

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.03.023

## 基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术

谢国兵, 刘卫国, 高爱华

(西安工业大学光电微系统研究所, 西安 710032)

**摘要:** 为了获得频率稳定的激光源, 介绍一种利用压电陶瓷微位移控制激光谐振腔长的方法。通过 D/A 卡输出非等间隔控制电压序列给压电陶瓷驱动电源, 使压电陶瓷产生微小形变从而控制激光谐振腔长均匀变化, 使出射激光频率均匀稳定。实验结果表明: 该系统可以精确有效地对激光谐振腔长进行微调节控制, 定位精度可以达到 nm 级别。

**关键词:** 激光谐振腔长; 压电陶瓷; 非线性校正; 虚拟仪器; 激光频率

**中图分类号:** TP303 **文献标志码:** A

## Laser Resonant Cavity Length Regulation Technology Based on Piezoelectric Ceramic

Xie Guobing, Liu Weiguo, Gao Aihua

(Research institute of Micro-Optoelectronic System, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** In order to acquire the laser source with stable frequency, introduce a method to use piezoelectric ceramic micro-displacement to regulate laser resonant cavity length. Use D/A card to output non-equidistant regulate voltage sequences to piezoelectric ceramic driving power. Then the piezoelectric ceramic shape is changed to regulate laser resonant cavity length to change averagely. The experimental results show that the length of the laser resonant cavity can be regulated accurately and the frequency of the laser is stability, high positioning accuracy with nm level.

**Key words:** laser resonant cavity length; piezoelectric ceramic; nonlinear correction; virtual instrumentation; frequency of laser

### 0 引言

自从激光器问世以来, 激光技术以其高灵敏度、高精度及非接触等特点在尖端工业装备和国防装备领域占据着越来越重要的地位。频率稳定的激光源是获得超精密测量精度的必要保障, 为保证测量精度, 通常要求稳频精度(波长精度)比设计测量精度至少高一个数量级。目前, 激光稳频的基本原理都是通过微调腔长来改变激光器输出频率, 主要有 Lamb 下陷法、 $I_2$  饱和吸收法、双纵模法和塞曼法等。

根据执行机构的不同, 激光谐振腔长调节方案可以分为温度控制法和压电陶瓷控制法。目前, 国内温度控制法多采用模拟 PID 控制电路实现腔长调节, 存在控制算法调试任务繁重, 算法移植性差, 控制灵敏度低等缺点<sup>[1]</sup>。基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术可在一定范围内控制激光腔长均匀线性变化, 使激光输出频率均匀稳定, 而且这种控制技术具有结构简单、易于控制、分辨率高、重复性好和响应速度快等优点。因此, 笔者主要对压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术进行分析。

### 1 激光谐振腔长与出射频率关系

当激光器谐振腔满足稳定条件时, 在谐振腔内就构成一种稳定的电磁振荡, 它与谐振腔参数及振荡模式之间有着密切的联系, 对于沿轴线方向传播的光束, 其谐振条件为:

$$nl = q \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中:  $n$  为激活介质的折射率;  $l$  为谐振腔长度;  $\lambda$  为振荡波长;  $q$  为正整数。

把式 (1) 写成频率的形式:

$$\nu_q = \frac{c}{2nl} q \quad (2)$$

其中,  $q$  可以取任意正整数, 所以原则上谐振腔内有无限多个谐振频率, 每一种谐振频率的振荡代表一种振荡方式, 称为一个“模式”。对于上述沿轴向传播的振动, 称为纵模, 如图 1。

上述一系列的分立频率只是谐振腔允许的谐振频率。但每一种激活介质都有一个特定的光谱曲线(或增益曲线)。又由于谐振腔存在着透射、衍射和

收稿日期: 2011-10-02; 修回日期: 2011-11-14

作者简介: 谢国兵(1985—), 男, 山西人, 从事光电测试技术、信号处理研究。

散射等特种损耗，所以只有那些落在增益曲线范围内、并且增益大于损耗的那些频率才能形成激光。可见，激光器输出激光的频率并不是无限多个，而是由激活介质的光谱特性和谐振腔频率特性共同决定的<sup>[2]</sup>。

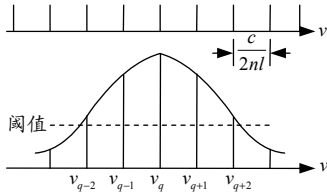


图 1 激光的纵模

根据式 (1) 可知，激光器谐振腔每伸缩  $\lambda_q/2$  ( $\lambda_q = \lambda/n$  是谐振腔内的真实波长)，就会产生 (消失) 一个纵模，跳模过程如图 2。

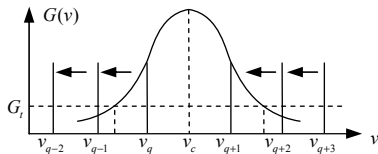


图 2 扫描激光器跳模示意图

从上述分析中可见，激光器谐振腔长均匀线性变化，出射激光频率也就均匀线性变化，两者之间呈一种一次方程关系。若激光谐振腔长变化不均匀，激光频率变化的速度便不同，各个模式之间的宽度和它们之间的半高宽就不具备可比性，它们之间的比率就有偏差。因此，精确控制激光谐振腔长均匀线性变化是出射激光频率均匀稳定的关键问题。

## 2 压电陶瓷控制激光谐振腔长变化原理

压电陶瓷是近几年发展起来的新型微位移器件，它具有体积小、分辨率高、响应快、推力大、不发热、不产生噪声等一系列优点，广泛应用于纳米技术、航天、精密测量、微细加工、微电子、机器人等领域。

基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制结构设计是使谐振腔内的一个反射镜固定，另一个反射镜装在压电陶瓷上，如图 3 所示。这样，在驱动电压的作用下，压电陶瓷做微小伸缩变化，最终使腔长发生改变。

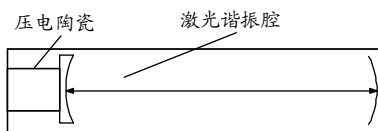


图 3 基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制结构图

由于压电陶瓷本身的非线性，激光谐振腔长变化是不均匀的。这样，首先要实现压电陶瓷的非线性线性化。

## 3 压电陶瓷非线性校正

由于压电陶瓷的位移迟滞非线性和蠕变效应，极大地影响了其扫描精确定位。所以，精确控制压电陶瓷的扫描位移量是需要解决的核心问题之一。

### 3.1 压电陶瓷线性化原理

压电陶瓷是具有逆压电效应的压电材料。由于单片压电陶瓷的伸缩量很小，在工程实际中采用层叠式结构来增大压电陶瓷的伸缩量，即相当于压电陶瓷片在机械上串联，电路上并联。其总伸缩量为：

$$\Delta L = \frac{nMU^2}{d} \quad (3)$$

式中： $\Delta L$  为压电陶瓷的总伸缩量； $n$  为胶合片数； $d$  为每片陶瓷的厚度； $U$  为驱动电压。对于特定的压电陶瓷，其特性曲线 (即其位移量与加在其上的电压之间的关系曲线) 是固定不变的。由于压电陶瓷存在迟滞、蠕变等不良特性及制造工艺等影响因素，其输入电压与输出位移之间存在很大的非线性<sup>[3-4]</sup>，如图 4。

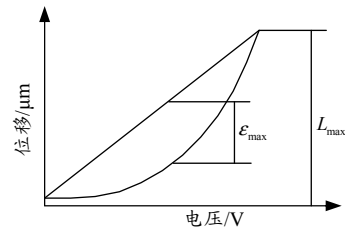


图 4 压电陶瓷的非线性定义表示图

压电陶瓷的非线性定义为非线性位移曲线相对于连接起点与终点的直线的最大偏差与最大伸长量之间的比值，非线性可由下式表示：

$$E_n = \frac{\epsilon_{\max}}{L_{\max}} \times 100\% \quad (4)$$

当非线性大于某一阈值，不能满足应用要求时，则要对其进行非线性校正。校正采用最小二乘法进行二次曲线拟合。对测得的非线性位移  $S(V)$  与压电陶瓷控制电压  $V$  按式 (1) 进行最小二乘法拟合，其中  $ABC$  是拟合曲线系数。

$$\begin{cases} \left( \sum_n V_i^4 \right) A + \left( \sum_n V_i^3 \right) B + \left( \sum_n V_i^2 \right) C = \left[ \sum_n V_i^2 S(V_i) \right] \\ \left( \sum_n V_i^3 \right) A + \left( \sum_n V_i^2 \right) B + \left( \sum_n V_i \right) C = \left[ \sum_n V_i S(V_i) \right] \\ \left( \sum_n V_i^2 \right) A + \left( \sum_n V_i \right) B + \left( \sum_n 1 \right) C = \left[ \sum_n S(V_i) \right] \end{cases} \quad (5)$$

根据上式计算出  $ABC$ , 可以得到曲线关系:

$$AV^2 + BV + C = S(V) \quad (6)$$

可得到:

$$V = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4(C-S) \cdot A}}{2A} \quad (7)$$

根据式 (7) 产生等间距变化的位移量  $S(V)$ , 从而对应非等间距变化的电压  $V$ , 反复测量  $S(V)$  并调节非等间隔间距电压  $V$ , 就可以精确地实现压电陶瓷时间域上位移量线性化<sup>[5-6]</sup>。

### 3.2 基于 LabVIEW 的压电陶瓷线性化程序设计

笔者采用虚拟仪器技术, 利用 LabVIEW 程序语言编制程序, 采用凌华的 PCI6208DA 作为输出卡。非等间隔控制电压序列通过迈克尔逊干涉实验求得, 具体方法是: 将压电陶瓷固定在其中一个反射镜后, 调出条纹后, 增加电压, 每变化一个条纹, 记录相应的电压。然后将这些非等间隔电压序列利用数组存储, 做成可供调用的测试文件, 保存在计算机内, 不同的压电陶瓷只需选取不同的测试文件,

以方便地变换不同的压电陶瓷。同时, 非等间隔控制电压序列以数组形式在前面板上显示, 可以通过键盘微调各个节点电压值, 也可以直接修改数组中节点电压值, 最终目的使压电陶瓷时间域上线性化位移。压电陶瓷线性化程序前面板如图 5, 压电陶瓷线性化程序后面板如图 6。



图 5 压电陶瓷线性化程序前面板

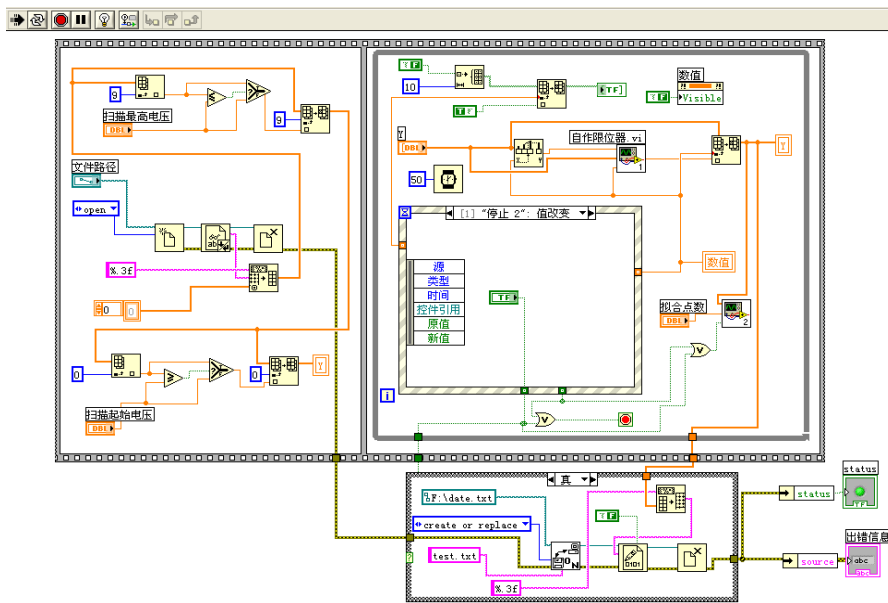


图 6 压电陶瓷线性化程序后面板

## 4 测试系统方案及构成

为了验证基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术的优良性, 笔者设计了如图 7 所示测试系统。

具体步骤如下:

1) 计算机内部存储的非等间隔电压序列通过 D/A 卡输出给压电陶瓷驱动电源, 可以通过压电陶瓷线性化程序实时改变非等间隔控制电压序列;

2) 压电陶瓷驱动电源驱动压电陶瓷微小形变, 使激光器腔长伸缩变化, 激光出射频率变化;

3) 光电二极管感应激光脉冲信号, 计算机通过 A/D 卡采集此信号并显示。

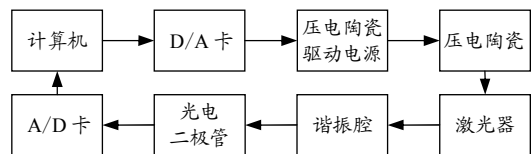


图 7 测试系统图

## 5 实验结果

利用扫频激光器谐振模式 TEM00、TEM01 和

TEM10 的周期性来检验激光谐振腔长的变化。通过理论分析可知，激光谐振腔长产生微小变化，出射光的模式也随之改变，这种变化具有周期性，腔长每变化激光波长的四分之一，模式也就周而复始的出现一次。笔者实验利用 He-Na 激光器，腔长变化 158.2 nm，激光器的谐振模式就变化一个周期，因此腔长定位精度可以达到 nm 级别。

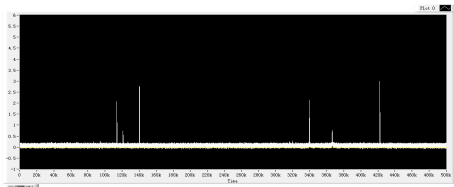


图 8 未控制谐振腔长采集图像

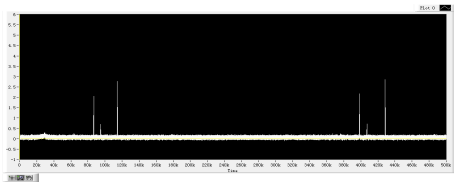


图 9 控制谐振腔长后采集图像

未控制激光谐振腔长前出射光模式图形如图 8。从图 8 中可以看出：前后 2 个周期中各模式间距参差不齐，前面 1 个周期模式间距小，而后 1 个周期模式间距大。表明在前 1 个周期与后 1 个周期，因为温度差异或者振动引起腔长微小变化，使出射光频率不稳定。

如图 9 所示，控制谐振腔长后出射光模式图形，后前后 2 个周期中各模式之间间距几乎相等。这说

明在整个压电陶瓷的伸长范围内，激光谐振腔长伸长速度比较均匀，激光器出射频率稳定均匀。证明基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术是成功的。

### 6 结束语

实验结果证明：基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术具有开发周期短，成本低，效果好等优点。另外，笔者提出了一种采用经过实验得到的离散电压点来线性化压电陶瓷的方法。因此，D/A 卡输出的非等间隔电压序列完全是由事先写入测试文件中的数据值决定的，可以在不改动硬件设计的前提下对文件数据作任意修改，以满足实验精度要求。

### 参考文献：

- [1] 王利强, 张锦秋, 彭月祥, 等. 双纵模稳频 He-Ne 激光器工作机理及误差分析[J]. 光电工程, 2008, 4(4): 109-113.
- [2] 杨宏兴. 双纵模 He-Ne 激光器数字稳频技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 11-16.
- [3] 秦文罡, 陈志超, 等. 基于虚拟仪器的压电陶瓷线性化研究[J]. 理论与方法, 2008, 5(9): 289-294.
- [4] Chen W, LYNCH CS. A micro-electro-mechanical model for polarization switching of ferroelectric materials[J]. Acta Materialia, 1998, 46(15): 5303-5311.
- [5] 董维杰, 宋志杨, 崔岩. 压电陶瓷管的微位移测量与非线性校正[J]. 光学精密工程, 2009, 9(34): 65-69.
- [6] Burianova L., Hana P., Pustka M., et al. Non-linear properties of PZT ceramics in the wide temperature range[J]. available online at www.sciencedirect.com, 2005, 3(25): 2405-2409.

\*\*\*\*\*

(上接第 74 页)

因为分压和电阻阻值确定后，就只能对电容的容值进行修改仿真。不加电容时，因为内部的转换开关会积累一定的电量，因此在转换的时候会变为电势，形成图 4 所示的峰尖。

图 5 为加大并联电容(电容为 0.5 μF 以上)仿真效果图，结果表明不但无图 4 出现的峰尖，而且会出现积分现象，导致开关传输效果不好。

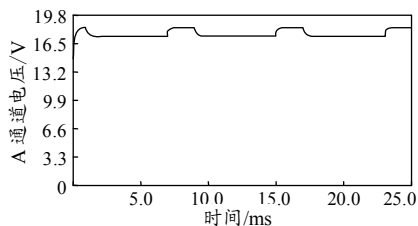


图 5 大电容效果图

### 4 结论

通过对 ADG726 的电路上的阻容器件分析可知：使用电容进行滤波时，输出电路中的电容要尽量小，以免影响其他通道的信号；同时采用输出电路电阻分压，在一定程度上减少了信号的扰动。实践结果证明，该策略具有一定的有效性。

### 参考文献：

- [1] ADG726 DATASHEETS, Analog Devices INC., 2002.
- [2] 姚宝珍, 张亚, 李世中, 等. 激波传感器放大电路设计[J]. 2010, 30(7): 107.
- [3] 陈希有. 电路理论基础[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 108-115.
- [4] 郭小军. 电子电路仿真[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.