

传输腔稳频的 397 nm 半导体激光器

屈万成^{1,2,3} 黄 焱^{1,2,3} 管 桦^{1,2} 黄学人^{1,2} 高克林^{1,2}

¹中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071
²中国科学院武汉冷原子物理中心, 湖北 武汉 430071
³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 商用的半导体激光器由于其长期漂移大, 不能满足单离子光频标中离子的激光冷却和长时间探测的目的。因此, 采用了传输腔稳频技术减小商用 397 nm 半导体激光器的长期漂移。利用经过 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术锁定的 729 nm 超稳激光器作参考激光, 采用扫描的法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪作传输介质, 实现了 397 nm 半导体激光器的长稳锁定。稳频后 397 nm 激光器在 1 h 内的漂移小于 1 MHz, 100 s 的 Allan 方差小于 1×10^{-10} 。这些指标为下一步利用传输腔技术实现 866 nm 激光的长稳锁定打下了基础, 同时为优化单个钙离子的激光冷却和长时间精密测量提供了条件。

关键词 激光技术; 长稳锁定; 传输腔稳频; 半导体激光器

中图分类号 TN365; TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0802008

397 nm Semiconductor Laser Stabilized with Scanning Transfer Cavity

Qu Wancheng^{1,2,3} Huang Yao^{1,2,3} Guan Hua^{1,2} Huang Xueren^{1,2} Gao Kelin^{1,2}

¹Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
²Centers for Cold Atom Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Because of the large long-term drift, the commercial semiconductor laser cannot meet the requirement of the experiments of laser cooling and probing of single ions trapped in ion traps of optical frequency standards for a long time. So, the transfer cavity is used to reduce the long-term drift of a commercial 397 nm laser. An ultra-narrow 729 nm laser stabilized to a super cavity by Pound-Drever-Hall (PDH) scheme is used as reference, and a scanning Fabry-Perot (F-P) cavity is used as transfer medium. The 397 nm laser's long-term drift is reduced to less than 1 MHz within 1 h, and the square root of the Allan variance is 1×10^{-10} at an averaging time of 10^2 s. These parameters are the base for stabilizing an 866 nm laser and optimizing the laser cooling and long-term measurement of single $^{40}\text{Ca}^+$ ion.

Key words laser technique; long-term frequency stabilization; locking with transfer cavity; semiconductor laser

OCIS codes 140.2020; 140.3425; 050.2230

1 引 言

在精密原子分子光谱实验中, 经常需要利用长期频率漂移(长漂)比较小的激光器进行长时间的光谱测量。自由运转的激光器由于长漂比较大, 不能满足实验要求, 因此需要对激光器进行稳频, 一般可

以用原子分子谱线或者参考腔进行稳频。

$^{40}\text{Ca}^+$ 离子激光冷却选取的跃迁为 $4S_{1/2}-4P_{1/2}$, 自然线宽为 22.3 MHz。进行光频标的锁定时, 需要满足长漂小于 1 MHz/h, 实验室所用的 397 nm 激光器为 Toptica 公司的商用 DL100 半导体激光

收稿日期: 2011-02-24; 收到修改稿日期: 2011-04-15

基金项目: 国家 973 计划(2005CB724502)和武汉市晨光计划(Y0W2011001)资助课题。

作者简介: 屈万成(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事 Li^+ 离子精密谱方面的研究。E-mail: wancheng@wipm.ac.cn

导师简介: 高克林(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事离子频标和离子精密谱等方面的研究。

E-mail: klgao@wipm.ac.cn

器,采用 Littrow 结构^[1,2],线宽约为 10 MHz,长漂大于 100 MHz/h,利用该激光器自带的 LIR100 锁频模块,通过透射峰稳频方法^[3]可以将激光锁定到 FPI 400 参考腔上。由于透射峰的调制频率只有几千赫兹,因此反馈带宽受到了限制,397 nm 的线宽没有得到有效压窄;另外 FPI 400 的温漂比较大,因此通过 FPI 锁定后的激光器依然不能满足实验要求。虽然技术上可以采用高稳定度的参考腔进行稳频,但是比较复杂。此外,难以找到合适的 397 nm 原子分子谱线满足激光器的稳频要求,因此采用饱和吸收稳频比较困难。而传输腔稳频技术不依赖于高稳定度的参考腔和原子谱线,只需要利用一台稳定度很高的激光器作参考,例如可采用碘稳频的氩氦激光器作参考将激光器几小时的长漂控制在 2~6 MHz^[4~9]。利用 Pound-Drever-Hall(PDH)方法^[10]成功研制了用于钟跃迁探测的 729 nm 激光器^[11],其线宽、稳定度指标都高于碘稳频的氩氦激光器,非常适合 397 nm 激光器的传输腔稳频。因此本文利用超稳的 729 nm 激光作参考,借助传输腔对 397 nm 激光器进行了稳频,以解决长漂问题。

2 传输腔稳频原理

传输腔稳频是将高稳定的参考光和待稳频的激光入射到一个扫描法布里-珀罗(F-P)干涉仪内,扫描干涉仪的腔长,用探测器可以接收到两个激光的透射峰,如图 1 所示。由于参考光的高稳定度,参考光的两个相邻透射峰的相对位置 B 保持不变,待稳光透射峰相对于参考光透射峰位置 A 在没有稳频时会发生变化。如果锁定 A/B 的值,则待稳光的长漂可以得到有效抑制。

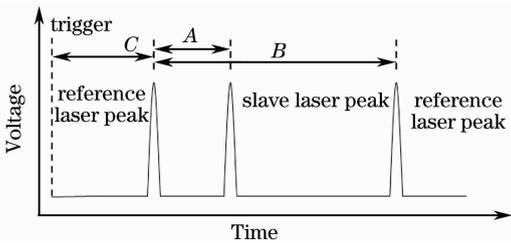


图 1 F-P 腔的透射峰

Fig. 1 Transmission peaks of F-P cavity

3 实验装置

采用高稳定度 729 nm 激光为参考,利用 F-P 传输腔锁定 397 nm 商用半导体激光器。

详细稳频方案见图 2。超稳 729 nm 激光和

397 nm 激光入射到传输腔内,信号发生器 DS345 产生 100 Hz 的三角波信号输入到驱动电路进行电压放大,驱动传输腔上的压电陶瓷(PZT),扫描腔长。利用光电探测器(PD)分别探测两束激光的透射峰信号,同时 DS345 产生同步信号输入模数转换(ADC)卡触发 PD 信号采集。在三角波的上升阶段通过 ADC 卡采集两个 PD 的信号,转换为数字信号。利用 Labview 程序处理,计算出 3 个透射峰的峰值位置,得到 A/B 和 C 值,将 A/B 值与设定值相减得到 397 nm 激光器的误差信号,经过比例积分(PI)运算得到反馈电压值。通过数模转换(DAC)卡输出反馈信号给激光器的 PZT 驱动电路,控制激光频率的长漂,将 C 值与设定值相减得到腔长扫描起始点的漂移误差信号。经过比例积分运算得到反馈电压值,通过 DAC 卡输出另一路反馈电压信号到 PZT 驱动电路,用于锁定腔的起始扫描长度,稳定腔模。之所以锁定长度 C,是由于腔并未进行温控,若不锁定,一段时间以后,扫描范围内可能扫不到所需要的 3 个峰,从而导致激光器脱锁。

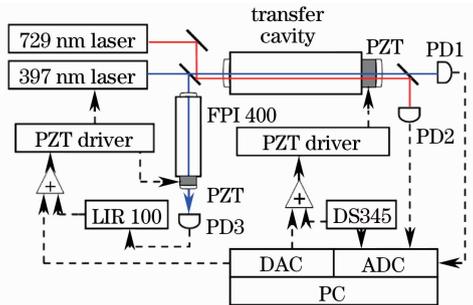


图 2 传输腔稳频原理

Fig. 2 Scheme of laser frequency stabilization using transfer cavity

729 nm 激光由钛宝石激光器 MBR110 产生,该激光利用 PDH 稳频技术锁定在 Zerodur 超稳腔上,729 nm 激光器的线宽为 41 Hz,漂移为 0.1 Hz/s^[11]。729 nm 激光器的窄线宽和长漂小的特性完全能满足 397 nm 激光的稳频指标。

自制 F-P 传输腔由平面镜和凹面镜($R = 500$ mm)构成平凹腔,腔长为 20 cm,腔镜对 397 nm 和 729 nm 激光的反射率为 99%,平面镜粘在 PZT 上,通过扫描 PZT 可以实现腔长的扫描,该腔的自由光谱程约为 750 MHz,细度约为 90,传输腔体材料为钢筒,放置在密闭的铝筒内。

传输腔稳频的核心控制部分由计算机上安装的 Labview、DAC 卡和 ADC 卡完成,DAC 卡为 NI-PCI-6733(更新率为 1 MS/s,16 bit,8 路输出),ADC 卡为

NI-PCI-6132(每通道采样率为 2.5 MS/s, 14 bit, 4 路输入)。

4 传输腔稳频优化及结果

在不断调试 Labview 编写的传输腔程序比例积分反馈参数后,可以找到理想的锁定参数,从而实现 397 nm 激光频率的锁定。但在锁定过程中 729 nm 钛宝石激光器自身可能失锁,因此 729 nm 参考光的频率可能发生跳变, A/B 值也会跳变,程序会给出错误的反馈信号,从而导致 397 nm 激光器发生“跳模”现象。例如在冷却 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子实验中, 397 nm 激光器的频率会突然从红失谐跳变到蓝失谐,结果会将 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子加热从而逃逸出离子阱。解决这个问题可以通过在 Labview 程序中加入一个条件判断,如果程序检测到 $|(A/B)_n - (A/B)_{n-1}| > 0.02$ 时,则停止更新反馈电压,保持上一次的电压,通过这个方法可以有效减小 729 nm 激光频率失锁带来的干扰。在重新锁定 729 nm 激光的频率以后,可以重新启动传输腔锁频程序继续锁频。

通过记录传输腔锁定后 A 值的变化量,可以利用传输腔的自由光谱程换算出 397 nm 激光频率的漂移值,如图 3 所示,以及得出 397 nm 激光频率漂移的 Allan 方差值,如图 4 所示,平均时间大于 100 s 时,Allan 方差小于 1×10^{-10} 。由于 397 nm 激光器通过 FPI 400 锁定的反馈无法压窄激光器的线宽,且传输腔的细度较低,反馈速度较慢,因此短期的稳定度比较差,从图 3 中的黑线可以看出频率抖动的量为 ± 5 MHz。但是通过传输腔锁定以后,397 nm 激光器的长期漂移得到了很好的抑制,100 s 平均的

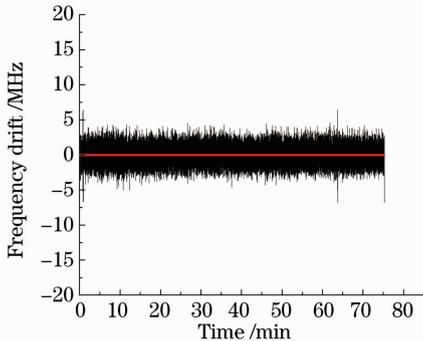


图 3 397 nm 激光器通过传输腔锁定后的频率漂移值(黑线为 1 s 平均后的结果,灰色线为 100 s 平均后的结果)

Fig. 3 Frequency drift of the 397 nm laser stabilized using a transfer cavity (black line is the result of 1 s average, gray line is the result of 100 s average)

长期漂移量在 1 MHz 以下,如图 3 中间的灰色线所示。在单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频标实验中,进行传输腔锁定后的 397 nm 激光器能满足长时间测量的要求。

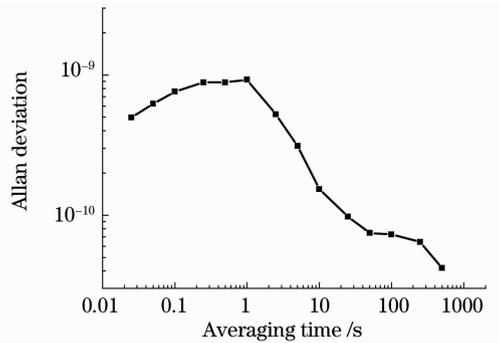


图 4 稳频后 397nm 激光器的 Allan 方差值 (相对稳定度)

Fig. 4 Allan deviation of the stabilized 397 nm laser (relative stability)

在稳频实验中通过 DAC 卡每秒反馈的次数大约为 50 次,达不到三角波的扫描频率,这是由于 ADC 卡采集到的数据量比较大,采用 Labview 编写的数据处理程序运行较慢,不能在三角波的下降阶段完成数据的运算处理。如果想进一步提高反馈次数,可以改用基于单片机的系统完成采集和处理。

5 结 论

经过传输腔稳频的半导体激光器在 1 h 内的漂移小于 1 MHz,能够满足单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的光频标实验要求,但是 397 nm 激光器的短期频率抖动比较大,进一步改善短期稳定度可以采用 PDH 技术将激光器锁定在一个 F-P 腔上,从而进一步将激光线宽压窄到千赫兹量级。

致谢 感谢浙江大学光学研究所郭彬和中国科学院武汉物理与数学研究所刘曲的帮助。

参 考 文 献

- Ch. Schwedes, E. Peik, J. Von Zant Hier *et al.*. Narrow-bandwidth diode-laser-based blue and ultraviolet light source[J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(2): 143~147
- Guan Hua, Huang Guilong, Huang Xueren *et al.*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 31~34
- 管桦, 黄贵龙, 黄学人等. 基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 31~34
- Y. C. Chung, T. M. Shay. Frequency stabilization of a diode laser to a Fabry-Perot interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(5): 424~427
- M. Chwalla, J. Benhelm, K. Kim *et al.*. Absolute frequency measurement of the $^{40}\text{Ca}^+ 4s^2S_{1/2}-3d^2D_{5/2}$ clock transition[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(2): 023002

- 5 Kensuke Matsubara, Satoshi Uetake, Hiroyuki Ito *et al.*. Precise frequency-drift measurement of extended-cavity diode laser stabilized with scanning transfer cavity [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(1A): 229~230
- 6 B. G. Lindsay, K. A. Smith, F. B. Dunning. Control of long-term output frequency drift in commercial dye lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(6): 1656~1657
- 7 S. Uetake, K. Matsubara, H. Ito *et al.*. Frequency stability measurement of a transfer-cavity-stabilized diode laser by using an optical frequency comb [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **97**(2): 413~419
- 8 W. Z. Zhao, J. E. Simsarian, L. A. Orozco *et al.*. A computer-based digital feedback control of frequency drift of multiple lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(11): 3737~3740
- 9 A. Rossi, V. Biancalana, B. Mai *et al.*. Long-term drift laser frequency stabilization using purely optical reference [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(7): 2544~2548
- 10 R. Drever, J. Hall, F. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 11 H. Guan, Q. Liu, Y. Huang *et al.*. A 729 nm laser with ultranarrow linewidth for probing $4S_{1/2}$ - $3D_{5/2}$ clock transition of $^{40}\text{Ca}^+$ [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(1): 217~221