求得稳态解 $n_1, n_2, \dots, n_8$. 设 ^{87}Rb 吸收泡的吸光量为 ΔI , 则有

$$\Delta I \propto W_B \sum_{i=1}^3 n_i + W_A \sum_{i=4}^8 n_i,$$

无微波共振时的吸光量 $\Delta I_0 \propto W_B \sum_{i=1}^3 n_{i0} + W_A \sum_{i=4}^8 n_{i0}$, 其中 $n_{i0} (i=1, 2, \dots, 8)$ 是当 $W_{r.f.} = 0$ 时的 n_i . 实验上观察到的讯号为 $\delta I = \Delta I - \Delta I_0$. 最后得解为

$$\delta I = \left[8W_{r.f.} \left(W_A + \frac{1}{\tau} \right) \left(W_B + \frac{1}{\tau} \right) (W_A - W_B)^2 \cdot N \cdot h\nu \right] / \left[\left(W_A + \frac{1}{\tau} \right) \cdot \left(W_B + \frac{1}{\tau} \right) \left(3W_A + 5W_B + \frac{8}{\tau} + 4W_{r.f.} \right) + 2W_{r.f.} \left(W_A + W_B + \frac{2}{\tau} \right) \cdot \left(W_A + 2W_B + \frac{3}{\tau} \right) \right] \cdot \frac{1}{3W_A + 5W_B + \frac{8}{\tau}}.$$

由此解可看出始终有 $\delta I > 0$, 不可能出现 $\delta I < 0$ 的情况. 所以到目前为止我们还没有能够解释这负讯号出现的原因.

另外, 我们也反过来用 ^{87}Rb 光谱灯, 不经滤光泡直接抽运天然 Rb 吸收泡, 而观测 ^{85}Rb 原子基态 $0-0$ 跃迁的光检测讯号. 共振讯号强度与温度的关系如图 6 所示. 在 65°C 附

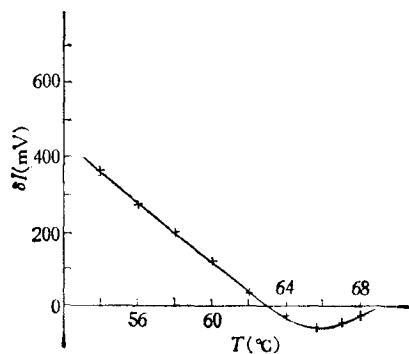


图 6 ^{85}Rb 的 $\delta I-T$ 曲线

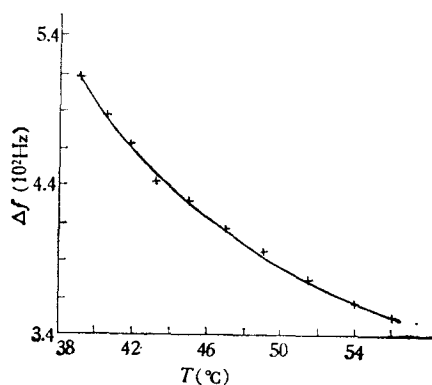


图 7 $\Delta f-T$ 曲线

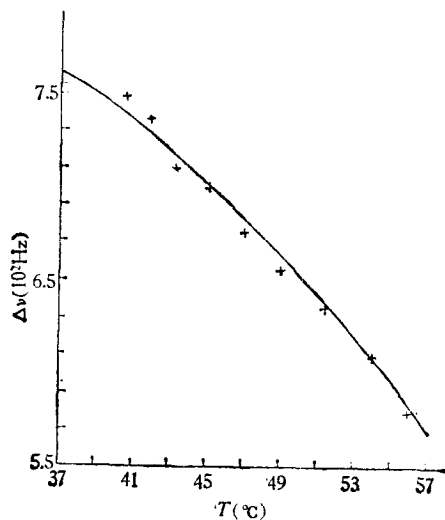


图 8 $\Delta \nu-T$ 曲线

近也观察到了负讯号。而在传统的抽运方案中或者用 ^{87}Rb 灯不经滤光泡直接抽运 ^{87}Rb 吸收泡,或者用 ^{85}Rb 灯直接抽运天然 Rb 吸收泡而观察 ^{85}Rb 的共振讯号都没有看到负讯号的出现。所以,看来负讯号的出现是 ^{85}Rb 灯抽运 ^{87}Rb 原子或者 ^{87}Rb 灯抽运 ^{85}Rb 原子时出现的物理现象。

2. 共振讯号的线宽 Δf

测量结果如图 7 所示。线宽随着温度 T 的增加而减小。一个可能的原因是:在此抽运方案中因没有滤光泡,抽运光较强,共振线宽主要决定于抽运光强。当吸收泡温度增加时吸收泡中 ^{87}Rb 原子密度增加,因而吸光量也增加,这样照射到吸收泡后半部份的光就变弱,共振线宽就变小。

3. 光频移 $\Delta\nu$

测量结果如图 8 所示。光频移量约比传统抽运方案中同温度下的光频移量大一个多数量级。这有两个原因:一是在此方案中由于无滤光泡,所以照射到吸收泡上的光强比传统方案中的光强大;二是 ^{85}Rb 的 A 线不是 ^{87}Rb 原子的共振光谱线,它所产生的光频移一般要大于共振光谱线产生的光频移^[3]。

结论 由于这种抽运方案可以获得比传统抽运方案更强的 0—0 跃迁共振讯号,故有利于 ^{87}Rb 原子频标的短稳。另外,此方案不需要滤光泡,有利于 ^{87}Rb 原子频标的小型化和改善温度系数。但是,光频移较大,而且找不到零光频移的温度,不利于长稳。但若再利用脉冲光抽运、连续微波共振、脉冲取样光检测的方案^[4]以消除或减小光频移,仍可望获得较好的长稳。关于负共振讯号出现的原因,有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] R. J. Carpenter, E. C. Beaty, P. L. Bender, S. Saito and R. O. Stone, IRE Trans. Instr., **I-9**(1960), 132.
- [2] M. Arditi, P. Cérez, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-13**(1977), 344.
- [3] 韩其智、钱裕昆,无线电电子学汇刊, 2(1980), 1.
- [4] 董太乾, 物理学报, **30**(1981), 1.

OPTICAL PUMPING OF ^{87}Rb ATOMS USING ^{85}Rb LAMP

YANG FENG LIU SHU-QIN DONG TAI-QIAN

(Peking University)

ABSTRACT

An optical pumping device, consisting of only ^{85}Rb lamp and ^{87}Rb absorption bulb, is used. The 0—0 transition resonance signal of ^{87}Rb ground state is found to be greater than that in the conventional optical pumping device, in which the ^{87}Rb lamp, ^{85}Rb filter and ^{87}Rb absorption bulb are used. In a definite temperature range, a negative resonance signal is observed. Up to now, it has not been explained yet. The line-width and optical frequency shift are measured. The possibility of applying this device in ^{87}Rb atomic frequency standard is discussed.