

## 基于飞秒光频梳的压电陶瓷闭环位移控制系统\*

朱敏昊<sup>†</sup> 吴学健 尉昊赞 张丽琼 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)

(2012年10月27日收到; 2012年11月29日收到修改稿)

利用飞秒光频梳、外腔可调谐半导体激光器和法布里-珀罗干涉仪建立了一套压电陶瓷亚纳米级闭环位移控制系统. 将可调谐半导体激光器锁定至光频梳, 通过精确调谐光频梳的重复频率, 实现了半导体激光器在其工作频率范围内的精密调谐. 利用 Pound-Drever-Hall 锁定技术将带有压电陶瓷的法布里-珀罗腔锁定至半导体激光器, 进而通过频率发生系统控制压电陶瓷产生亚纳米级分辨率的位移. 实验研究发现锁定至光频梳后可调谐半导体激光器 1 s 的 Allan 标准偏差为  $1.68 \times 10^{-12}$ , 将其在 30.9496 GHz 范围内进行连续闭环调谐, 可获得压电陶瓷的位移行程约为 4.8  $\mu\text{m}$ ; 以 3.75 Hz 的步长扫描光频梳的重复频率, 实现了压电陶瓷的 450 pm 闭环位移分辨率并测定了压电陶瓷的磁滞特性曲线. 该系统不存在非线性测量误差, 且激光频率及压电陶瓷位移均溯源至铷钟频率源.

**关键词:** 光频梳, 压电陶瓷, 法布里-珀罗腔, 可调谐半导体激光器

**PACS:** 07.60.Ly, 06.20.-f, 06.30.Bp, 42.62.Eh

**DOI:** 10.7498/aps.62.070702

## 1 引言

随着纳米科技及半导体加工工业的发展, 人们对纳米尺度的测量及操控提出了越来越严格的要求, 精密纳米定位系统的研制日益迫切<sup>[1]</sup>. 压电陶瓷驱动器 (PZT) 具有体积小、分辨率高、响应速度快、不发热、可控性好等特点, 可实现纳米甚至亚纳米量级的微小位移变化, 被广泛应用于精密定位系统. 但 PZT 自身具有磁滞、蠕变及老化等特性, 开环工作状态下存在较为严重的非线性效应<sup>[2]</sup>, 因此通常采用闭环控制的方法来提高 PZT 精密定位系统的定位精度<sup>[3,4]</sup>.

激光外差干涉仪测量精度高、测量速度快、抗干扰性强, 且测量结果具有可溯源性, 是闭环控制 PZT 定位系统的重要方法. 2003 年, Topcu 利用外差干涉仪闭环控制 PZT 位移获得了 4.945 nm 的分辨率<sup>[5]</sup>; 2005 年, Chassagne 通过对电子信号相位的控制将位移分辨率进一步提高至 260 pm<sup>[6]</sup>. 但是, 激光外差干涉仪存在周期性的非线性测量误差, 误差幅值往往达到几纳米甚至更多, 该方案无法

充分利用由电信号细分获得的高位移分辨率. 法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪是基于激光频率测量的位移干涉仪, 不存在非线性测量误差, 广泛应用于高精度的位移测量系统<sup>[7-9]</sup>. 相比激光外差干涉仪, 利用 F-P 干涉仪对 PZT 进行闭环位移控制更具优势. F-P 干涉仪进行位移测量及控制时要解决的一项重要技术是光学频率的绝对测量, 但是传统的基于稳频激光器的拍频测量方案受限于拍频的测量带宽, 将其应用于 PZT 位移控制时量程小, 且需采用复杂的控制系统, 缺乏实用性.

飞秒光学频率梳 (光频梳) 的出现为 F-P 干涉仪的进一步发展提供了新的思路. 光频梳在频率域中是由一系列光频梳齿组成的, 由于锁定至微波频率基准, 光频梳拥有比现有稳定激光更高的频率稳定度, 且光谱范围覆盖可见及近红外波段, 可实现光学频率的直接测量及任意光学频率发生<sup>[10-13]</sup>. 本文利用飞秒光频梳、外腔可调谐半导体激光器 (ECDL) 和 F-P 干涉仪建立了一套 PZT 闭环位移控制系统. 首先利用偏频锁定技术将 ECDL 的频率锁定至光频梳, 再将作为 PZT 位移传感单元的 F-P 腔锁定至 ECDL, 通过调谐光频梳的重复频率, 可精确

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 51105227, 61205147) 和清华大学自主科研计划资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhuhm10@mails.tsinghua.edu.cn

控制 ECDL 的绝对频率, 进而实现对 PZT 位移的闭环控制, 与外差干涉仪相比不存在周期性非线性的测量误差. 理论分析表明, PZT 的闭环控制最大行程正比于 ECDL 的调谐范围, 其位移分辨率反比于光频梳重复频率扫描步长. 实验证明, ECDL 的频率调谐范围为 30.9496 GHz, 可获得 PZT 的闭环控制行程为 4.8  $\mu\text{m}$ ; 控制光频梳重复频率扫描步长为 3.75 Hz, 可获得 PZT 的闭环控制分辨率为 450 pm. 该系统采用铷钟作为频率参考源, 实验结果具有溯源性.

## 2 F-P 腔锁定至 ECDL 频率

如图 1 所示为利用 F-P 干涉仪控制 PZT 位移的实验系统图. 采用的激光器为基于 Littman 结构的 ECDL(New Focus, TLB6728-P) 输出波长范围为 1520 nm—1570 nm, 无跳模频率可调谐范围为 40 GHz, 尾纤出光功率约为 20 mW, 50 ms 激光线宽优于 200 kHz. ECDL 的输出光经光隔离器后耦合进保偏光纤传播, 依次经过电光相位调制器 EOM、环形器 Cir、光纤偏振控制器 FPC 进入光纤 F-P 腔. F-P 腔的腔长为 30 mm, 精细度为 200, 线宽为 25 MHz, 由两个高反射率的腔镜和待控制的 PZT 组成, 其中一个腔镜固定, 另一个腔镜与 PZT 粘连, 作为 PZT 位移的传感单元. 通过测量 F-P 腔长的变化可实现对 PZT 位移的精确控制. 根据多光束干涉原理, 当入射激光频率  $f$  与 F-P 腔的腔长  $L$  满足

$$f = m \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

时, 入射光频率与 F-P 腔谐振, 在 F-P 腔的透射处能获得光强的最大值. 式中  $c$  为真空中的光速,  $n$  为 F-P 腔内介质的折射率,  $m$  为干涉级次. 当 PZT 产生位移  $dL$  时, 由 (1) 式可得第  $m$  级谐振光频率变化  $df$ :

$$\frac{df}{f} = -\frac{dL}{L}, \quad (2)$$

从而建立了 PZT 位移与谐振激光频率变化量间的关系.

利用 Pound-Drever-Hall(PDH) 锁定技术<sup>[14]</sup> 可使 ECDL 的频率与 F-P 腔长始终保持谐振状态, 进而 PZT 的位移可通过 ECDL 的频率变化实时反映出来: 如图 1 中所示, 在 30 MHz 的本地振荡信号

LO 的驱动下, EOM 对激光进行相位调制, 调制后激光本征频率两边会产生两个处于 F-P 腔线宽的调制边带, 这部分光会被 F-P 的固定腔镜反射, 与部分泄漏的本征光再次通过 Cir, 并在 Cir 的出射端干涉. 干涉信号用 PD2 接收转化为电信号, 并与 LO 的另一路经过 PS 相移的本振信号混频. 混频后的信号经低通滤波即可得到检测谐振峰所需的 PDH 误差信号. 实验实际测得的将 F-P 腔锁定至 ECDL 的误差信号如图 2 所示. 将误差信号反馈到伺服控制器控制 PZT 上所加电压, 使得 F-P 的腔长始终保持与 ECDL 频率谐振的状态, 在 F-P 的透射端用 PD1 探测器接收到的光强始终保持在最大值 2.4 V. 此时, PZT 的位移量已通过 F-P 腔锁定至 ECDL 的频率. 当 ECDL 的频率  $f$  改变时, 由 (2) 式可知 PZT 将产生对应的位移, 因此通过控制 ECDL 的频率即可控制 PZT 的位移量, 从而构成一个 PZT 闭环位移控制系统. 系统中 PZT 闭环控制行程正比于 ECDL 的频率调谐范围, 位移的分辨率反比于 ECDL 的频率调谐步长.

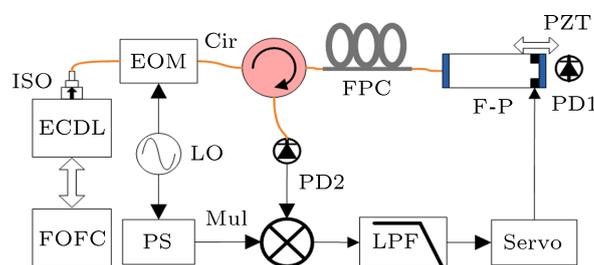


图 1 位移控制系统图 (ECDL, 外腔可调谐半导体激光器; ISO, 光隔离器; EOM, 电光相位调制器; FPC, 光纤偏振控制器; PZT, 压电陶瓷驱动器; PD1, PD2, 光电探测器; LO, 本地振荡信号; PS, 相移器; Mul, 混频器; LPF, 低通滤波; Servo, 伺服控制系统; FOFC, 光纤飞秒光频梳; Cir, 环形器)

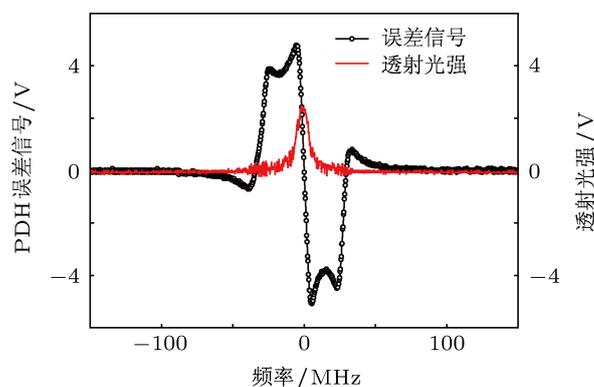


图 2 PDH 误差信号圆圈为误差信号, 实线为透射光信号

### 3 利用光频梳控制 PZT 位移

#### 3.1 ECDL 的频率稳定及控制

ECDL 是基于内置光栅稳频的半导体激光器, 通过调节光栅的角度及激光管的电流, 可实现 ECDL 输出光频率的大范围调谐. 但 ECDL 在自由运转时, 受环境温度、振动等影响, 无法提供稳定的频率输出, 且输出频率无法直接控制. 为此, 构建了一套基于光频梳的 ECDL 频率稳定及控制系统.

光频梳在频域上是一系列等频率间隔的光频梳齿. 由于光频梳的重复频率 ( $f_r$ ) 和偏置频率 ( $f_o$ ) 已分别锁定外部频率参考源, 每一个光梳齿都可视为一个稳定的激光谱线<sup>[15,16]</sup>. 对于第  $N$  个光梳齿, 其频率可表示为

$$f_N = N \times f_r \pm f_o, \quad (3)$$

式中,  $f_o$  的符号由光频梳系统的频率锁定参数决定,  $f_r$  和  $f_o$  的绝对值可通过光频梳的电子系统调谐. 利用偏频锁定的方法可将前述 F-P 干涉仪系统中的 ECDL 频率锁定至光频梳的梳齿, 锁定后 ECDL 拥有与光梳齿同等量级的频率稳定度, 且通过调谐  $f_r$  可实现 ECDL 频率的大范围调谐. 实验系统如图 3 所示.

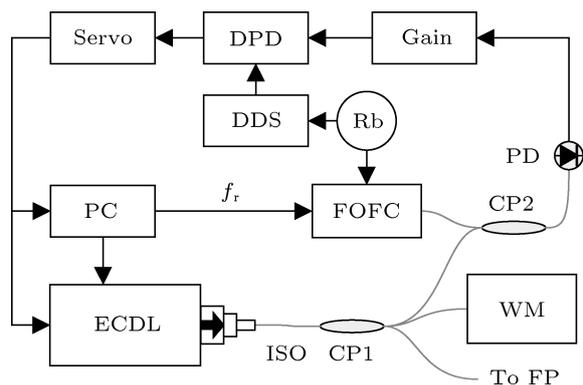


图3 ECDL 频率发生系统图 (ISO, 光隔离器; CP1, 光纤耦合器; CP2, 保偏光纤耦合器; PD, 光电探测器; Gain, 增益电路; DPD, 数字鉴相器; Servo, 伺服控制器; DDS, 数字频率发生器; FOFC, 光纤飞秒光频梳; Rb, 铷钟; PC, 计算机; WM, 波长计)

ECDL 输出光经  $1 \times 3$  光纤耦合器 CP1 被分为 3 路, 第一路进入波长计 (Bristol, 621 wavelength meter) 用于粗测 ECDL 的频率值, 第二路用于与光频梳拍频精密调谐出光频率, 第三路用于与前

述 F-P 腔锁定控制 PZT 的位移. 光纤飞秒光频梳 FOFC(Menlo System, FC1500-250) 的  $f_r$  锁定至 250 MHz,  $f_o$  锁定至 20 MHz, 所使用的外界参考频率源为铷钟 (Symmetricom, 8040C), 其平均时间 1 s 的相对稳定度为  $2.4 \times 10^{-12}$ ; 红外输出端口 30 dB 的光谱范围为 1490 nm—1590 nm, 功率约为 30 mW. 调谐 ECDL 波长调制端的控制电压, 使其工作在 1550 nm 附近, 并与光频梳拍频, 通过优化光频梳和 ECDL 的光功率, 最终获得的拍频信号  $f_b$  信噪比优于 30 dB. 接着调谐 ECDL 频率调制端口的控制电压, 使  $f_b$  接近 20 MHz, 对其放大和滤波处理后与铷钟提供的 20 MHz 的参考频率进行鉴相形成误差信号, 再由伺服控制器反馈至 ECDL 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. 锁定后 ECDL 与光梳齿拍频的频谱如图 4 所示, 从图中可知, 电子系统对 ECDL 总的反馈控制带宽约为 140 kHz.

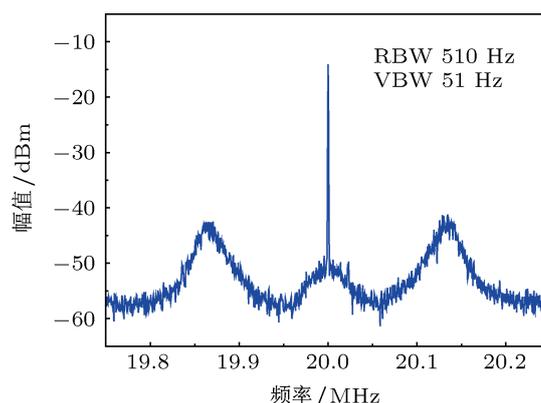


图4 锁定后 ECDL 与光梳拍频频谱

锁定后 ECDL 绝对频率可表示为

$$f = N \times f_r \pm f_o \pm f_b. \quad (4)$$

式中,  $N$  可通过波长计粗测 ECDL 的波长获得,  $f_b$  的符号可通过调谐  $f_r$  来确定.

实验时通过波长计读数和频率调谐确定 ECDL 频率位于光频梳第 773740 根梳齿的右侧, 且  $f_o$  符号为负. 设定采样时间为 1 s, 对  $f_r$ ,  $f_o$  和  $f_b$  进行了连续 1000 s 的测量, 计算得  $f_r$ ,  $f_o$  和  $f_b$  的标准差分别为 0.00034 Hz, 0.64 Hz 和 0.12 Hz. 其中  $f_b$  的标准差大小表明 ECDL 与光梳梳齿有很好的锁定精度; 由 (4) 式可得 ECDL 的绝对频率为 193435 GHz, 标准差为 0.26 kHz; 计算 ECDL 频率相对 Allan 标准偏差, 如图 5 所示, 平均时间 1 s 的 Allan 标准偏

差为  $1.68 \times 10^{-12}$ , 表明 ECDL 已溯源至铷钟频率源. 锁定后 ECDL 的频率的不确定度包含: 1) 光梳与 ECDL 拍频的 A 类不确定度  $1.4 \times 10^{-12}$ ; 2) 铷钟引入的 B 类不确定度  $2.4 \times 10^{-12}$ . 所以最终的合成不确定度为  $2.8 \times 10^{-12}$ , 对于控制 PZT 产生位移已达到了足够的稳定度.

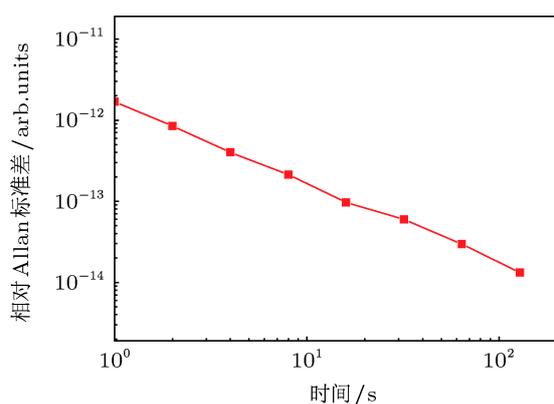


图 5 锁定后 ECDL 频率相对 Allan 标准差

ECDL 频率大范围、高精度调谐: 保持 ECDL 锁定至光梳的状态, 设置光频梳的  $f_r$  的扫描参数: 扫描范围  $\pm 20$  kHz, 扫描步长 15 Hz, 扫描时间间隔 0.2 s, 扫描过程中  $f_o$  和  $f_b$  的锁定情况如图 6 所示. 其中  $f_b$  的标准差为 0.10 Hz, 与  $f_r$  稳定时相当, 表明扫描  $f_r$  时 ECDL 有很好的频率跟随特性. 由 (4) 式可知, 整个扫描过程中 ECDL 的频率变化范围为 30.9496 GHz, 频率调谐分辨率为 11.6 MHz.

### 3.2 PZT 的高分辨率位移控制及磁滞性测量

在频率调谐系统的控制下, ECDL 的输出光频率可精确控制, 如图 3 所示, ECDL 的输出光经  $1 \times 3$  光纤耦合器后的第三路光, 作为图 1 中 PZT 位移控制系统中的光源. 扫描 ECDL 的输出光频率, 逐渐接近 F-P 腔的谐振峰并获得锁定 F-P 腔的 PDH 误差信号, 打开伺服控制系统, 再次将 F-P 腔长锁定至 ECDL. 锁定后继续在  $\pm 20$  kHz 的范围内扫描光频梳的重复频率  $f_r$ , 测量 PD1 探测到的光强, 仍始终保持最大值 2.4 V, 表明 F-P 腔的腔长已通过 ECDL 间接的锁定至光频梳, 且由 (2) 式可知: 在光频梳的  $f_r$  的控制下, PZT 产生的位移调谐范围达到了 4.8  $\mu\text{m}$ .

由 (2) 式知 PZT 的位移分辨率反比于光频梳的重复频率的调谐步长, 为得到更高的位移分辨率, 减小  $f_r$  的扫描步长至 3.75 Hz, 扫描时间间隔仍保持 0.2 s. 扫描过程中利用数据采集卡采集 PZT 上所加的伺服电压. 如图 7 所示为扫描过程中  $\Delta f_r$  及 PZT 电压随时间的变化的关系: 每隔 0.2 s,  $f_r$  阶跃变化 3.75 Hz, ECDL 频率相应变化 2.9 MHz, 控制 PZT 电压变化约 0.005 V, 由 (2) 式可知对应的 F-P 腔长变化 450 pm. 因此, 该 PZT 位移控制系统可达到的位移分辨率为 450 pm.

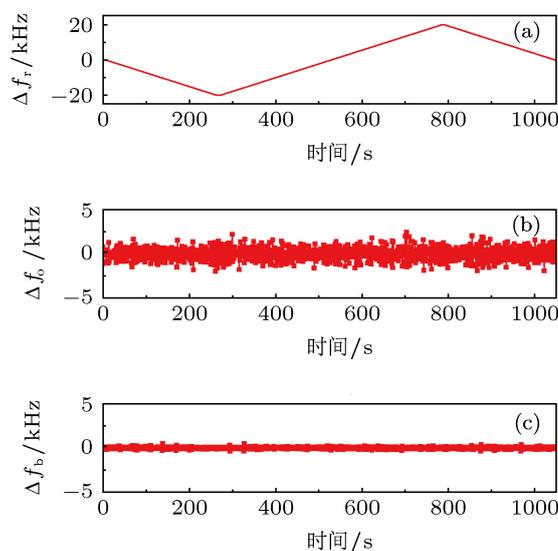


图 6 扫描  $f_r$  时  $f_o$  和  $f_b$  与锁定目标偏差随时间变化情况 (a) 重复频率随时间的改变量  $\Delta f_r$ ; (b) 偏置频率随时间的改变量  $\Delta f_o$ ; (c) 拍频频率随时间的改变量  $\Delta f_b$

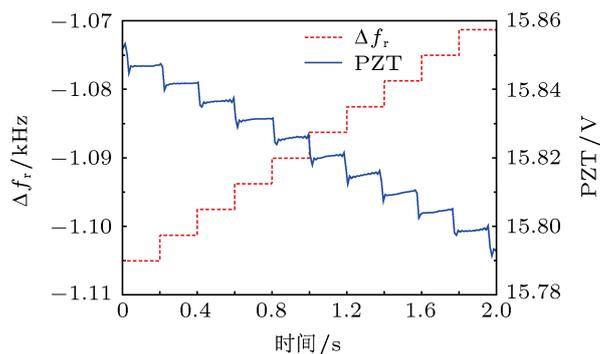


图 7 PZT 位移控制实验曲线

由于 PZT 越来越多的被应用到纳米量级的定位系统, 亚微米位移范围内 PZT 的磁滞特性的测量与校准显得越来越重要. 利用本系统分辨率高的特点, 在 1  $\mu\text{m}$  之内的位移范围内可获得足够多的位移和电压采样点, 实现 PZT 的亚微米磁滞特性的测

量. 设置  $f_r$  的扫描范围为  $\pm 5$  kHz, 控制 PZT 往复运动. 根据 PZT 上所测电压及计算所得 PZT 的位移量, 绘制出该 PZT 驱动器的磁滞特性曲线如图 8 所示, 在  $1.125 \mu\text{m}$  的位移范围内 PZT 的磁滞性引起的最大非线性误差大约为 8.6%.

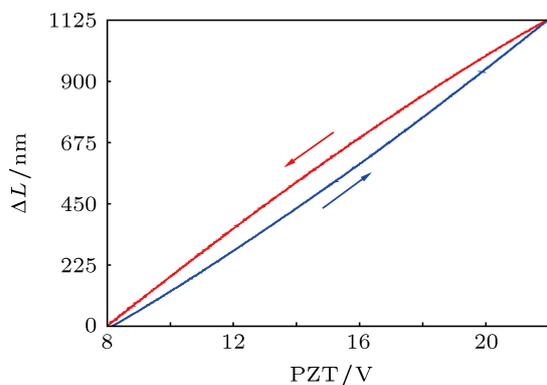


图 8 PZT 磁滞特性曲线

## 4 结论

为消除 PZT 在精密定位系统中引入的非线性误差, 建立了基于光频梳的 PZT 闭环位移控制系统. 首先利用偏频锁定技术将 ECDL 锁定至光频梳, 锁定后积分时间为 1 s 时 ECDL 的 Allan 标准偏差为  $1.68 \times 10^{-12}$ , 通过控制光频梳重复频率可在 30.9496 GHz 范围内精确调谐 ECDL 出光频率; 该系统将 F-P 干涉仪作为 PZT 的位移传感器, 测量 PZT 位移时不存在周期性非线性测量误差; 利用 PDH 锁定技术将 F-P 腔锁定至 ECDL. 通过调谐光频梳的重复频率, 实现了对 PZT 位移的闭环控制, 行程可达  $4.8 \mu\text{m}$ , 位移分辨率为 450 pm. 此外, 利用该系统测得 PZT 驱动器在  $1.125 \mu\text{m}$  位移范围内的最大磁滞非线性约为 8.6%. 系统中 ECDL 的出光频率及 PZT 的位移发生量均溯源至光频梳的铷钟频率参考源.

- [1] Leach R, Haycocks J, Lewis A, Oldfield S, Yacoot A 2001 *Nanotechnology* **12** R1
- [2] King T G, Preston M E, Murphy B J M, Cannell D S 1990 *Precision. Eng.* **12** 131
- [3] Furutani K, Urushibata M, Mohri N 1998 *Nanotechnology* **9** 93
- [4] Okazaki Y 1990 *Prec. Eng.* **12** 151
- [5] Topcu S, Chassigne L, Haddad D, Alayli Y 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4876
- [6] Chassigne L, Topcu S, Alayli Y, Juncar P 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 1771
- [7] Lawall J R 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 2786
- [8] Haitjema H, Schellekens P H J, Wetzels S F C L 2000 *Metrologia* **37** 25
- [9] Zhang L Q, Li Y 2012 *Journal of Optoelectronic Laser* **23** 740 (in Chinese) [张丽琼, 李岩 2012 光电子·激光 **23** 740]
- [10] 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]
- [11] Zhang J T, Wu X J, Li Y, Wei H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100601 (in Chinese) [张继涛, 吴学健, 李岩, 尉昊赞 2012 物理学报 **61** 100601]
- [12] 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]
- [13] Wu X J, Wei H Y, Zhu M H, Zhang J T, Li Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 180601 (in Chinese) [吴学健, 尉昊赞, 朱敏昊, 张继涛, 李岩 2012 物理学报 **61** 180601]
- [14] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [15] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stenz A, Windler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [16] Udem T, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233

# Closed-loop displacement control system for piezoelectric transducer based on optical frequency comb\*

Zhu Min-Hao<sup>†</sup> Wu Xue-Jian Wei Hao-Yun Zhang Li-Qiong  
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 27 October 2012; revised manuscript received 29 November 2012)

## Abstract

A sub-nanometric closed-loop displacement control system for piezoelectric transducers has been set up based on an optical frequency comb, an external cavity diode laser and a Fabry-Perot interferometer. The external cavity diode laser is locked to the optical frequency comb, so that the optical frequency can be set precisely in the working range by tuning the repetition frequency of the optical frequency comb. As a sensor of the piezoelectric transducer, the Fabry-Perot cavity is locked to the external cavity diode laser by means of the Pound-Drever-Hall locking technique. With the aid of precisely controlling the diode laser frequency, displacements of the piezoelectric transducer can be obtained with a sub-nanometric resolution. Experimental results show that the Allan deviation of the diode laser frequency is  $1.68 \times 10^{-12}$  after locked to the optical frequency comb. The displacement range of  $4.8 \mu\text{m}$  can be generated by the piezoelectric transducer through continuously and precisely tuning the diode laser frequency in the range of 30.9496 GHz. Meantime, the displacement resolution of 450 pm is achieved by scanning the repetition frequency of the optical frequency comb at a step of 3.75 Hz. Besides, the hysteresis characteristic of the piezoelectric transducer is measured using this system. Compared to those methods based on heterodyne interferometers to calibrate the displacement of piezoelectric transducers, the nonlinear errors are eliminated and the measurement results are traceable to an Rb clock.

**Keywords:** optical frequency comb, piezoelectric transducer, Fabry-Perot cavity, tunable diode laser

**PACS:** 07.60.Ly, 06.20.-f, 06.30.Bp, 42.62.Eh

**DOI:** 10.7498/aps.62.070702

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51105227, 61205147), and the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhuh10@mails.tsinghua.edu.cn