

文章编号: 0258-7025(2002)06-0533-04

激光抽运铷原子频标的实验研究

黄学人¹, 涂鲜花^{1,2}, 梅刚华¹, 朱熙文¹

(¹ 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)
(² 中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学开放实验室, 安徽合肥 230031)

摘要 研制了激光抽运铷原子频率标准, 对其多种参数及指标进行了测量, 分析并提出了如何提高指标的相应措施。

关键词 激光抽运, 小型铷原子频标, 半导体激光器

中图分类号 O 431.2 **文献标识码** A

Experiment of Diode Laser Pumped Rubidium Frequency Standards

HUANG Xue-ren¹, TU Xian-hua^{1,2}, MEI Gang-hua¹, ZHU Xi-wen¹

(¹ State Key Laboratory Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)
(² Laser Spectroscopy Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract The preliminarily laser-pumped Rb frequency standards have been described in this paper, some parameters have been measured. How to improve its stability is discussed.

Key words laser pumping, rubidium frequency standards, diode laser

1 引言

激光抽运铷原子频标与谱灯抽运铷频标的主要区别是用半导体激光代替了谱灯作为抽运光源。由于半导体激光具有亮度高、单色性好和线宽窄等特点, 可得到更高的抽运效率和很低的透射光本底, 从而获得较强的微波共振信号和较低的光噪声, 大大提高了信噪比。理论上预期整机的短期的稳定度比谱灯抽运铷频标至少要高出一个量级, 在最好的情况下可与氢频标相当^[1,2]。由于半导体激光器具有良好的光谱线型对称性, 通过对半导体激光的连续调谐使频标运转于零光强频移工作点附近, 从而使其中、长期稳定度也将有明显的改善^[3]。此外, 可以省略传统的铷谱灯抽运频标中的滤光, 而使结构大大简化。从80年代初开始就有人开展激光抽运铷频标的原理实验和机理研究^[4~7], 由于受到半导体激光技术的限制而发展缓慢。90年代以来, 由于

半导体激光器质量的提高和稳频技术的发展, 加上民用和航天领域提出了高稳定度频标的要求, 瑞士和美国等国家率先对该研究进行投入, 并取得了重要进展^[8,9]。我们最近研制了一台原理性样机, 指标可望近期内有所提高。

2 实验装置与原理

激光抽运铷原子频标的工作原理是利用⁸⁷Rb原子基态的超精细能级的跃迁谱线对微波激励信号进行鉴频, 再经过锁相环路将产生激励信号的本振源(压控晶体振荡器)锁定在原子谱线中心频率而成, 框图示于图1。

铷原子是一种碱金属原子, 只有一个价电子, ⁸⁷Rb原子的核自旋 $I = 3/2$, 基态 $5^2S_{1/2}$ 的两超精细能级为 $F = 1, 2$, 相关能级图如图2所示。基态两个超精细能级相距约 6835 MHz, 第一激发态有两

收稿日期 2001-04-12; 收到修改稿日期 2001-06-04

作者简介: 黄学人(1974—), 男, 江西余干县人, 博士研究生, 主要从事原子与分子物理研究。E-mail: hxueren@21cn.com

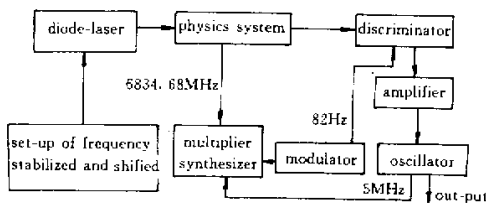
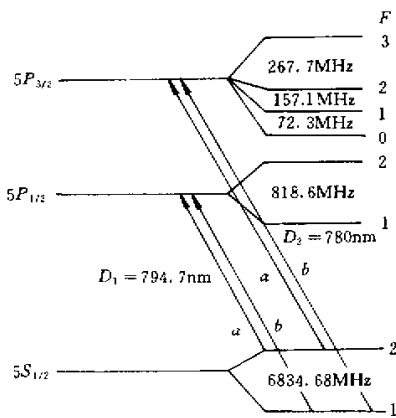


图1 激光抽运铷原子频标原理框图

Fig.1 Principle scheme of laser-pumped Rb frequency standards

图2 ^{87}Rb 原子基态和第一激发态的能级图Fig.2 Energy level of the ground and first-excited state of ^{87}Rb

个精细结构能级 $5^2P_{3/2}$ 和 $5^2P_{1/2}$ 。 ^{87}Rb 原子第一激发态与基态之间的跃迁所对应的光谱包括两个精细结构成分 D_1 和 D_2 线, 其中每一条又分裂为两条超精细结构成分 a 线和 b 线。基态能级中的 $|F=2, m_F=0\rangle$ 和 $|F=1, m_F=0\rangle$ 这两个能级间的跃迁频率的精确值为 6834.682611 MHz 。我们用一台 DL100 型可调谐光栅外腔稳频的二极管激光器系统和 HL7851G98 型二极管激光器, 把激光频率调准在 ^{87}Rb 的 D_2 线的 a 线 (780.245 nm) 作为抽运光, 通过充有 ^{87}Rb 的谐振腔泡系统, 基态的原子就会被 a 线抽运到 $5^2P_{3/2}$ 上, 因激发态的能级寿命很短, 它们很快又会通过自发辐射返回到基态, 所以抽运光作用的结果就是把全部原子抽运到 $F=1$ 能级上。当 $F=2$ 的能级被抽空以后, ^{87}Rb 原子不再吸收抽运光, 这时 ^{87}Rb 吸收泡对抽运光 (a 线) 是透明的。这时在 ^{87}Rb 吸收腔泡上再加上频率

为 6835 MHz 的微波场, 让它在 $|F=2, m_F=0\rangle$ 和 $|F=1, m_F=0\rangle$ 这两个能级之间发生共振, 这样就有一部分原子从 $|F=1, m_F=0\rangle$ 跃迁到 $|F=2, m_F=0\rangle$ 能级上, 只要有一个原子吸收一个微波量子的能量而跃迁到 $|F=2, m_F=0\rangle$ 能级上, 就马上会吸收一个光量子的能量被激发到激发态, 从而使通过 ^{87}Rb 吸收泡的光强变弱, 因此, 可以通过检测 ^{87}Rb 吸收泡的透射光强的强弱来检测两超精细能级间的共振, 形成一条量子鉴频线。实验中在 ^{87}Rb 吸收泡中充入适量的缓冲气体, 使发生荧光淬灭和使它的激发态能级充分混杂, 以增加光抽运的效率^[10]。

自由运转的二极管激光器的频率稳定性很差, 在采取了温度和电流控制后, 其有效线宽为 100 MHz 左右, 加光栅外腔反馈可以使激光器的有效线宽进一步压窄到 10 MHz , 由于激光抽运铷原子频标对激光器的频率稳定度要求很高, 这仍不能满足要求, 所以需要进一步采取稳频措施^[11]。而且为了提高原子频标的中、长期稳定度, 需要将激光器的频率调谐于原子跃迁的不同谱线上, 以寻求一使光强频移最小的工作点, 达到减小和消除光强频移的目的, 从而提高该频标的中、长期稳定度。我们用饱和吸收光谱法和声光调制器 AOM 对光栅外腔反馈二极管激光器进行了稳频和移频, 使线宽压窄到小于 1 MHz , 并且可连续控制激光的移频量, 从而实现了激光抽运铷原子频标的正常运转。

3 实验步骤

稳频和移频实验装置如图 3 所示, 光栅外腔反馈式二极管激光器 LD 输出的 780 nm 的准直激光束经薄平面镜 PS 分成两束, 其中透射光束 B_1 作为抽运光经一反射镜后由扩束透镜扩束后进入吸收泡谐振腔内, 形成了一个完整的量子鉴频器。反射光束 B_2 用于稳频和移频。 B_2 经过 AOM 后在空间上分成了 0 级光 B_3 和 -1 级光 B_4 , 若入射光的频率为 f_0 则 0 级光的频率保持不变, 而 -1 级光的频率为 $f_{-1} = f_0 - \Omega$ ^[12], Ω 为声光调制器的射频驱动频率。当 -1 级光被锁定在原子的吸收共振峰时, 改变 Ω 的大小即可控制抽运光的频移量, -1 级光再经过极化偏振片分成 B_5 和 B_6 , B_5 再由两反射镜反射后经过另一极化偏振片反射, 使经过样品池的两束光完全重合, 消除 Doppler 效应, 进入探测器 PD_1 , PD_1 的光电信号经电流-电压转换电路 (I/V) 转换为电

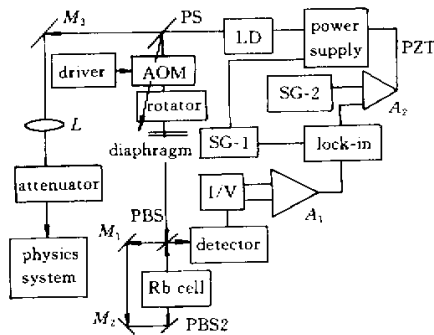


图3 激光抽运铷原子频标实验装置图

M :反射镜 ;PS :分束片 ;LD :激光器 ;PZT :压控换能器 ;SG :信号发生器 ;I/V :电流电压转换电路 ;PBS :极化偏振分束片 ;AOM :声光调制器 ;L :扩束透镜

Fig.3 Setup of Rb frequency standards pumped by laser diode

M : reflector ; PS : polarize splitter ; LD : laser diode ; PZT : piezoelectric ; SG : signal generator ; I/V : current/voltage ; PBS : polarize beam splitter ; AOM : acoustic optical modulator

压信号,分别输入放大器 A₁ 的反相端和同相端。A₁ 输出的差分信号送入锁相放大器,信号发生器 SG₁

的输出信号对激光器的注入电流进行调制,同时也给锁相放大器提供一参考信号。信号发生器 SG₂ 的信号输出到激光器的 PZT 以控制光栅角度。开环时,调节 SG₂ 的信号幅度可对激光频率进行扫描,闭环时,SG₂ 的信号与来自锁相放大器的误差信号叠加,通过负反馈将激光频率锁定在无 Doppler 展宽的吸收峰上。我们先将 -1 级光锁定在 ⁸⁷Rb 的 D₂ 线基态 m_F = 2 → m_F = 2_β 的交叉峰上,然后加上声光移频器,当 Ω = 80 MHz, f₀ = f₋₁ + Ω,此时光频移较小^[3]。调整好谐振腔的光路,加上适当的偏振衰减,使单位面积的光功率约为 40 μW/cm²,将由晶振、倍频、综合和隔放电路产生的微波信号加至谐振腔中,光电池的输出生信号接入调制频率为 82 Hz 的伺服系统。几分钟后通过对锁定鉴别信号检测,便可知整台原子频标工作是否正常。当锁定指示出现 164 Hz 二倍调制频率后说明此频标工作正常。其信号如图 4 所示。并对系统进行了有关参数测试,见表 1。

由表 1 可知,原理样机的稳定度指标已达到了一般谱灯抽运的水平,短期稳定度为:σ_y(τ) = 3.0 × 10⁻¹¹/√τ,吸收线宽为 1.2 kHz,鉴频斜率为 0.42 nA/Hz,这些参数值均优于谱灯抽运铷频标,在采取一些措施后,可望短期内有较大的提高。

表 1 激光抽运频标的参数测量值

Table 1 Parameters measurement of the laser-pumped frequency standard

	Short-term stability	Absorption line width	Discriminator slope	Temperature coefficient
Laser-pumped	3 × 10 ⁻¹¹ /s	1.2 kHz	0.42 nA/Hz	2 × 10 ⁻¹⁰ /°C
Lamp-pumped	(2~4) × 10 ⁻¹¹ /s	1.6 kHz	0.36 nA/Hz	1 × 10 ⁻¹¹ /°C

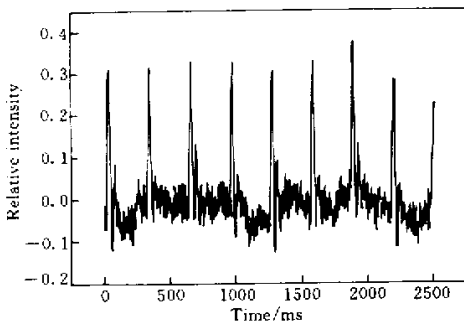


图 4 164 Hz 锁定指示信号
Fig.4 Lock-signal of 164 Hz

同时我们利用小型化的微波谐振腔同样得到了锁定信号,为小型化激光抽运铷原子钟提供了实验依据。

4 分析与讨论

我们用一台半导体激光器代替了传统的谱灯,使铷原子频标正常工作,并对其指标进行了测试,达到了谱灯抽运铷频标的指标,但与理论值还有相当的距离,分析有以下几方面的原因。

1) 目前使用的半导体激光器存在频率和光强起伏较大,带宽较宽(1 MHz)和易跳模等问题,频率只能分段调节,频率对温度和电流十分敏感。拟采取多项措施,如对激光器的温度和注入电流进行精

密控制,使频率和光强的稳定度及相关的调频、调幅噪声降低到所需的要求。同时在铷原子跃迁谱线附近实现连续可调,以发挥激光抽运铷频标的潜力。

2) 为了达到良好的频率稳定度,由微波源的相位噪声导致的光检测信号噪声应保持在散粒噪声的水平。低噪声微波源重点放在倍频和调相级的噪声抑制。物理系统需作相应改动,如应用充同位素铷吸收泡代替充天然铷的合成滤光吸收泡,在物理系统还需加上适当的 C 场等。

3) 在整机调试中特别注意调节各有关参数,尽可能达到光检信号最大,噪声最小,光频移约为零。频移的光强系数,温度系数以及随激光频率的变化率的最小的条件靠近。并测量由于不同泡温度和缓冲气体充制参数的鉴频斜率的变化,找出最大鉴频斜率,使系统状态最优化。

4) 通过对噪声和频率稳定度的测量与分析,可以判定噪声的来源,并采取相应的措施,分析光噪声的来源。

通过上述几方面的努力,有望使该激光抽运铷原子频标的指标提高 1~2 个量级。

参 考 文 献

- 1 J. T. Liu, P. T. Homan, L. Zhang *et al.*. Light shift measurements in a diode-laser-pumped Rb⁸⁷ Maser [C]. Proc 4th European Frequency and Time Forum, 1990. 157~159
- 2 G. Mileti, J. Q. Deng, F. L. Walls *et al.*. Recent progress in laser-pumped Rb gas-cell frequency standards [C]. Proc. 1996 IEEE International Freq. Contr.

Symp., 1996. 1066

- 3 F. Levi, C. NoVero, A. Godone *et al.*. Analysis of the light shift effect in the Rb⁸⁷ frequency standards [J]. *IEEE Trans. on IM*, 1997, **46**(2):126~129
- 4 L. L. Lewis, M. Feldman. Optical pumping by lasers in atomic frequency standards [C]. Proc. 35th Annual Freq. Contr. Symp., 1981. 612~624
- 5 H. G. Robinson, C. E. Johnson. A new heart for Rb frequency standards [J]. *IEEE Trans. IM*, 1983, **32**(3):198~201
- 6 J. C. Campro, R. P. Fmeholz. Fundamental stability limits for the diode-laser pumped rubidium atomic frequency standards [J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(10)3313~3317
- 7 M. Hashimoto, M. Ohtsu. Experiments on a semiconductor laser pumped Rb atomic clock [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **23**(4):446~451
- 8 J. Q. Deng, G. Mileti, D. A. Jennings. Improving the short-term stability of laser pumped Rb clock by reducing the effects of the interrogation oscillator [C]. *IEEE 1997 Inter. Freq. Contr. Symp.*, 1997. 438~445
- 9 G. Mileti, J. Q. Deng, F. L. Walls *et al.*. Laser-pumped rubidium frequency standards: New analysis and progress [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(2)233~237
- 10 Wang Yiqiu, Wang Qingji, Fu Jishi *et al.*. The Theory of Frequency Standards [M]. Beijing: Science Press, 1986. 378 (in Chinese)
- 11 K. B. Macadam, A. Stainbach, C. Wieman. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback and saturated absorption spectrometer for Cs and Rb [J]. *Am. J. Phys.*, 1992, **60**:1098~1111
- 12 A. Yariv, P. Yeh. *Optical Waves in Crystal: Propagation and Control of Laser Radiation* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1981. 329