

利用光频梳提高台阶高度测量准确度的方法*

张继涛[†] 吴学健 李岩 尉昊赞

(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8月18日收到; 2011年10月8日收到修改稿)

提出一种利用光频梳和可调谐半导体激光器提高台阶高度测量准确度的方法. 通过将可调谐激光器锁定至光频梳, 可对激光器的输出波长进行精确锁定与测量. 基于可调合成波长链原理, 利用锁定后的半导体激光器构建了一套台阶高度测量方案, 该方案可消除合成波长误差对台阶高度测量不确定度的影响. 采用一台可调谐半导体激光器和光频梳进行了 5000 s 的连续锁定实验, 结果表明, 锁定后的可调谐半导体激光器的频率稳定度达 1.8×10^{-12} . 该方法的理论测量不确定度约为 7.9 nm, 且测量结果可溯源至时间频率基准.

关键词: 台阶高度, 光频梳, 可调谐半导体激光器, 合成波长

PACS: 06.30.Bp, 07.60.Ly, 81.70.Fy, 06.20.-f

1 引言

台阶高度测量是纳米技术领域重要的研究方向之一, 研究可以溯源的台阶高度测量方法并参与国际比对也是建立我国纳米量值溯源体系的迫切需要. 通常待测的台阶高度为几百微米, 甚至达到毫米量级, 同时要求测量分辨率达到纳米量级. 基于光学原理实现的测量方法因具有非接触、无破坏的特点而经常被应用于台阶测量. 常见的测量方法包括增量式干涉测量、干涉显微镜、光学探针、绝对距离干涉测量等^[1-4]. 其中增量式干涉测量只能对高度在 $1/2$ 波长范围内的台阶进行测量, 难以满足一般的台阶测量要求; 光学探针尽管测量精度很高, 但测量速度较慢, 效率不高; 干涉显微镜综合了干涉仪和显微镜的优点, 可用于直接观察待测表面, 但由于测量范围通常仅限于波长量级, 最大也只有微米量级, 因此仅适用于表面形貌的分析; 而合成波长原理实现的绝对距离干涉测量方法具有测量范围大、测量精度高、无需导轨、测量结果可溯源等优点, 与台阶高度的测量需求非常契合, 因而被广泛研究^[5-9]. 早期的合成波长法主要使用多支激光器的单个波长或单支激光器的多个波长

构建合成波长链, 但由于激光器只能输出某些特定的波长, 因此难以构建合适的合成波长, 从而限制了应用范围. 本实验室曾提出一种基于可调合成波长链原理进行台阶高度测量的方案^[10], 该方案通过可调谐半导体激光器 (TDL) 输出多个波长, 并构建出一系列可调合成波长链, 可在毫米量级的测量范围内实现纳米量级的测量不确定度. 然而, TDL 的可调谐特性对测量的不利影响也是显而易见的. 一方面, 合成波长法要求所使用的波长具有较高的波长稳定度, 但 TDL 自身的波长稳定度往往较差, 通常需要将其锁定至外部参考源 (如稳频激光器, Fabry-Perot 标准具等) 进行稳频. 由于外部参考源的带宽有限, TDL 无法在整个调谐范围内实现锁定, 这实际上大大限制了 TDL 的有效调谐范围. 另一方面, 该方法需要预先测得波长值作为测量的输入参数, 通常使用波长计测量 TDL 的输出波长, 但目前波长计的相对测量不确定度仅约为 10^{-7} , 使得波长测量误差成为合成波长法的最大误差源之一, 限制了台阶高度测量准确度^[11].

飞秒光学频率梳 (简称“光频梳”) 是一种新的光源, 具有其他传统连续波稳频激光光源不可比拟的优点: 1) 输出光谱范围覆盖可见光与近红外区

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

[†] E-mail: zjt@mail.tsinghua.edu.cn

域, 超过一个光学倍频程; 2) 可输出数十万个稳定的、等间隔的光学频率列; 3) 它类似光学齿轮, 可把难以直接测量的光学频率变频到较易测量的微波频率上, 测量结果可溯源至时间频率基准^[12-15]. 基于光频梳的上述特点, 本文提出了利用锁定至光频梳的 TDL 进行台阶高度测量的方法, 该方法可解决基于 TDL 的合成波长台阶高度测量方法存在的问题, 消除测量中的最大误差源之一, 从而有效提高台阶高度测量的准确度.

2 测量原理

2.1 可调合成波长链测量台阶高度

图 1 示出了利用可调合成波长链测量台阶高度的原理光路图. 锁定至光频梳的 TDL 发出的光束经整形后分成两部分, 一部分进入波长计, 用于测量波长值, 其余部分被 PBS1 分成两束偏振态正交的线偏振光, 两束偏振光的强度比通过旋转 HWP 调节. 经 AOM1 和 AOM2 外差调制后在 BS2 处合光, 一路被 D1 接收作为参考信号, 另一路被 PBS2 分光后分别被待测台阶的两个表面反射, 利用 Fresnel 棱体可在较宽的波段范围内实现 $\lambda/4$ 的相位延迟, 反射光在 PBS2 处产生干涉, 被 D2 接收作为测量信号, 利用 PM 即可测量 D1, D2 信号的相位差.

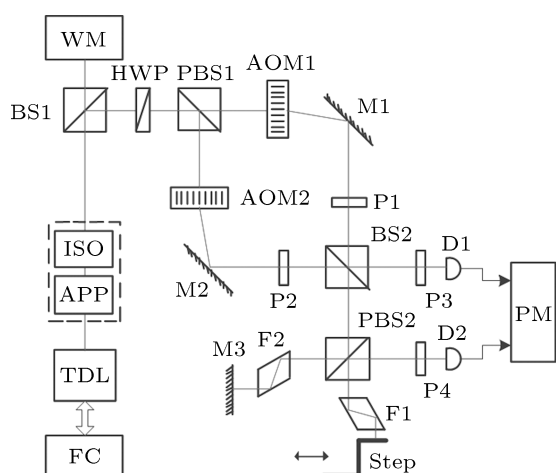


图 1 台阶高度测量原理示意图 FC, 光频梳; TDL, 可调谐半导体激光器; APP, 整形棱镜对; ISO, 光束隔离器; BS1, BS2, 分光棱镜; WM, 波长计; HWP, 半波片; PBS1, PBS2, PBS3, 偏振分光棱镜; AOM1, AOM2, 声光移频器; M1, M2, M3, 反射镜; P1, P2, P3, P4, 偏振片; D1, D2, 探测器; PM, 相位计; WP1, WP2, $\lambda/4$ 波片; F1, F2, Fresnel 棱体; Step, 待测台阶

根据可调合成波长链原理^[9], 假设待测台阶高

度为 d , 则有

$$2d = \lambda_i(m_i + \varepsilon_i), \quad (1)$$

其中, λ_i 是 TDL 的第 i 个调谐波长, m_i 和 ε_i 是对应的干涉级次的整数和小数部分.

若连续调谐 TDL 输出 $N+1$ 个工作波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N+1}$, 根据可调合成波长链的原理, 可以构建 N 个合成波长链 $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \dots, \lambda_{sN}$, 其中

$$\frac{1}{\lambda_{si}} = \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{i+1}} \quad (i = 1, \dots, N), \quad (2)$$

且 $\lambda_{s1} > \lambda_{s2} > \dots > \lambda_{sN} > 0$.

根据 (1) 和 (2) 式, 在实际测量过程中, 由于前级合成波长的测量范围大于后级, 因此可将前级的测量结果作为后级的粗测值, 通过逐级精化, 即可得到最终的测量结果. 为了满足测量范围需求, 应使 λ_{s1} 大于待测距离; 同时, 为避免逐级精化过程中出现多义值, 应保证前级的测量不确定度小于后级测量范围的二分之一.

2.2 TDL 锁定至光频梳

光频梳在时域上表现为重复频率稳定的飞秒脉冲激光, 在频域上则表现为频率间隔恒定的激光梳齿, 其中梳齿间隔称为重复频率 f_r , 零点校准频率称为偏置频率 f_0 , 二者数值都在微波频段. 将 f_r 和 f_0 分别锁定至时间频率基准后, 光频梳在频域内可视为一把具有极高准确度的激光频率标尺, 其第 n 个梳齿的频率可表示为 $f_n = nf_r + f_0$. 光频梳可对其输出光谱范围内的激光频率进行绝对测量, 也可通过偏频锁定方式锁定其他工作激光器的频率, 从而实现激光器频率的溯源.

利用光频梳锁定 TDL 的原理如图 2 所示.

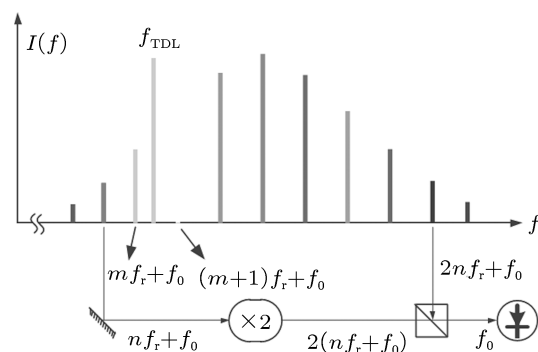


图 2 光频梳锁定 TDL 原理图

要产生稳定的激光梳齿, 光频梳的 f_r 和 f_0 首先需要锁定至外部参考源. f_r 的锁定, 使用光电探

测器直接探测光频梳的输出激光即可得到 f_r , 利用电子锁相环反馈电路, 可将其锁定至外部参考源 f_0 的锁定, 取输出激光的一部分经光子晶体光纤进行光学倍频程后, 进入自参考拍频探测单元, 脉冲激光被分为等功率的两路, 其中一路经滤波后提取第 $2n$ 个梳齿的激光, 另一路经滤波后提取第 n 个梳齿的激光并经二倍频处理, 两路激光合光后入射至光电探测器产生拍频信号, 该信号经电子系统处理后形成反馈信号控制锁模激光器的腔长, 使得偏置频率 f_0 锁定至频率基准. 此时光频梳便可产生稳定且具有可溯源性的频率输出, 从而可用它锁定 TDL. 使用光电探测器探测 TDL 输出激光 f_{TDL} 与光频梳相邻的第 m 个和第 $m+1$ 个梳齿的拍频信号 f_{beat1} 和 f_{beat2} , 经滤波后将低频拍频信号通过偏频锁定方式锁定至外部参考源, 即可实现 f_{TDL} 的锁定. 在锁定 f_{TDL} 后, 根据拍频信号还可计算得到 TDL 的绝对频率值 $f_{TDL} = Nf_r \pm f_0 \pm f_{beat}$. 其中 f_{beat} 为 TDL 工作频率与第 N 个梳齿的拍频, N 的值可通过调谐重复频率 f_r 或使用波长计粗测得到. 铯 (Cs) 原子钟是目前国际时间频率基准, 频率稳定度优于 10^{-15} , 选用其作为光频梳的外部参考源可使得 f_{TDL} 具有同等量级的频率稳定度, 并可实现频率的溯源. 但由于 Cs 原子钟系统非常复杂, 实际应用中通常选用商用铷钟作为光频梳的外部参考源. 商用铷钟在 1 s 内的频率稳定度优于 1.5×10^{-11} .

目前利用稳频激光器或超稳 Fabry-Perot 腔可将 TDL 锁定至 10^{-11} 甚至 10^{-15} 量级 [16,17], 但由于稳频激光器的带宽有限, 无法在 TDL 的调谐范围内均实现锁定, 而基于 Fabry-Perot 腔的锁定系统非常复杂, 且无法实现频率溯源. 另外, 现有方法通常使用波长计测量 TDL 的输出波长 [9,10], 但目前商用波长计的相对测量不确定度仅为 10^{-7} , 大大限制了台阶测量的准确度. 将 TDL 锁定至光频梳, 可同时实现 TDL 的波长精确锁定与测量, 波长测量的精度比现有方法高几个数量级, 且可将 TDL 输出波长直接溯源至时间频率基准. 因此, 该方法可有效提高台阶高度的测量准确度.

3 实验及结果

使用光频梳 (FC1500-250 Menlo System) 和外腔可调谐半导体激光器 (TLB6904 NewFocus) 进

行了锁定实验. 选用铷钟作为外部参考源, 它的频率输出精度优于 $\pm 5 \times 10^{-11}$, 频率复现性优于 $\pm 2 \times 10^{-11}$, 1 s 时的频率稳定度为 2×10^{-12} . FC1500-250 的重复频率为 250 MHz, 当外部参考源的频率准确度和稳定度均优于 10^{-14} 时, 光频梳的频率准确度最高可达 10^{-14} , 1 s 内的稳定度最高可达 5×10^{-13} . 输出光谱范围 (530—900) nm, 平均输出功率大于 60 mW. TLB6904 是基于光栅稳频的外腔可调谐半导体激光器, 尾纤激光输出功率大于 2 mW, 中心波长 633 nm, 无跳模调谐范围约为 120 GHz, 50 ms 激光线宽优于 300 kHz. 在自由运转状态下, 激光频率受环境温度、振动等的影响会出现较大波动.

光频梳锁定 TDL 的实验原理如图 3 所示.

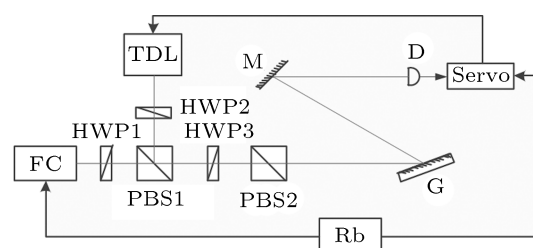


图 3 锁定实验原理图 FC, 光频梳; HWP1, HWP2, HWP3, 半波片; PBS1, PBS2, 偏振分光棱镜; TDL, 可调谐半导体激光器; M, 反射镜; G, 光栅; D, 探测器; Servo, 电子反馈控制线路; Rb, 铷钟信号源

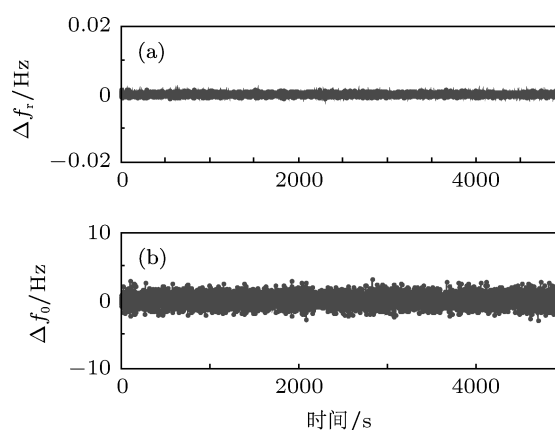


图 4 光频梳频率稳定性实验结果 (a) 重复频率的绝对变化量 Δf_r ; (b) 偏置频率的绝对变化量 Δf_0

锁定至铷钟的光频梳 FC 和 TDL 在 PBS1 处合光后, 经过光栅 G 和反射镜 M 后被探测器 D 探测得到拍频信号, 经与铷提供参考信号比较后得到控制信号, 通过电子反馈系统控制 TDL 的腔长, 从而实现 TDL 的锁定. 设置光频梳重复频率 $f_0 = 250$ MHz, 偏置频率 $f_r = 20$ MHz, 共进行

了 5000 s 的连续锁定实验, 实验结果如图 4 和图 5 所示.

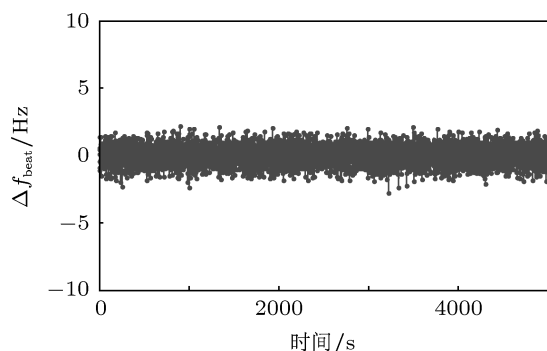


图 5 TDL 锁定至光频梳的实验结果 Δf_{beat} 为拍频率的绝对变化量

利用阿伦方差计算可得 TDL 锁定后的频率稳定度, 结果如图 6 所示. 可知采样时间 1 s 时 TDL 的频率稳定度为 1.8×10^{-12} .

同时, 根据 $f_{\text{TDL}} = N f_r \pm f_0 \pm f_{\text{beat}}$, 还可计算得到 TDL 输出激光的平均频率 $f_{\text{TDL}} = (473751060000.0 \pm 0.7)$ kHz, 对应波长 $\lambda_{\text{TDL}} = (633.2439657232 \pm 9 \times 10^{-10})$ nm.

由 (1) 式可知, 利用可调合成波长链进行台阶高度测量的不确定度公式可描述为

$$\frac{u_d}{d} = \left[\left(\frac{u_{\lambda_s}}{\lambda_s} \right)^2 + \left(\frac{u_{\varepsilon_s}}{m_s + \varepsilon_s} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

TDL 波长测量不确定度和波长不稳定度导致合成波长 λ_s 产生误差, 从而引起台阶高度测量误差. 根据本实验室前期工作对测量不确定度的分析^[10], 波长计的测量不确定度为 1×10^{-7} , 测相精度为 0.1° , 在 1 mm 的测量范围内距离的测量不确定度约为 11.9 nm. 当将 TDL 锁定至光频梳后, 对

台阶测量不确定度评估时所做的近似处理仍然成立, 若保持其他条件不变, 可使距离的测量不确定度改善至 7.9 nm, 此时, 波长误差对台阶高度测量不确定度的贡献几乎为零. 同时, 该方法还提供了一种将距离测量结果实现计量学溯源的途径. 如果使用当前的时间/微波频率基准——Cs 原子钟作为外部参考源, 则可将台阶高度的测量结果溯源至时间频率基准.

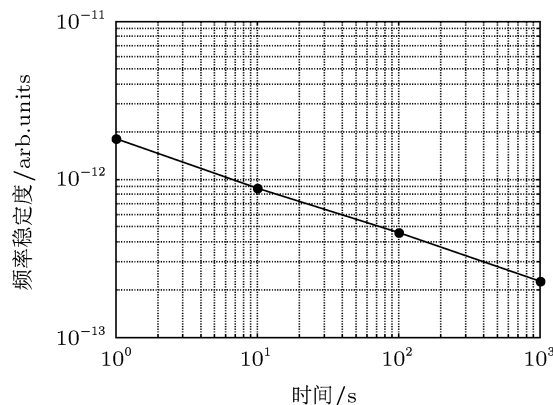


图 6 TDL 锁定后的频率稳定度

4 结论

在传统基于 TDL 的可调合成波长链绝对距离测量技术基础上, 结合光频梳的光学特性, 提出了将 TDL 锁定至光频梳后进行台阶高度测量的方法. 该方法可同时实现 TDL 波长的高精度锁定与测量, 消除了传统测量方法中的主要误差源之一 (波长测量误差), 可提高台阶高度测量的准确度, 并可使台阶高度测量结果溯源至时间频率基准, 具有计量学意义.

[1] Gale D M, Pether M I, Dainty J C 1996 *Appl. Opt.* **35** 131
 [2] Lin D, Liu Z, Yan J, Yin C, Xu Y 2001 *Appl. Opt.* **43** 1472
 [3] Liang R, Li D C, Cao M, Zhao H Z, Wu Y J 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 958 (in Chinese) [梁嵘, 李达成, 曹芒, 赵洪志, 武勇军 1999 光学学报 **19** 958]
 [4] Bosch T, Lescure M 1995 *Selected Papers on Laser Distance Measurement, SPIE Milestone Series* (Bellingham: SPIE Optical Engineering Press) p533
 [5] Tiliford C R 1977 *Appl. Opt.* **16** 1857
 [6] Upputuri P K, Mohan N K, Kothiyal M P 2009 *Opt. Eng.* **48** 4073603
 [7] Liang J, Long X W, Zhang B, Jin S L 2010 *Acta Opt. Sin.* **10** 2947 (in Chinese) [梁晶, 龙兴武, 张斌, 金世龙 2010 光学学报 **10** 2947]
 [8] Kikuta H, Iwata K, Nagata R 1986 *Appl. Opt.* **25** 2976
 [9] Yin C, Chao Z, Lin D, Xu Y, Xu J 2002 *Opt. Eng.* **41** 746
 [10] Jiang T G, Li Y, Wang X, Zhang S L 2005 *Laser & Infrared* **35** 518 (in Chinese) [蒋天罡, 李岩, 王昕, 张书练 2005 激光与红外 **35** 518]
 [11] Wang X, Li Y, Zhang S L 2007 *Appl. Opt.* **46** 5631
 [12] Cundiff S T, Ye J 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 325
 [13] 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]
 [14] Han H N, Zhang W, Wang P, Li D H, Wei Z Y, Shen N C, Nie Y

- X. Gao Y P, 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, 沈乃激, 聂玉昕, 高玉平, 张首刚, 李师群 2007 物理学报 **56** 2760]
- [15] Cao S Y, Fang Z J, Meng F, Wang Q, Li T C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 080601 (in Chinese) [曹士英, 方占军, 孟飞, 王强, 李天初 2011 物理学报 **60** 080601]
- [16] Zhou T, Qi X H, Wang Q, Xiong W, Duan J, Zhou X J, Chen X Z 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 496
- [17] Zhao Y N, Zhang J, Stuhler J, Schuricht G, Lison F, Lu Z H, Wang L J 2010 *Opt. Commun.* **283** 4696

Method for improving the accuracy of step height measurement based on optical frequency comb*

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

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

(Received 18 August 2011; revised manuscript received 8 October 2011)

Abstract

An improved method of step height measurement by optical frequency comb and tunable diode laser is presented. The tunable diode laser is phase locked to the optical frequency comb, so that the output wavelength of the laser can be locked and measured in a high accuracy. Based on the principle of variable synthetic wavelength chain, the step height can be measured by tuning the wavelength of the locked tunable diode laser. This method can be used to eliminate the effect of the synthetic wavelength error on the measurement uncertainty of the step height. The stability of the phase locked laser is tested by locking a tunable diode laser to an optical frequency comb for about 5000 s. It is shown that the frequency stability of the phase locked laser is 1.8×10^{-12} . The uncertainty of the step height measurement by this method is estimated to be 7.9 nm accordingly. Moreover, the measurement result of the step height can be traced to the time and frequency standard.

Keywords: step height, optical frequency comb, tunable diode laser, synthetic wavelength

PACS: 06.30.Bp, 07.60.Ly, 81.70.Fy, 06.20.-f

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

[†] E-mail: zjt@mail.tsinghua.edu.cn