

文章编号: 1007-5461(2005)02-0177-04

# 利用 Doppler 展宽的 Zeeman 光谱 实现钛宝石激光器的稳频

江开军, 李可, 王谨, 詹明生

(中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 实现了一种可靠而又简单的用 Doppler 展宽的 Zeeman 光谱对连续单纵模钛宝石激光器进行稳频的方法。这种方法所需激光输出功率小于 1 mW, 激光器频率的长期稳定度小于 1 MHz/h, 且不受激光输出功率起伏的影响, 频率锁定点可以在多谱勒展宽范围里随意调节。

**关键词:** 激光技术; Zeeman 光谱; 饱和吸收光谱; 激光线宽

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## 1 引言

自从磁光阱 (MOT) 在 1985 年实现<sup>[1~3]</sup>, 特别是 1995 年 BEC 的实现<sup>[4~6]</sup> 以来, 冷原子一直是原子物理的研究热点。在冷原子的实验中, 对激光的频率稳定度要求比较高, 不仅要求激光线宽窄, 而且要求激光频率的短期抖动和长期漂移都远小于原子的自发辐射的宽度 (典型值为几 MHz)。冷原子的实验要求连续运转的单频可调谐激光器, 半导体激光器和钛宝石激光器是常用的选择。国内外不同小组分别用饱和吸收光谱<sup>[7~10]</sup> 和 Zeeman 光谱<sup>[11]</sup> 对半导体激光器进行稳频。但半导体激光器功率较小, 一般只有几十毫瓦到上百毫瓦, 且不加稳频前的激光线宽是 10 MHz。当越来越多的小组利用双磁光阱结构来做 BEC 实验后, 对激光器的功率有比较高的要求。

钛宝石激光器不仅功率高 (可以到达 1 W 的量级), 而且可调波长范围大, 激光器线宽窄 (如 Coherent 公司 CR-899-21 激光器线宽可达 500 kHz, MBR-110 可窄至 100 kHz), 钛宝石激光器成为冷原子物理研究的很好选择。但是带有参考腔的 899 环型腔钛宝石激光器一方面功率波动较大, 另一方面, 频率长期稳定度较差 (100 MHz/h)。国内王育竹小组利用计算机采样 - 输出对钛宝石激光器进行稳频<sup>[12]</sup>, 但这种方法装置较复杂。我们最近用 Doppler 展宽的 Zeeman 光谱对钛宝石激光器进行稳频, 在常温 Rb 气室外面上加上磁场, 利用右旋圆偏振光 ( $\sigma^+$ ) 和左旋圆偏振光 ( $\sigma^-$ ) 激发原子的跃迁选择定则的不同, 得到两路信号的差分信号来对激光器进行稳频。所需激光功率小于 1 mW, 稳频装置简单, 并且频率长期稳定度优于 1 MHz/h, 频率稳定度不受功率波动影响。

## 2 实验装置与实验原理

如图 1, 钛宝石激光器输出的光经过起偏器 P 产生线偏振光, 再通过一个加有均匀磁场的 Rb 蒸汽泡, 线偏振光可以分解成右旋圆偏振光 ( $\sigma^+$ ) 和左旋圆偏振光 ( $\sigma^-$ ) 叠加的形式, Rb 泡后面的  $\lambda/4$  波片

**基金项目:** 本工作得到国家自然科学基金 (10104018, 10074072) 的资助

**收稿日期:** 2003-12-05; **修改日期:** 2004-03-22

**E-mail:** kjjiang@wipm.ac.cn

将右、左旋圆偏振光转化成水平方向偏振和垂直方向偏振的线偏振光，经过极化分束片 (PBS) 后由两个光电探测器分别探测到右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的吸收谱，这两路信号经过差分放大器后的误差信号反馈到钛宝石激光器的外部扫描电压上，从而实现钛宝石激光器的稳频。Rb 蒸汽泡外面的磁场由一对 20(层)×30(匝) 的 Helmholtz 线圈组成，两个线圈之间的距离为线圈的平均半径 (45mm)，这样可在线圈径向产生均匀分布的磁场。

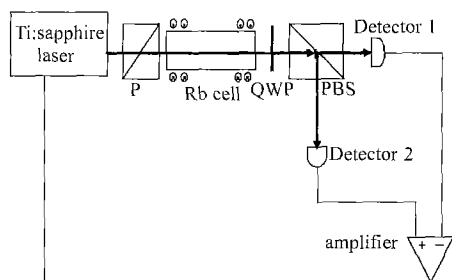


Fig.1 Experimental setup, P: Polaryzer, PBS: Polarization beam splitter, QWP: Quarter-wave plates

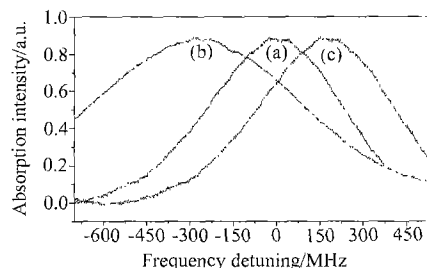


Fig.2 Doppler-broadened absorption spectra of <sup>85</sup>Rb according to different magnetic field, (a) is the signal without magnetic field; (b), (c) are the absorption signals of  $\sigma^-$  light and  $\sigma^+$  light when magnetic field exists.

如图 2, 当外加磁场为零时 ( $B = 0$ ), 同一 F 能级的磁子能级是简并的, 左、右旋圆偏振光的吸收谱线是重合的 (图 2(a))。当外加磁场不为零时 ( $B \neq 0$ ) 时, 由于在  $\sigma^+$  光和  $\sigma^-$  光激发下的原子跃迁选择定则分别为  $\Delta m_F = +1$  和  $\Delta m_F = -1$ , 所以两路信号的吸收峰相对  $B = 0$  时的吸收峰频率有一个频移量, 左旋圆偏振光 ( $\sigma^-$ ) 的吸收谱线红移 (图 2b), 右旋圆偏振光 ( $\sigma^+$ ) 的吸收谱线蓝移 (图 2c)。将  $\sigma^+$  光的信号减去  $\sigma^-$  光的信号得到关于原子共振吸收谱线的微分信号 (图 3), 这个微分信号反馈到钛宝石激光器的外部扫描电压上, 就可以将激光器的频率稳定在原子共振吸收峰上。

### 3 实验结果

如图 4, <sup>85</sup>Rb 和 <sup>87</sup>Rb 激发态的超精细能级间的间隔均小于多谱勒展宽 (~517 MHz), 所以相应于 <sup>85</sup>Rb 基态到激发态的跃迁 ( $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ ) 和 <sup>87</sup>Rb 基态到激发态的跃迁 ( $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ ) 的吸收谱, 分别被包含在多谱勒展宽的吸收包络里面。如图 5(a), (b) 分别为右旋圆偏振光 ( $\sigma^+$ ) 和左旋圆偏振光 ( $\sigma^-$ ) 的吸收谱线, 他们相对与共振吸收频率都有一个 Zeeman 频移, 将  $\sigma^+$  和  $\sigma^-$  信号相减得到微分信号 (c)。

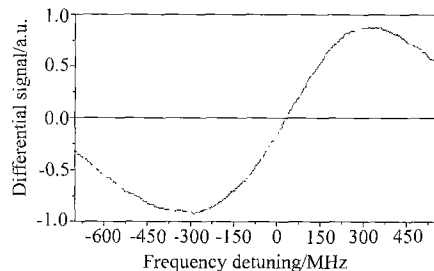


Fig.3 Differential signal of <sup>85</sup>Rb obtained from the absorption spectra of  $\sigma^-$  light and  $\sigma^+$  light in magnetic field

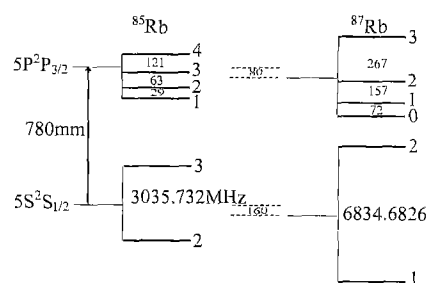


Fig.4 The energy level scheme of Rb D<sub>2</sub> line

如图 6(a) 是饱和吸收光谱, 用来作为频率的参考信号, (b) 是微分信号。虽然 Doppler 展宽吸收光谱的半宽比较大, 但是在相同探测光强条件下其幅度是饱和吸收光谱幅度的两三倍<sup>[11]</sup>, 所以得到的微分信号和用饱和吸收光谱稳频得到的微分信号的斜率相当。而且, 由于多谱勒展宽吸收光谱的半宽比较大, 频率稳定范围很大, 这样可以使激光器的长期频率稳定度比较好。另外, 由于微分信号是通过两路光信号相减得到, 所以, 这种方法稳频不受激光功率波动影响, 这样就回避了钛宝石激光器激光功率不稳定的缺点。

通过旋转  $\lambda/4$  波片, 可以调整左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的相对强度, 从而可以调节微分信号的直流电平, 用这种方法可以调节频率稳定点。同样, 也可以调节反馈电路的直流成分, 从而调节频率稳定点, 这两种方法效果差不多。

在我们的实验中, 磁场是由一对 Helmholtz 线圈产生, 这样可以使热量快速消散开, 保持温度恒定, 最佳磁场强度为 85 G。频率的长期稳定度小于 1 MHz/h, 能满足激光冷却原子实验研究的要求。

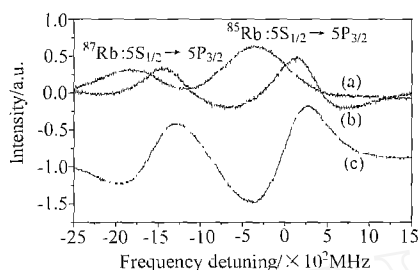


Fig.5 The Doppler-broadened absorption spectra of  $^{85}\text{Rb}$  and  $^{87}\text{Rb}$ , curve (a) and (b) are absorption spectra of  $\sigma^+$  and  $\sigma^-$  beam respectively, and curve (c) is their corresponding differential signals.

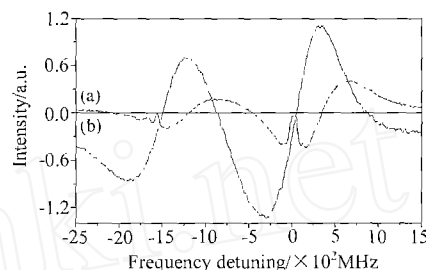


Fig.6 Differential signal (b) and saturated absorption spectra corresponding to the transition:  $5S_{1/2}5P_{3/2}$  of  $^{87}\text{Rb}$  and  $^{85}\text{Rb}$ (a)

## 4 总 结

原子能级在磁场下会发生 Zeeman 分裂, Zeeman 能级间左、右旋圆偏振光激发的跃迁选择定则的不同导致两谱分量的移动, 两分量之差产生的 Doppler 展宽的吸收峰不仅半宽大, 而且幅度大。这样, 我们利用简单的实验装置和小的激光功率得到宽度大、斜率大的微分信号, 这个微分信号反馈到钛宝石激光器的外部扫描电压上, 就可以对钛宝石激光器进行稳频。频率的长期稳定度小于 1 MHz/h, 而且不受功率起伏的影响。另外, 通过旋转  $\lambda/4$  波片或者调节反馈电路的直流成分, 可以调节频率稳定点。

## 参考文献:

- [1] Phillips W, Metcalf H. Laser deceleration of an atomic beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48(9): 596-599.
- [2] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, et al. Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 55(1): 48-51.
- [3] Dalibard J, Salomon C, Aspect A, et al. *Atomic Physics 11* [M]. ed. Haroche S, Gay J C, Grynberg G, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific. 1989. 199-214.
- [4] Anderson M H, Ensher J R, et al. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapour [J]. *Science*, 1995, 269: 198-201.
- [5] Bradley C C, Sachett C A, et al. Evidence of Bose-Einstein condensation in an atomic gas with attractive interactions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75(9): 1687-1690.

- [6] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, *et al.* Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75(22): 3969-3973.
- [7] MacAdam K B, Steintach A, Wieman C. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb [J]. *Am. J. Phys.*, 1992, 60(12): 1098-1111.
- [8] Gan J H, *et al.* Magneto-optical trap of cesium atoms [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, 13(11): 821-824.
- [9] Wang Yuzhu, Liu Xuanming, Lin Yueming. A new kind of MOT of sodium [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 1996, 23(5): 448 (in Chinese).
- [10] Wang Jin, Liu Xiaojun, *et al.* Laser trapping of rubidium [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, 20(6): 862-864 (in Chinese); Wang Jin, Liu Xiaojun, *et al.* Frequency stabilization and detuning of diode laser in laser trapping of atoms [J]. *Chinese Journal Quantum Electronics* (量子电子学报), 2000, 17(1): 43-47 (in Chinese).
- [11] Corwin K L, Lu Z T, *et al.* Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(15): 3295-3598.
- [12] Zhou Shuyu, Zhou Shanyu, Wang Yuzhu. Computer sampling error signal control output voltage to stabilize frequency of the Ti:sapphire laser [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2003, 30(1): 9-11 (in Chinese).

## Frequency stabilization for Ti:sapphire laser with Doppler-broadened Zeeman spectra

JIANG Kai-jun, LI Ke, WANG Jin, ZHAN Ming-sheng

( State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China )

**Abstract:** We have demonstrated a robust and easy frequency stabilization method for Ti:sapphire laser, using Doppler-broadened Zeeman spectrum. In this method, only very weak laser output power ( $<1$  mW) is required, and the experimental setup is relatively simple. A long-time frequency stability of less than 1 MHz/h is achieved. In addition, the stability is not affected directly by the laser output power fluctuation and the frequency locking point could be set arbitrarily in the Doppler-broadened spectral range.

**Key words:** laser techniques; Zeeman spectra; saturated absorption spectrum; laser linewidth

**作者简介:** 江开军 (1975 -), 男, 毕业于武汉大学, 现主要从事冷原子和玻色-爱因斯坦实验方面的工作。