

# 设计用于超窄线宽激光器超稳法布里-珀罗腔的支撑方式

杨 涛<sup>1,2</sup> 李 烨<sup>2</sup> 高春清<sup>1</sup> 曹建平<sup>2</sup> 方占军<sup>2</sup> 臧二军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学光电学院, 北京 100081  
<sup>2</sup> 中国计量科学院电学与量子研究所, 北京 100013)

**摘要** 将激光器锁定于超稳定法布里-珀罗(F-P)腔的腔长上,是目前获得超窄线宽激光输出的重要手段。因此,激光器的频率稳定性依赖于F-P腔腔长的稳定性。振动引起的谐振腔形变是影响超稳定光学谐振腔稳定性的主要因素。利用有限元分析的方法定量地分析了振动环境中两种实验室常用的F-P腔在不同支撑方式下的弹性形变情况。数值计算结果给出了这两种形状的超稳定F-P腔的最优化支撑方式,使其对振动引起的腔长变化达到最小化,使振动环境下的超稳腔腔长变化最小达到 $10^{-12}$  m。

**关键词** 激光器;光学谐振腔;激光频率稳定技术;光学频率标准;精密测量;超窄线宽激光器

**中图分类号** TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100514

## Design for Mounting Configuration of Ultra-Stable Fabry-Perot Cavity of Ultra-Narrow Linewidth Laser

Yang Tao<sup>1,2</sup> Li Ye<sup>2</sup> Gao Chunqing<sup>1</sup> Cao Jianping<sup>2</sup> Fang Zhanjun<sup>2</sup> Zang Erjun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)  
<sup>2</sup> National Institute of Metrology, Beijing, 100013, China)

**Abstract** Locking to the laser cavity length of ultra-stable cavities is an important method to gain ultra-short line width laser output. The stability of the laser relies on the length stability of the Fabry-Perot (F-P) cavities. Vibration induced cavity deformation is one of the dominate factors that affect the stability of ultra-stable optical cavities. The elastic deformation of two general cavities with different mounting configurations in vibration environment is quantitatively analyzed. Numerical results offer the optimum mounting configurations of the two cavities, where the change of vibration-induced cavity is minimized to  $10^{-12}$  m

**Key words** lasers; optical cavity; laser frequency stabilization; optical frequency standard; precision measurement

**OCIS codes** 230.4910; 120.4800; 120.7280; 140.3425

## 1 引 言

稳定的双镜谐振腔在许多研究领域都扮演着非常重要的角色。作为激光器的重要组成部分,光学谐振腔的主要作用是为用户提供光学反馈。另外,由于谐振腔可以选择激光器模式的频率,它也被用作光谱分析。而谐振腔特别是超稳定谐振腔,是超窄线宽激光器试验中的重要组成部分。实际上,光学谐振腔在不同的安装和使用方式下,几乎可以使用

在激光光学和精密光谱的任何应用中。在精密光谱测量中,法布里-珀罗(F-P)腔作为频率参考广泛地应用于多种激光器的频率锁定上。在光学频率标准、基本物理学常量的测量、精密光谱和基础物理研究中,F-P腔的稳定性对于精密光谱测量非常重要<sup>[1~3]</sup>。影响F-P腔稳定性的因素主要是谐振腔腔长的变化。引起谐振腔腔长变化的因素有很多,本文主要研究环境振动对腔长变化的影响。

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(60727005,60178009 和 60478032)资助课题。

作者简介: 杨 涛(1979—),男,博士研究生,主要从事激光稳频方面的研究。E-mail: tyang@bit.edu.cn

导师简介: 臧二军(1955—),男,博士,研究员,主要从事激光稳频方面的研究。E-mail: ejzang@nim.ac.cn

根据对超稳腔几何形变进行过的定量分析和研究成果,利用有限元分析方法计算出超稳腔在振动环境下形变的具体数值,优化超稳腔的支撑方式达到提高超稳腔稳定性的目的。经计算所得的超稳腔支撑方式已经成功地应用于超窄线宽激光器的实验中,取得了很好的效果。同时较为经济的腔体,更加便于安装的支撑方式,也为超窄线宽激光器实验提供了良好的实现方式。

## 2 4点支撑圆柱形腔体

一个经过高精细加工与外界环境隔离良好的F-P腔,通常称之为超稳腔。图1描述了一个典型的F-P腔。通常一个超稳腔包含两个高反射率低损耗的反射镜,这两面反射镜相对放置在光轴上<sup>[4,5]</sup>。两个腔镜中间夹着一个低热膨胀系数(ULE)材料制成的腔体。腔镜基片通常采用与腔体相同的材料制成,然后用光学方法将其粘在腔体两端。腔镜之间的反射指数通常由空气温度、压强和湿度决定,而这些条件不断变化。所以腔镜之间的空气反射指数会影响腔体长度,为了解决这一问题,腔体必须被放置在真空腔中。另外,为了杜绝外界环境温度和振动对腔体的影响,真空腔的温度漂移被控制在十几毫开,放置在带有振动隔离措施的平台<sup>[6]</sup>。

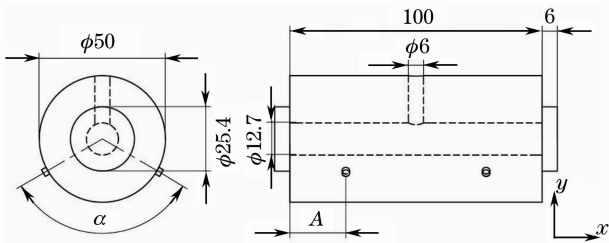


图1 圆柱形腔体采用4点支撑的方式

Fig. 1 Cylindrical cavity supported by four posts

在实验中,激光器以F-P腔为参考,光学频率漂移由两腔镜之间光学长度的变化引起。环境振动引起腔体的弹性形变,相应地也引起腔体光学长度的变化。在实验中,一般振动隔离的处理方法是将谐振腔放在主动或者被动的隔震装置上,这种系统通常都可以将大部分的振动频率隔离。但是无论何种隔震装置都不能过滤所有的振动频率,隔震装置本身都有其固有的谐振频率,低于谐振频率的振动将直接传递到谐振腔上。如果阻尼不够,处于谐振频率之上的振动将会加强。由于光学平台的振动摇摆,谐振腔体不仅会发生形变而且会弯曲使腔镜发

生倾斜,同时腔镜也在振动条件下发生形变。因此,腔体形变对作为频率参考的谐振腔的稳定性影响很大。

本课题组一直在利用有限元分析方法设计超稳腔,以提高超稳腔在振动环境下的稳定性,并且已经对超稳腔的振动敏感性进行过详细的分析<sup>[7,8]</sup>。此前讨论的设计方案,是通过改变腔体形状和支撑方式获得最小的腔长变化。而腔体形状的变化,往往带来成本的增加,因此利用实验室已有的超稳腔体,通过优化超稳腔支撑方式,来满足实际使用中对超稳腔稳定性的要求,是一种经济实用的做法。

图1所示的圆柱形超稳腔是实验室常用的一种F-P腔,采用4个直径为6 mm的圆柱形垫作为支撑结构,将腔体支撑位置提高以缩短腔长,如图1所示。图1中 $\alpha$ 为腔体两侧支撑圆柱轴心之间的夹角,改变夹角大小可以控制4个支撑点相对于腔体支撑位置的高低。 $A$ 为支撑圆柱中心轴到腔体端面的距离。

理论上讲,提高支撑点位置可以使腔长缩短,因此也就有可能在伸长和缩短之间,寻找到腔长变化最小的位置。但是计算中并不如分析的那么乐观。图2给出了圆柱腔体在 $\phi 6$ 的圆柱体支撑下,支撑点在不同位置的腔体形变情况。图2给出的左侧腔镜中心点附近连续7个探测点的位移情况,腔体采用对称约束情况,因此右侧位移情况和左侧完全对称。从图2中可以看到,随支撑点位置不同,腔镜的倾斜情况会发生变化,但是可以找到腔镜相对平行的位置。而 $\alpha$ 角的大小,对腔体长度影响不大。可见此处腔体弯曲形变相比于腔体上下拉伸形变,腔体弯曲在整个腔体形变中占主导地位。但是腔长变化为 $\Delta L$ 达到了 $10^{-10}$  m量级,考虑到所分析的腔体用于Sr原子钟系统的二次冷却激光中,其线宽要求为1 kHz。设计方案基本满足实验要求,且已经应用于实验中,激光器锁定于该超稳腔上,获得激光器线宽为100 Hz<sup>[9]</sup>。

## 3 4点大接触面支撑圆柱切割形腔体

图3所示腔体形状是近期使用较多的一种超稳腔形状。这种形状腔体的设计思路,基于之前讨论过的腔体形变特性,即支撑点提高有助于缩短腔长,从而抵消由于重力影响带来的腔体伸长。但是这种方式并不能实现腔长最小化,据分析,这种形状带来约 $10^{-10}$  m的腔长变化,且腔镜并不平行。该腔体用于Sr原子钟激光探测,这一量级的腔长变化无法

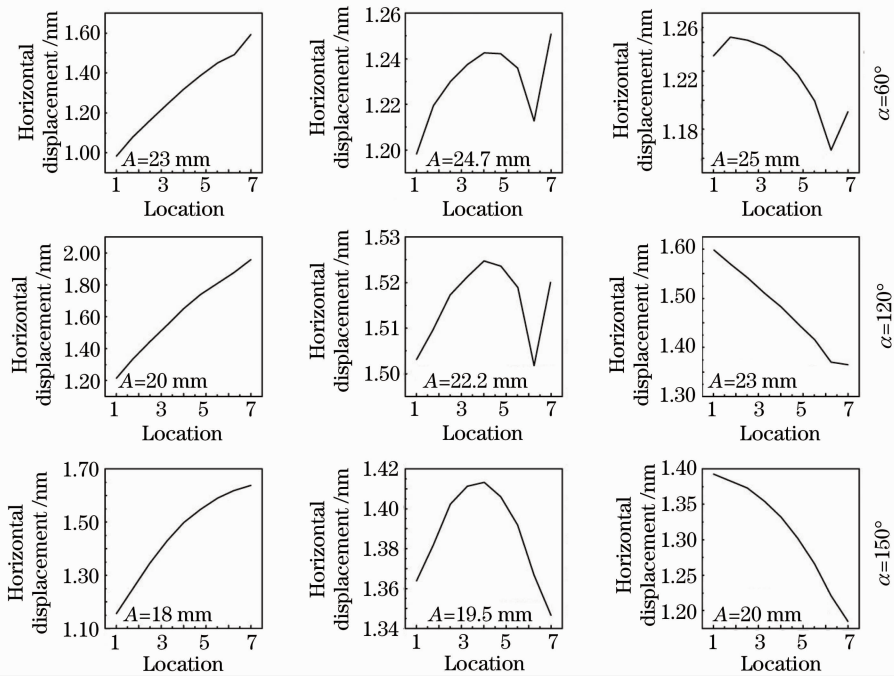


图 2 腔体在 1 g 加速度下发生形变时左侧腔镜的位移情况

Fig. 2 Left mirror displacements of the cylindrical cavity under 1 g acceleration

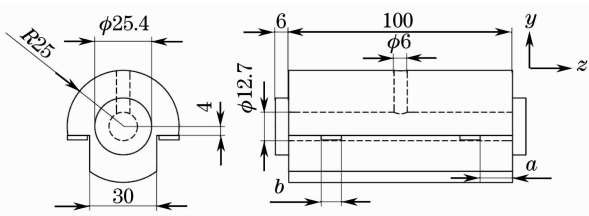


图 3 一种圆柱切槽式腔体采用 4 点支撑方式

Fig. 3 Notched cylindrical cavity on four posts

满足实验要求,因此需要进一步提高腔体稳定性。由于腔体形状已经确定下来,只能通过改变支撑方式的方法。如图 3 所示,采用 4 点支撑腔体,其中参数  $a$  表示支撑点在腔长方向上的位置, $b$  表示支撑点的大小,另外根据反复计算,发现支撑点的宽度及横向的大小对腔长变化影响不大。

在设计支撑方式的过程中,另一个值得关注的的问题就是加工和装配的难度。如图 3 所示, $a$  为支

撑块端面到腔体一侧端面的距离; $b$  为支撑块在  $z$  方向上的长度,可以体现支撑块给腔体提供支撑面的大小。4 点支撑一个比较大的缺点就是安装过程中 4 个支撑点的位置如何定位,一旦位置在安装过程中发生偏移,那么所有的计算结果和设计方案都将失效。4 个支撑点的定位问题,成为在设计过程中不能忽略的问题。

根据反复计算,确定在  $a=0, b=35.8$  mm 时,超稳腔的腔长变化量最小。而这一设计,也保证了在安装过程中定位的准确性,因为  $a=0$ ,那么意味着 4 个支撑点的端面与超稳腔的两个端面齐平,非常容易定位。较长的支撑表面,通过选择质地较软的支撑材料,可以保证支撑面与腔体充分接触,同时不会发生支撑块向某一方向发生倾斜的可能。图 4 给出右侧腔镜中心周围  $\pm 1$  mm 附近的腔镜位移情况,分析过程同样采用对称约束条件,左侧腔镜位移

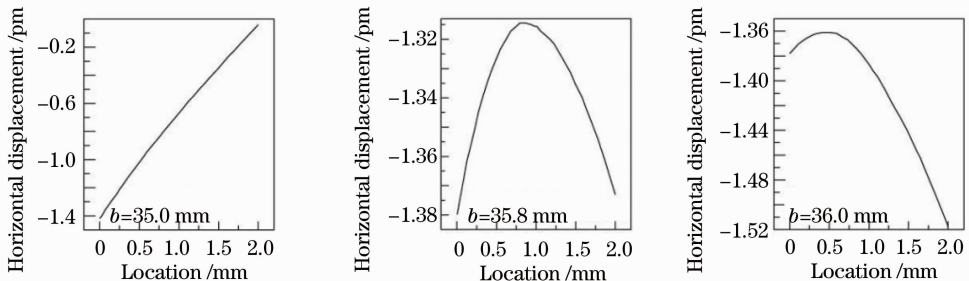


图 4 侧面带切槽的圆柱腔体在 1 g 加速度下发生形变时,右侧腔镜的位移情况

Fig. 4 Right mirror displacements of the notched cylindrical cavity under 1 g acceleration

情况和右侧对称。由于  $b$  的大小不同,腔镜也会发生倾斜到平行的过程,在腔镜平行处,  $\Delta L \approx 2 \times 10^{-12}$  m,这也是整个对该型腔体分析过程中  $\Delta L$  的最小值。这一结果达到了曾经分析过的锥形腔体的最好结果,而后者已成功应用于原子冷却光晶格频率基准中,其激光器锁定后线宽约为 0.1 Hz<sup>[10]</sup>。

## 4 结 论

通过上述两种腔体在实际应用中分析优化其支撑结构获得较好的超稳腔稳定性,可以发现,超稳腔在振动环境下的形变情况,可以包含两种情况,一种情况是超稳腔在加速度作用下,在支撑点上方的部分会产生腔体伸长的效果,而支撑点下方的部分有缩短腔体的作用;另一种情况是,腔体会随着支撑点位置的不同,有伸长或缩短的效果。两种方式没有优劣之分,根据腔体形状的不同,两种形变方式中有一种方式会在整个腔体形变过程中占主导地位,正确地认识该腔体的形变规律,并且灵活运用腔体支撑方式,用另外一种形变方式去补偿占主导地位的腔体形变的不足,往往能获得非常好的结果。另外,在设计过程中,充分考虑装配安装误差给腔体稳定性带来的影响,尽量选择容易实现的超稳腔装配方式,保证计算结果可以很好地体现在实际应用中。同时,选择了比过去更加精确的计算方法,这也是计算结果获得良好使用效果的重要保障。

致谢 感谢陈李生、李瑛和洪峰雷的支持和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 2 B. C. Young, F. C. Cruz, W. M. Itano *et al.*. Visible lasers with subhertz linewidths [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**: 3799~3802
- 3 M. Takamoto, F. L. Hong, R. Higashi *et al.*. An optical lattice clock [J]. *Nature*, 2005, **435**(7040): 321~324
- 4 Anthony E. Siegman. Lasers [M]. USA: Stanford University Press, 1986. 744~780
- 5 H. A. Bachor, T. C. Ralph. A Guide to Experiments in Quantum Optics [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2003. 119~130
- 6 M. Zhu, J. L. Hall. Atomic, Molecular, and Optical Physics: Electromagnetic Radiation [M]. San Diego: Academic Press, 1997. 103~115
- 7 L. Chen, J. L. Hall, J. Ye *et al.*. Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Perot cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **74**(5): 053801~053813
- 8 Yang Tao, Li Wenbo, Zang Erjun *et al.*. Decreased vibrational susceptibility of Fabry-Perot cavities via designs of geometry and structural support [J]. *Chinese Physics*, 2007, **16**(5): 1374~1397
- 9 Li Ye, Lin Yige, Zhao Yang *et al.*. Stable narrow linewidth 689 nm diode laser for the second stage cooling and trapping of strontium atoms [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(7): 074208~074211
- 10 A. D. Ludlow, X. Huang, M. Notcutt *et al.*. Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at  $1 \times 10^{-15}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 641~643