

文章编号: 1001-3806(2006)02-0133-03

高稳定及免调试“猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器的研究

许志广, 张书练*, 杜文华, 李 岩, 朱 钧
(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 提高谐振腔的稳定性一直是激光技术的一个重大问题。将“猫眼”逆向器作为反射镜, 组成“猫眼”谐振腔可提高激光谐振腔的稳定性。以功率稳定性为参考指标, 做了一系列对比实验来对比“猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器和现有 He-Ne 激光器在失调特性、温度漂移方面的性能。结果表明, “猫眼”谐振腔激光器稳定性显著优于传统平凹谐振腔和凹凹谐振腔激光器。进行了免调节“猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器的实验, “猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器的功率稳定性达到了以前各种构造的 He-Ne 激光器无法达到的高水平。

关键词: 激光器; “猫眼”谐振腔; “猫眼”逆向器; 免调激光器; 激光谐振腔

中图分类号: TN 248.2 TN 243 **文献标识码:** A

Ultra stable and adjustment-free “cat's eye” cavity He-Ne laser

XU Zhi-guang, ZHANG Shu-lian, DU Wen-hua, LI Yan, ZHU Jun

(Department of Precision Instruments and Mechanics Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Laser cavity stability is a conventional and concerning subject from the birth of laser. With a “cat's eye” reflector as the reflecting mirror, the problems of laser adjustment and power stability can be solved. Comprehensive experiments are carried out in a half-external cavity He-Ne laser and the “cat's eye” reflector cavity, plane-concave mirror cavity and concave-concave mirror cavity. The results show that the use of the half-external “cat's eye” cavity can improve the laser stability and lower the power drifts significantly. The adjustment problem is also considered and solved. A stable and adjustment-free He-Ne laser is finally realized, which exhibits remarkable advantages than the current He-Ne lasers.

Key words lasers; “cat's eye” reflector; “cat's eye” resonator; adjustment-free laser; laser resonator

引 言

自激光器诞生以来, 产生了各种各样的谐振腔。常见的主要有稳腔、临界腔和非稳腔, 组成谐振腔的主要是平面镜、凹面镜和凸面镜^[1]。目前的激光谐振腔有几个难以克服的缺点: (1) 理论上讲, 要把谐振腔调到理想状态, 需要把组成谐振腔的两个腔镜调到完全平行 (或者两个腔镜的顶点法线完全在一条直线上), 但实际中是不可能实现的, 因而激光器的调节就成为一项精密而有难度的工作; (2) 在实际应用中, 机械扰动等不确定因素会使两个腔镜受到扰动, 从而导致激光器偏离调准状态, 使激光器输出功率、输出光束方向产生变化, 严重时甚至导致激光器无法工作; (3) 环境温度改变时, 激光谐振腔的长度也会缓慢蠕动而带来

谐振腔的失谐, 同样会导致激光输出功率的漂移和光束方向的角度漂移。以上 3 个因素大大限制了许多激光器尤其是半外腔和全外腔激光器的应用, 使之在许多环境恶劣的场所无法使用。总之, 激光谐振腔的稳定性是一个长期存在的问题。

“猫眼”逆向器的结构有多种, 最常见的有 3 种: 一种由一个凸透镜和一凹面镜组成的^[2], 另一种由两个折射率相同但曲率半径不同的玻璃半球组成的^[3], 除此之外, 折射率等于 2.0 的玻璃球本身也可以作为“猫眼”逆向器使用^[4]。

有些干涉仪系统里使用“猫眼”逆向器来代替直角棱镜取得了良好的效果^[5,6], 但它们是作为激光器外的一个反射镜, 不直接构成激光谐振腔, 有无此逆向器不影响激光器本身的工作。LI 和 SMITH 早在 1965 年曾介绍过“猫眼”谐振腔的设想^[7], 但他们是用小孔光阑选择横模输出的一个办法, 而且对谐振腔的稳定性没有深入研究和利用; 俄罗斯研究人员 D. MAKHOV 曾把“猫眼”逆向器应用在 CO₂ 激光器领域, 但由于 CO₂ 激光器输出功率较高, 在“猫眼”逆向器后部的凹面镜上形成的激光焦点容易毁坏所镀的膜层, 所以

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50127501; 60178010)

作者简介: 许志广 (1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光在计量领域中的应用。

* 通讯联系人。E-mail: zshdp@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-02-28; 收到修改稿日期: 2005-03-11

不得不使用复杂的圆锥光学来解决此问题,而且“猫眼”的结构也有根本性的变化^[8-11];法国研究人员 FERMIGIE 曾在半导体激光器里面使用“猫眼”逆向器,但结构比较复杂,而且使用了柱透镜和光栅,加工成本很高^[12]。所以说,结构简单合理而又有合适用场合的“猫眼”谐振腔激光器还很不成熟。

作者研究后发现,He-Ne 气体激光器是“猫眼”谐振腔应用的理想领域。He-Ne 激光器广泛应用于相干测量技术、准直导向、自动控制、全息术和医疗卫生等方面;但相对来讲,He-Ne 激光器增益较小,输出功率较低,较大的损耗会明显的影响其性能,因而对谐振腔的稳定性要求相对较高。而“猫眼”谐振腔正好弥补了这个缺陷,可以大大提高其稳定性,拓宽其应用领域。

免调固体激光器已有所报道,将角锥棱镜作为谐振腔的反射镜可以使固体激光器实现免调^[13-14],但免调气体激光器,尤其是 He-Ne 激光器至今未见报道。角锥棱镜不能直接作为 He-Ne 激光器的反射镜,因为角锥棱镜的顶点处是无法工作的,所以免调固体激光器的输出光斑中心有个黑斑,而 He-Ne 激光器增益较小,角锥棱镜顶点处带来的损耗将使激光器无法振荡。而“猫眼”逆向器就克服了这个缺点,使激光输出的光斑是基横模的圆斑。

1 “猫眼”逆向器

“猫眼”逆向器的结构有多种,根据实际需要,作者选择了由一个镀双面增透膜的凸透镜和镀全反射膜的凹面镜组成的结构,并保证凸透镜焦距、凹面镜曲率半径和凸透镜与凹面镜的间距三者相等。

“猫眼”逆向器具有良好的逆向平行反射性,一束平行光正入射到逆向器时会沿同方向出射;当一束平行光以较小角度斜入射到“猫眼”逆向器时,仍然会沿原方向平行射出。这是传统的激光谐振腔腔镜(平面镜或者凹面镜)所不具备的,如图 1 所示。这也是“猫眼”逆向器作为激光谐振腔反射镜能提高激光器稳定性的基础。

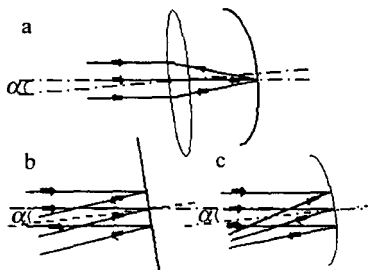


Fig 1 Obliquely incident paraxial beam
a-“cat's eye” reflector b-plane mirror c-concave mirror

2 稳定性对比实验

在实际应用中,He-Ne 激光器的谐振腔主要有平

凹腔和凹凹腔,笔者在半外腔 He-Ne 激光器中用“猫眼”谐振腔和这两种传统的谐振腔对比,做了一系列的实验,来证明“猫眼”谐振腔良好的稳定性。

图 2 所示的是典型的半外腔 He-Ne 激光器结构。

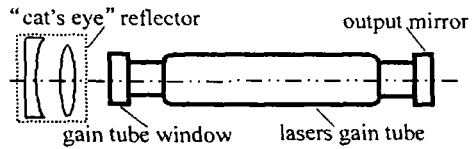


Fig 2 A half-external He-Ne laser with a “cat's eye” reflector as the reflecting mirror

实验中使用的是一支 250mm 长的半外腔的激光增益管(一端是 $R=1m$ 的凹面输出镜,输出率 0.6%;另一端是增透窗片,两面均镀增透膜;毛细管直径 1mm),分别和 3 种反射镜,即平面镜、凹面镜 ($R=1m$) 和“猫眼”逆向器组成 3 种激光谐振腔,即平凹腔、凹凹腔和“猫眼”谐振腔,来对比它们的稳定性。

2.1 3 种反射镜沿导轨移动时激光功率变化

分别将 3 种反射镜固定在行程为 150mm 的直线导轨上与增益管构成激光谐振腔,使激光器正常工作。当 3 种反射镜沿导轨移动时,由于导轨的直线性存在误差,所以反射镜不可避免地微微晃动,从而导致激光输出功率的变化。通过此变化量,可以间接地判断 3 种谐振腔的稳定性。记录下的数据如图 3 所示。

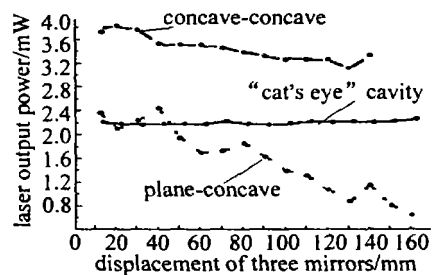


Fig 3 Laser power variety with three mirrors moved along a 150mm lineal guide

通过实验,得到的结论是:平凹腔的最大功率变化为 71.71%;凹凹腔的最大功率变化为 20.26%;“猫眼”腔的最大功率变化为 3.86%。

2.2 激光输出功率的温度漂移

当激光器周围的环境温度变化时,激光谐振腔的腔长会缓慢漂移,组成谐振腔的两端腔镜不可能完全理想地沿光轴方向伸缩,而是不断地做微小扭动从而

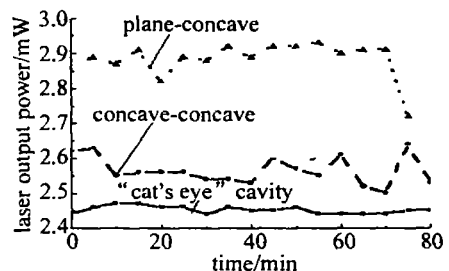


Fig 4 Power drifts of three cavities

使谐振腔失谐, 导致激光输出功率变化。相同条件下, 功率温度漂移的大小可以间接判断 3 种谐振腔的稳定性。

实验结果如图 4 所示, 平凹腔的功率温漂为 7.17%; 凹凹腔的功率温漂为 5.30%; “猫眼”腔的功率温漂为 1.21%。

2.3 3 种谐振腔的失调特性研究

原地沿两个互相垂直的方向(本实验中称上下方向和左右方向)旋转 3 种反射镜(平面镜、凹面镜和“猫眼”逆向器), 分别使激光输出功率从最大到 0 记录下它们的最大旋转角度。此角度的两倍就是可以使激光器出光的最大范围, 反映了 3 种谐振腔的失调特性, 可以直接作为衡量激光器稳定性的指标。

实验结果如图 5 所示, 应用平凹腔和凹凹腔时, 反射镜上下和左右方向的最大旋转角度均约 1', 而使用“猫眼”谐振腔时, “猫眼”逆向器两个方向的最大旋转角度约为 10', 大约是传统激光谐振腔的 10 倍。这个实验直接地、有力地证明了“猫眼”谐振腔相对于传统谐振腔的良好稳定性。

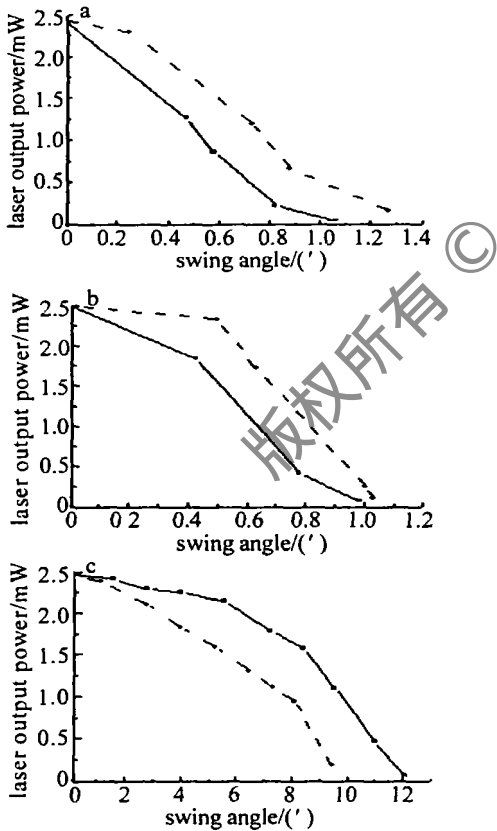


Fig 5 Laser power variety with 3 reflecting mirrors respectively adjusted in up-and-down and right-and-left directions (reflector real line up-and-down direction, dotted line right-and-left direction)
a—plane mirror b—concave mirror c—“cat's eye”

2.1 节和 2.2 节的实验数据中, 有“猫眼”谐振腔的激光输出功率低的情况, 并非“猫眼”谐振腔本身具有缺点, 而是在进行实验时主要关注其稳定性, 而不是

其功率, 所以没有把“猫眼”谐振腔激光器的功率调到最高。2.3 节中的实验说明了“猫眼”谐振腔激光器不会比传统的激光器输出功率低。

3 免调 He-Ne 激光器实验

由于 He-Ne 激光器增益相对较小, 较大的损耗就会使激光器无法工作, 因而对谐振腔的稳定性要求相对较高, 因此, 以前 He-Ne 激光器的调节属于精密的工作。而“猫眼”谐振腔的使用大大提高了激光的稳定性, 使得免调 He-Ne 激光器成为可能。把“猫眼”逆向器拿在手里, 不用其它的任何机械夹持, 就可以实现使激光器连续出光。如图 6 所示, 手持的是“猫眼”逆向器, 使之对准上述实验中的激光增益管, 可以清晰地看到激光输出的光点。这个实验说明, 对于 250mm 长的半外腔增益管, 应用“猫眼”谐振腔不需要精密调节, 完全可以实现免调。而这对于传统构造的 He-Ne 激光器是无法实现的。



Fig 6 Handheld-and-work experiment

4 前景

上述应用“猫眼”谐振腔提高激光器稳定性的结论不仅适用于红光的 He-Ne 激光器, 在绿光的 He-Ne 激光器、棒状的固体激光器中都是适用的。尤其环境相对恶劣的工业领域, “猫眼”谐振腔激光器的优越性会更加明显。预计“猫眼”谐振腔激光器将会成为最常用的一种具有高稳定性的激光器。

5 结论

提高谐振腔的稳定性一直是激光技术的一个重大问题。传统的激光器在稳定性上存在不可避免的缺点, 将“猫眼”逆向器应用在激光谐振腔中做反射镜组成“猫眼”谐振腔使得此问题得以解决。对“猫眼”逆向器的原理进行分析, 并做了一系列对比实验来对比“猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器和现有 He-Ne 激光器在失调特性、温度漂移方面的性能, 得出结论: “猫眼”谐振腔激光器稳定性有显著提高, 达到了以前结构的 He-Ne 激光器无法达到的水平。进行了免调节“猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器的实验。“猫眼”谐振腔不仅可以适用于红光 He-Ne 激光器, 还适用于绿光 He-Ne

(下转第 167 页)

行 1 次测温实验,共进行了 10 次实验。

图 2 显示了测温的曲线,图中上线是瑞利 OTDR 曲线;中线为多次测量的反斯托克斯 OTDR 曲线的重

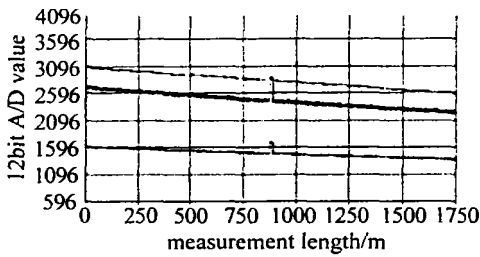


Fig 2 The curves of optical fiber Raman

Table 1 Test datum of temperature / $^{\circ}$ C

number	demodulated temperature of formula (5)	demodulated temperature of formula (8)
1	46.58	45.52
2	46.57	45.53
3	46.59	45.49
4	46.52	45.54
5	46.49	45.49
6	46.71	45.52
7	46.75	45.53
8	47.57	45.48
9	47.53	45.49
10	47.58	45.51
average	46.89	45.51
uncertain	2.18	0.04

叠;下线为 APD 主放大器降低 1 倍时其中 1 次反斯托克斯 OTDR 曲线,表 1 中列出了 1 组 (5) 式和 (8) 式解调测温实验数据。由此可见: (5) 式解调温度测量精度达到 $\pm 1.5^{\circ}$ C; (8) 式解调温度测量精度达 $\pm 0.05^{\circ}$ C,与理论分析一致。

3 结 论

分布光纤喇曼温度传感器系统是光机电和计算机一体化的测量系统,选 1.55 μ m 脉冲激光器构建长距离分布式温度传感器系统,须用新的解调方法来抑制热漂噪声积累,瑞利背向散射光干扰反斯托克斯背向散射光才能提高系统的灵敏度、测温精度和稳定性;取消了恒温槽,降低了系统成本。

参 考 文 献

[1] ZHANG Z X, LIU T F, ZHANG B X *et al*. Laser Raman type distributed optical fiber temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica* 1995, 15(11): 1585~1589(in Chinese).

[2] ZHANG Z X, SHEN W M, GUO N *et al*. A demodulated method of distributed optical fiber Raman photons sensors system [J]. *Acta Photonica Sinica* 1998, 27(5): 467~471(in Chinese).

[3] XIE A D, SHI D H, CHEN Y K *et al*. Temperature measurement sensitivity of a practical real-time temperature measurement system [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 625~629(in Chinese).

[4] LIU S H, JIN X D. Design of a fiber optical thermometer [J]. *Laser Technology* 1995, 19(6): 338~340(in Chinese).

[5] LEES G P. Advances in fiber distributed temperature sensing using the Landau-Placzek ratio [J]. *IEEE Photonics Technology*, 1998, 10(1): 126~128

(上接第 135 页)

激光器、棒状的固体激光器等。“猫眼”谐振腔激光器很可能成为将来最常用的具有高稳定性的激光器之一。

参 考 文 献

[1] SVELTO O, HANNA D C. Principle of lasers [M]. New York Plenum Publishing Corporation, 1998 161~171

[2] OU J M, LI Y, ZHANG S L *et al*. He-Ne laser with a CER cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2000, 415(7): 27~30(in Chinese).

[3] LIN Y B, ZHANG G X, LI Z. An improved “cat’s-eye” retroreflector used in a laser tracking interferometer system [J]. *Measurement Science & Technology*, 2003, 14(6): 36~40.

[4] TAKATSU J I, GOTO M, OSAWA S *et al*. Whole-viewing-angle “cat’s-eye” retroreflector as a target of laser trackers [J]. *Measurement Science & Technology*, 1999, 10(7): 87~90.

[5] ALASIA F, BIRELLO G, CAPELLIA *et al*. The HG5 laser interferometer mercury manometer of the MGC [J]. *Metrologia*, 1999, 36(6): 499~503

[6] ZURCHER W, LOSER R, KYLE S A. Improved reflector for interferometric tracking in 3 dimensions [J]. *Opt Engng* 1995, 34(9): 2740~2473

[7] LIT, SMITH P W, LAB C H *et al*. Mode selection and mode volume

enhancement in a gas laser with internal lens [J]. *Proc IEEE*, 1965, 53(4): 399~400

[8] DMAKOV S A, KLMENTEV S I, KYPRENYUK V *et al*. Low-sensitive to misalignments resonator [J]. *Proc SPIE*, 1994, 2257: 187~192

[9] SHERSTOBITOV V E, AGEICH K A A, BULAEV V D *et al*. Phase conjugation in a high-power E-beam sustained CO₂ laser [J]. *Proc SPIE*, 1991, 1841: 135~145.

[10] DMAKOV S A, HABICH U, KLMENTEV S I *et al*. Comparison of radiation characteristics of lasers equipped with ordinary stable resonator and resonator with cat-eye type mirror [A]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe-Technical Digest* [C]. Piscataway IEEE, 1998 218~218

[11] DMAKOV S A, KLMENTEV S I, KHLOPONNA V. Cavity with a cat’s-eye reflector based on elements of conical optics [J]. *Journal of Optical Technology*, 2002, 69(8): 536~540

[12] FERMIGIER B, LUCAS-LECLIN G, DUPONT J *et al*. Self-aligned external-cavity semiconductor lasers for high resolution spectroscopy [J]. *Opt Commun* 1998, 153 73~77.

[13] RAMOSIZQUIERDO L, BUFTON J L, HAYES P. Optical system design and integration of the Mars observer laser altimeter [J]. *Appl Opt* 1994, 33(3): 307~322

[14] CHENG Y, CHEN B, WANG X B *et al*. Study on diode pumped solid laser (DPSSL) with alignment-free resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 30(11): 973~976(in Chinese).