

基于飞秒光频梳的双频 He-Ne 激光器频率测量*

吴学健[†] 尉昊赞 朱敏昊 张继涛 李岩

(清华大学精密仪器与机械学系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

(2011 年 11 月 24 日收到; 2012 年 1 月 1 日收到修改稿)

利用光纤飞秒光频梳和外腔可调谐半导体激光器, 建立了一套双频 He-Ne 激光器频率测量系统. 选用铷钟作为系统的频率基准, 通过将外腔半导体激光锁定至光频梳使得其频率溯源至铷钟, 再利用外腔可调谐半导体激光与双频 He-Ne 激光器输出的正交偏振激光拍频, 同时测量两路正交偏振激光频率. 将可调谐半导体激光器锁定至光频梳第 1894449 个梳齿, 其绝对频率为 473612190000.0 ± 2.7 kHz, 相对不确定度为 5.7×10^{-12} . 对商品双频 He-Ne 激光器进行频率测量实验, 双频 He-Ne 激光器水平方向偏振激光频率均值为 473612229934 kHz, 垂直方向偏振激光频率均值为 473612232111 kHz, 平均时间为 1024 s 的相对 Allan 标准差为 5.2×10^{-11} , 频差均值为 2.177 MHz, 标准偏差为 2 kHz.

关键词: 测量, 激光频率, 光频梳, 双频激光

PACS: 06.20.-f, 06.30.Ft, 42.62.Eh, 42.60.-v

1 引言

双频激光干涉仪具有测量精度高、测量速度快和环境适应力强等特点, 其在精密位移平台定位等工业领域有着不可替代的作用^[1]. 双频激光器是双频激光干涉仪的核心元件, 其输出激光包括具有一定频率差的两个正交偏振的激光, 其波长作为测量的基础尺度. 由于双频激光干涉仪的测量结果与双频激光器的波长直接联系, 所以双频激光器的绝对频率及其频率稳定度决定了干涉仪的测量精确度. 为实现纳米量级的测量精确度, 双频激光器输出激光的绝对频率需精确到 10 MHz, 1 h 频率相对稳定度需达到 1×10^{-9} , 在光刻等某些高精度微纳加工领域甚至需要更高的相对稳定性. 所以, 在双频激光器研制过程中, 需对其绝对频率及稳定度进行精确测量.

$^{127}\text{I}_2$ 吸收稳频 He-Ne 激光是国际计量委员会推荐的实施米定义的 12 种稳频激光谱线之一, 其频率相对不确定度为 2.1×10^{-11} ^[2]. He-Ne 激光器

频率测量通常是通过与 $^{127}\text{I}_2$ 吸收稳频 He-Ne 激光器拍频获得, 但是 $^{127}\text{I}_2$ 吸收稳频 He-Ne 激光器对温度和振动等噪声非常敏感, 该系统对测量环境有着苛刻要求. 飞秒光频梳^[3-5](简称“光频梳”)的出现解决了光学频率直接精密测量的问题, 使得激光频率测量结果可直接溯源至具有更高精确度的时间频率基准. 光频梳直接建立了微波频率基准与光波频率的联系, 锁定至微波频率基准的光频梳相比现有稳定激光具有更高的频率稳定度, 且其光谱范围可覆盖可见至近红外区域, 光频梳有望成为取代现有稳频激光的下一代光频基准^[6-9]. 随着光纤飞秒锁模激光器的发展, 光纤光频梳^[10-12]已经实现商品化, 相比传统的钛-蓝宝石光频梳^[13]其具有价格低廉、结构紧凑和稳定性好等优势. 尽管光频梳在光学频率测量方面具有显著优势, 但是由于双频 He-Ne 激光的正交偏振特性, 如果直接利用光频梳对其频率进行测量会极大地增加系统难度.

本实验建立了一套基于商品光纤飞秒光频梳的双频 He-Ne 激光器的绝对频率及其频率稳定度测量系统, 先将外腔可调谐半导体激光器 (ECDL)

* 清华大学自主科研计划 (批准号: 2009THZ06057) 和国家自然科学基金 (批准号: 51105227) 资助的课题.

[†] E-mail: wu-xj09@mails.tsinghua.edu.cn

锁定至光频梳, 再利用 ECDL 与双频 He-Ne 激光进行拍频以实现对两路正交偏振激光频率的同时高信噪比测量. 建立了将 ECDL 锁定至任意光频梳梳齿的自动控制系统, 锁定后的 ECDL 具有与光频梳相同的频率稳定度. 利用 ECDL 的绝对频率和拍频频率, 计算得到了双频 He-Ne 激光器的绝对频率均值及其频率稳定度, 并评估了双频频差均值及其标准偏差. 选用铷钟作为系统频率基准, 频率测量结果具有可溯源性.

2 ECDL 锁定至光频梳

飞秒光频梳是将飞秒锁模激光的重复频率 (f_r) 和偏置频率 (f_o) 分别锁定至微波频率基准, 从而在时域上获得一系列等间隔的飞秒脉冲, 在频域上获得一系列等间隔的光频梳齿^[3,4]. 对于第 N 个光梳齿, 其频率可表示为

$$f_N = N \times f_r \pm f_o, \quad (1)$$

其中, f_o 的符号由光频梳系统的频率锁定参数决定. 因此, 对于任意 1 个光梳齿, 可被视为 1 个稳频激光谱线, 其频率可溯源至微波频率基准. 采用偏频锁定方式可将 ECDL 锁定至任意光频梳梳齿, 可获得具有相同频率稳定度的连续波激光.

图 1 为 ECDL 锁定至光频梳实验系统图. 基于 Littman 结构的 ECDL (New Focus, TLB6904) 中心波长为 632.991 nm, 频率可调谐范围为 120 GHz, 输出激光经光隔离器和光纤准直器后进入保偏光纤, 经 1×3 保偏光纤耦合器被分为 3 路, 其中 1 路功率约为 0.2 mW 进入波长计, 另 2 路功率各约为 0.8 mW 分别用于与光频梳和双频 He-Ne 激光进行拍频. 光纤光频梳 (Menlo System, FC1500-250) 输出的飞秒激光中心波长为 1560 nm, 脉冲宽度小于 100 fs, 经掺铒光纤放大器后飞秒激光中心波长为 1266 nm, 再经周期性极化铌酸锂晶体倍频后飞秒激光中心波长为 633 nm, 光谱宽度 3 nm, 功率约为 3 mW. 为提高 ECDL 与光频梳拍频信号的信噪比, 采用 $1/2$ 波片和偏振分光立方体组成的合光光路, 旋转 $1/2$ 波片的方向可改变 ECDL 和光频梳用于拍频的光功率. ECDL 与光频梳合光后再由光栅 (1700 线/mm) 进行梳齿滤波, 经平面反射镜反射后, ECDL 激光及与其频率相邻的光频梳梳齿入射至雪崩光电二极管, 获得的拍频信号 (f_b) 信噪比约

为 30 dB. ECDL 与光频梳拍频信号经放大和滤波处理后与 20 MHz 频率综合器信号鉴相后形成误差信号, 该误差信号经比例积分 (PI) 控制器后反馈至 ECDL 激光的电流调制端, 从而实现了 ECDL 与光频梳梳齿之间偏置 20 MHz 的频率锁定.

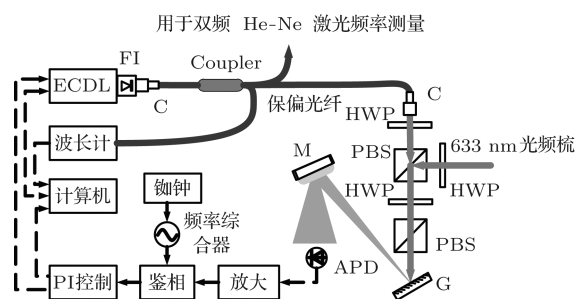


图 1 ECDL 锁定至光频梳实验系统图 FI 为光隔离器; C 为光纤准直器; Coupler 为 1×3 保偏光纤耦合器; HWP 为 $1/2$ 波片; PBS 为偏振分光立方体; G 为光栅; M 为平面反射镜; APD 为雪崩光电二极管

通过电流调制方式将 ECDL 锁定至光频梳, 受限于电流调制所控制的激光频率范围, 该方法所控制的频率漂移范围有限. 为了消除 ECDL 频率长期漂移所导致的失锁, 建立了自动补偿 ECDL 压电陶瓷电压的控制系统. 如图 1 所示, 计算机控制 ECDL 的工作电流和压电陶瓷电压, 并同时监测 PI 控制器反馈至 ECDL 用于电流调制的电压信号. 当 PI 控制器输出电压超过 ± 3 V 时, 由软件控制自动调整压电陶瓷工作电压 ± 0.1 V, 使得 PI 控制器输出电压返回至 ± 1 V. 由此, 将电流调制的短期频率锁定与压电陶瓷的长期频率漂移补偿相配合, 实现了 ECDL 对任意光频梳梳齿的长期频率锁定.

本系统中的光频梳 f_r 锁定至 250 MHz, f_o 锁定至 20 MHz, 且频率基准由铷钟 (Symmetri-com, 8040C) 提供, 其平均时间 1 s 的相对稳定度为 2.4×10^{-12} . 将 ECDL 锁定至光频梳后, ECDL 的绝对频率可表示为

$$f = N \times f_r \pm 2 \times f_o \pm f_b, \quad (2)$$

其中, f_o 的系数是由光频梳经 1266 nm 至 633 nm 的倍频过程所引入, f_r , f_o 和 f_b 的值可由频率计直接测得, 光频梳梳齿整数 N 可由波长计测得, 式中的符号可通过对比各拍频信号的相对值而确定. 为了获得正确的梳齿整数 N , 要求波长计的测量精度应优于 $f_r/2$, 本系统使用的波长计 (High Finesse,

WS-7) 的频率测量精度为 60 MHz, 满足对 ECDL 频率进行频率粗测的要求.

选择光频梳第 1894449 个梳齿锁定 ECDL, f_b 锁定至 20 MHz, 且 f_o 和 f_b 均为负号. 采样时间为 1 s, 共采样 8000 点, 由 (2) 式计算得到 ECDL 频率均值为 473612190000.0 kHz, 标准偏差为 0.7 kHz. 图 2 所示为 ECDL 频率相对 Allan 标准偏差, 1 s 平均时间的相对 Allan 标准差为 1.7×10^{-12} , 1024 s 平均时间的相对 Allan 标准差降至 1.5×10^{-15} , 表明 ECDL 频率已溯源至铷钟频率基准. ECDL 锁定至光频梳的频率不确定度来源包括: 第 1894449 个梳齿的频率不确定度, ECDL 跟踪梳齿的频率不确定度和铷钟的频率引入的 B 类不确定度. 对于 1 s 采样时间, 第 1894449 个梳齿的频率不确定度为 1.4 kHz; ECDL 跟踪梳齿的频率不确定度为 0.7 Hz, 可忽略不计; 铷钟的频率引入的 B 类不确定度为 2.3 kHz. 由此可得, 锁定后 ECDL 的绝对频率为 473612190000.0 ± 2.7 kHz, 相对不确定度为 5.7×10^{-12} .

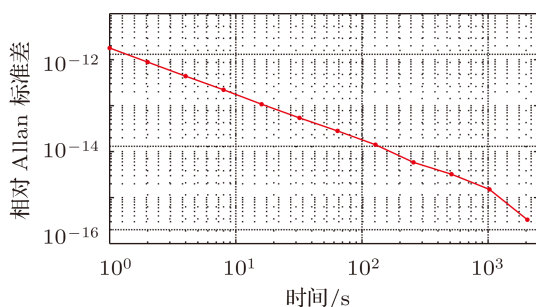


图 2 ECDL 频率相对 Allan 标准差

3 双频 He-Ne 激光频率测量

待测双频 He-Ne 激光器 (Agilent, 5517B) 的输出激光为两路空间重合的正交线偏振激光, 水平方向偏振激光频率为 f_1 , 竖直方向偏振激光频率为 f_2 , 且 f_1 小于 f_2 , 频差约为 2 MHz. 该待测激光波长名义值为 632.99137 nm, 波长精确度优于 $\pm 1 \times 10^{-7}$, 1 h 时间内的波长稳定度优于 $\pm 2 \times 10^{-9}$.

ECDL 与双频 He-Ne 激光拍频实验系统如图 3 所示. ECDL 激光经光纤准直器输出后为线偏振激光, 经 1/2 波片旋转偏振态使得经偏振分光立方体透射和反射的光共功率均约为 0.2 mW. 待测 He-Ne

激光器输出的正交线偏振激光分别经偏振分光立方体透射和反射, 其光功率均约为 0.3 mW. ECDL 激光分别与双频 He-Ne 激光的正交偏振激光经偏振片后获得相同的偏振分量而拍频, 探测器得到的拍频信号分别为 $f_1 - f$ 和 $f_2 - f$, 拍频信噪比均优于 30 dB, 功率均约为 -20 dBm, 由频率计直接测量该频率. 开始频率测量时, 双频 He-Ne 激光已经过充分预热, 达到稳频状态, 实验过程中环境温度变化在 $23.5^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$ 范围内.

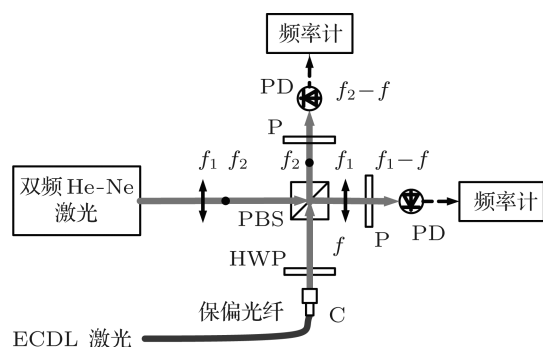


图 3 ECDL 与双频 He-Ne 激光拍频实验系统 PBS 为偏振分光立方体; P 为偏振片; PD 为光电探测器; HWP 为 1/2 波片; C 为光纤准直器

图 4 为 ECDL 与 f_1 和 f_2 的拍频频率值, 采样时间为 1 s. ECDL 与 f_1 拍频均值为 39.934 MHz, 标准偏差为 56 kHz, 极差为 286 kHz; ECDL 与 f_2 拍频均值为 42.111 MHz, 标准偏差为 56 kHz, 极差为 289 kHz. 由于 ECDL 激光频率小于双频 He-Ne 激光频率, 则水平方向偏振激光频率 f_1 的绝对频率均值为 473612229934 kHz, 对应波长均值为 632.991377866 nm, 竖直方向偏振激光频率 f_2 的绝对频率均值为 473612232111 kHz, 对应波长均值为 632.991374957 nm. 图 5 所示为双频 He-Ne 激光频率相对 Allan 标准差, 正交偏振激光率相对 Allan 标准差曲线完全重合, 具有相同的频率稳定度. 平均时间 1 s 的相对 Allan 标准差为 3.3×10^{-11} , 平均时间为 8 s 的相对 Allan 标准差最低为 5.8×10^{-12} , 平均时间为 1024 s 的相对 Allan 标准差为 5.2×10^{-11} .

利用已测得的正交偏振激光频率 f_1 和 f_2 相减可计算得到双频 He-Ne 激光频差曲线, 如图 6 所示. 双频频差均值为 2.177 MHz, 标准偏差为 2 kHz, 极差为 9 kHz. 测量频率所使用的计数器的时钟已与铷钟基准同步, 频率测量结果可溯源.

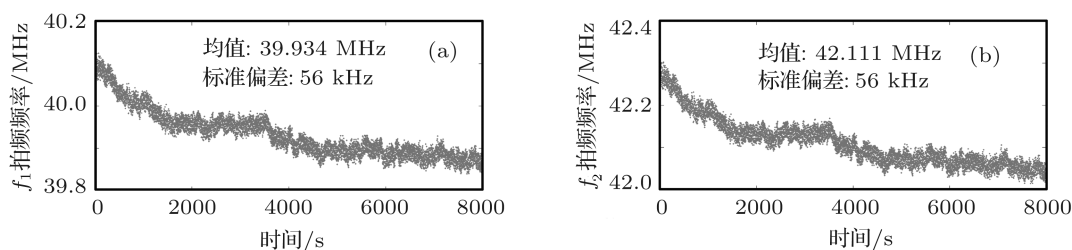
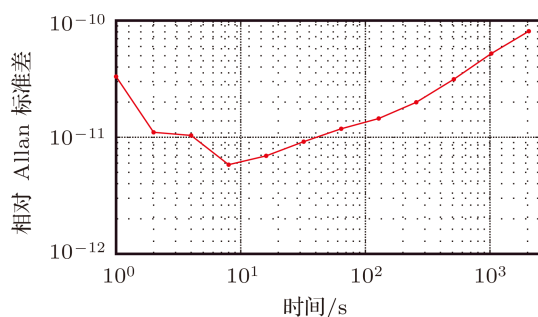
图4 (a) ECDL 与 f_1 拍频频率值; (b) ECDL 与 f_2 拍频频率值

图5 双频 He-Ne 激光频率相对 Allan 标准差

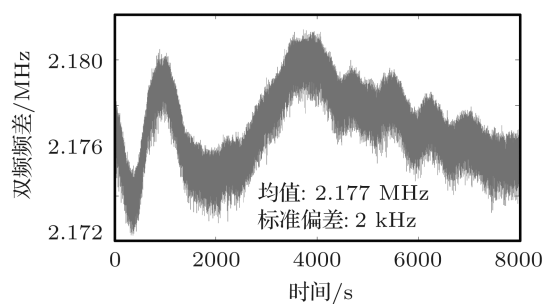


图6 双频 He-Ne 激光频差曲线

4 结论

为了测量双频 He-Ne 激光器的绝对频率和频率稳定度, 建立了一种新的基于飞秒光频梳的频率测量系统, 通过将 ECDL 锁定至光频梳将其频率溯源至铷钟频率基准, 再由 ECDL 与双频 He-Ne 激光器输出的两路正交偏振激光进行拍频, 实现了两路正交偏振激光频率的同时测量. 选用商品双频 He-Ne 激光器进行测量实验, 将 ECDL 锁定至光频梳第 1894449 个梳齿, 其绝对频率为 473612190000.0 ± 2.7 kHz, 相对不确定度为 5.7×10^{-12} . 测得的双频 He-Ne 激光器的水平

方向偏振激光频率均值为 473612229934 kHz, 对应波长均值为 632.991377866 nm, 垂直方向偏振激光频率均值为 473612232111 kHz, 对应波长均值为 632.991374957 nm. 双频 He-Ne 激光平均时间为 1 s 的相对 Allan 标准差为 3.3×10^{-11} , 平均时间为 1024 s 的相对 Allan 标准差为 5.2×10^{-11} . 利用已测得的正交偏振激光的绝对频率, 计算得到双频频差为 2.177 MHz, 标准偏差为 2 kHz. 由于光纤飞秒光频梳对温度和振动等噪声不敏感, 且 ECDL 的输出频率通过主动工作电流和压电陶瓷电压控制方式锁定至光频梳, 本系统可适用于双频 He-Ne 激光器在工业应用环境中测量.

- [1] Zhang S L 2005 *Principles of Orthogonal Polarized Laser* (Beijing: Tsinghua University Press) pp41–46 (in Chinese) [张书练 2005 正交偏振激光原理 (北京: 清华大学出版社) 第 41—46 页]
- [2] Quinn T J 2003 *Metrologia* **40** 103
- [3] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stenz A, Windler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [4] Udem T, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [5] Li T C, Fang Z J 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 709 (in Chinese) [李天

初, 方占军 2011 科学通报 **56** 709]

- [6] Madej A A, Bernard J E, Robertsson L, Ma L S, Zucco M, Windeler R S 2004 *Metrologia* **41** 152
- [7] Ma L S, Robertsson L, Picard S, Chartier J M, Karlsson H, Prieto E, Windeler R S 2003 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52** 232
- [8] Lea S N, Rowley W R, Margolis H S, Barwood G P, Huang G, Gill P, Chartier J M, Windeler R S 2003 *Metrologia* **40** 84
- [9] Yi L, Yuan J, Qi X H, Chen W L, Zhou D W, Zhou T, Zhou X J, Chen X Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1409

- [10] Fang Z J, Wang Q, Wang M M, Meng F, Lin B K, Li T C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5684 (in Chinese) [方占军, 王强, 王民明, 孟飞, 林百科, 李天初 2007 物理学报 **56** 5684]
- [11] Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Meng F, Zhang Z G, Fang Z J, Li T C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 080601 (in Chinese) [曹士英, 蔡岳, 王贵重, 孟飞, 张志刚, 方占军, 李天初 2011 物理学报 **60** 080601]
- [12] Meng F, Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Cao J P, Li T C, Fang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100601 [孟飞, 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 曹建平, 李天初, 方占军 2011 物理学报 **60** 100601]
- [13] Han H N, Zhang W, Wang P, Li D H, Wei Z Y, Shen N C, Nie Y X, Zhang S G, Li S Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2760 (in Chinese) [韩海年, 张炜, 王鹏, 李德华, 魏志义, 沈乃澈, 聂玉昕, 张首钢, 李师群 2007 物理学报 **56** 2760]

Frequency measurement of dual frequency He-Ne laser based on a femtosecond optical frequency comb*

Wu Xue-Jian[†] Wei Hao-Yun Zhu Min-Hao Zhang Ji-Tao Li Yan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 24 November 2011; revised manuscript received 1 January 2012)

Abstract

A frequency measurement system for dual frequency He-Ne laser is set up based on a fiber femtosecond optical frequency comb and an external cavity diode laser. Using a Rb clock as a frequency standard, the diode laser that is locked to the optical frequency comb is traced to the Rb clock, and then the frequencies of the orthogonal polarized lasers are measured by beating with the locked diode laser at the same time. Locking the diode laser to the 1894449 th comb mode, the absolute frequency of the diode laser is 473612190000.0 ± 2.7 kHz, with a relative frequency uncertainty of 5.7×10^{-12} . A commercial dual frequency He-Ne laser is measured to test the system, and the results show that the mean absolute frequencies of the horizontal polarized laser and the vertical polarized laser are 473612229934 kHz and 473612232111 kHz, respectively, with a relative Allan deviation of 5.2×10^{-11} at 1024 s, and the mean split frequency is 2.177 MHz with a standard deviation of 2 kHz.

Keywords: measurement, laser frequency, optical frequency comb, dual frequency laser

PACS: 06.20.-f, 06.30.Ft, 42.62.Eh, 42.60.-v

* Project supported by the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China (Grant No. 2009THZ06057) and Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51105227).

[†] E-mail: wu-xj09@mails.tsinghua.edu.cn