

猫眼腔激光器的横模变换与频率分裂

胡朝晖 张书练 贾惠波

(清华大学精密仪器与机械学系 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 为了产生多种激光横模,以前的系统相对比较复杂,而且一般只能产生基横模和低阶横模,很难产生高阶横模,同时也很难观察到模竞争中一个频率抑制另一个频率的变化过程。基于猫眼谐振腔激光器和频率分裂技术,提出了一种新型的激光原理综合实验系统。该系统利用猫眼逆向器作为 He-Ne 激光器的一个腔镜,通过调节猫眼逆向器中两镜片间距可输出包括基横模、低阶横模、高阶横模在内的十余种典型横模,并可完成纵模、偏振、出光带宽等多种激光基本特性的实验。同时在基横模状态下,利用谐振腔内加入的石英晶片可实现激光频率分裂及其频差调节。在此基础上又可实现完整的模竞争过程的观察。

关键词 激光器;多横模;猫眼逆向器;频率分裂

中图分类号 TN241 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0123

Transverse Mode Changing and Frequency Splitting of Cat-Eye Cavity Laser

Hu Zhaohui Zhang Shulian Jia Huibo

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

Abstract The former laser systems are complex to realize multiple transverse modes. Only the fundamental mode and low-order modes can be generated, and the high-order modes are hard to be generated. Furthermore, the changing process of one frequency restraining another in mode competition is hard to be observed. A novel synthetical demonstration system of laser principle is presented based on a cat-eye cavity laser and the frequency splitting technology. In the system, a cat-eye retroreflector is treated as the cavity mirror of a He-Ne laser. More than ten typical transverse modes including fundamental mode, low-order modes, and high-order modes can be generated by adjusting the distance between two lenses in the retroreflector. In addition, more experiments of fundamental laser characteristics, such as longitudinal mode, laser polarization, and lasing bandwidth, are also carried out. In the condition of fundamental transverse mode, with a quartz crystal plate put in the cavity, laser frequency splitting and frequency difference adjusting can be achieved. Based on it, the dynamic process of mode competition can be observed.

Key words lasers; multiple transverse modes; cat-eye retroreflector; frequency splitting

1 引 言

谐振腔是组成激光器最基本的三要素之一。构成谐振腔的腔镜主要有平面镜、凹面镜和凸面镜。但是这几种腔镜构成的谐振腔对激光器稳定性要求很高,抗干扰能力较差。为此将猫眼逆向器作为一个腔镜引入谐振腔,显著提高了其稳定性^[1]。这是由于猫眼逆向器可以将来自不同方向的人射光按原路反射回去,即此性能与入射角度无关。最常见的猫眼逆向器结构有三种:第一种由折射率相同但半

径不同的两个半球组成,第二种由一个凸透镜和一个凹面镜组成,第三种就是一个折射率为 2 的理想球体^[2]。由于由半球或理想球体作腔镜所受限制较多,故多选用一个凸透镜和一个凹面镜^[1,3]。在提高激光器稳定性的同时,猫眼也对横模有选择作用,可输出包括基模在内的多种横模模式^[4]。另一方面,在激光教学中,已有不少激光基本特性的实验仪器^[5,6]。但是现有仪器中为实现模竞争、频率分裂观察,均选择基横模光束,抑制高阶横模。而横模观

基金项目: 中德研究中心项目[GZ405(303/3)]资助课题。

作者简介: 胡朝晖(1975—),男,博士后,主要从事激光计量与微纳米光学等方面的研究。

E-mail: huzh99@mails.tsinghua.edu.cn

察激光器虽可多横模运转,但因其结构设计上的限制或缺陷,又只能完成单一横模输出,无法实现模竞争、频率分裂实验。而且一般的多横模观察只能观察到低阶横模,很难观察到高阶横模。为此,本文建立了一套基于猫眼腔激光器的实验系统,以实现包括基横模、低阶横模、高阶横模在内的多横模输出,并能够同时实现激光频率分裂和模竞争。

2 基本原理

猫眼腔镜由一个凸透镜和一个凹面反射镜组成,当凸透镜焦距、凹面反射镜曲率半径和两者间距这三个参量相等时,则光线以小角度入射到该凸透镜中心时,反射光将沿入射光原路返回。此外,微量调节两镜片间距,则猫眼腔镜将等效为一个曲率半径可调的凹面腔镜、凸面腔镜及平面腔镜。腔镜曲率半径的变化,又可改变谐振腔的对称性和衍射损耗,使激光器输出包括基横模和高阶横模在内的各阶横模。

由电磁学理论,激光束在谐振腔内能形成振荡的频率 $\nu_q = qc/2nL$,其中 c 为真空光速, n 为介质折射率, L 为谐振腔长, q 为纵模序数。由于 q 不同,激光束会有多个振荡频率,每一个频率即为一个纵模。相邻两谐振频率的间隔即纵模间隔 $\Delta = c/2nL$ 。但由于受到出光带宽等限制,实际激光器的输出频率多为几个或者一个纵模。当谐振腔中含有多种介质时,总的物理长度 nL 为各段物理长度之和。

在激光谐振腔内置入双折射元件,如:石英晶体、电光晶体、应力双折射片等。该元件将激光束分解为偏振态正交的两束光,即 o 光和 e 光。其折射率不同,分别为 n_o 和 n_e 。由此,在同一个谐振腔下有两个不同的物理长度,也就有两个不同的振荡频率。从而将纵模序数固定时的一个频率(纵模) ν_q 分裂为两个频率(纵模) ν_{qo} 和 ν_{qe} ,也就实现了频率分裂。当谐振腔中置入石英晶体时,在不考虑晶体旋光性的情况下, o 光和 e 光产生的频差 $\Delta\nu$ 为^[7]

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{L} \left[\left(\frac{\sin^2\theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} \right)^{-1/2} - n_o \right] h, \quad (1)$$

式中 ν 为激光频率, L 为谐振腔长(公式中作为谐振腔物理长度的近似), θ 为晶体晶轴与光线之间的夹角, h 为晶体在光路中的长度。由此可见,频差与晶体晶轴与光线之间的夹角 θ 和晶体在光路中的长度 h 相关,改变 θ 或 h 就可改变频差。实际应用中,改变 θ 更易实现。当考虑旋光性时,频差计算非常复杂,但改变 θ 或 h 即可改变频差的结论不变。

以频率分裂为基础,可观察到明显的模竞争。而以往的普通激光器是很难观察到明显模竞争的。这是由于发生模竞争的条件是两个频率的间隔足够小,使其在增益曲线上的烧孔大面积重叠,以致增益不够维持两频率同时振荡,导致其中一个频率熄灭。以往的普通激光器所能够得到的最小频率间隔就是其纵模间隔,即使腔长达到 1 m,其纵模间隔也长达 150 MHz,是难以产生模竞争的。而利用频率分裂技术,可以做到两频率间隔任意可调,容易获得产生模竞争所要求的频率间隔,从而就可以方便地观察到模竞争。

3 实验系统

系统的总体示意图如图 1 所示。系统采用半外腔结构的 He-Ne 激光器,工作波长 632.8 nm。激光电源 LP 给增益管供电。增益管的一端是输出腔镜 M,另一端是增透镜 W。输出腔镜 M 与猫眼逆向器构成激光谐振腔。组成猫眼的凸透镜 L_2 和凹面镜 L_1 安装在一个套筒中,两者间距可通过精密螺旋 B 调节。猫眼逆向器固定在压电陶瓷管 PZT 的一端,PZT 的另一端则固定在调节架上。驱动电源 PD 给 PZT 加压,以推动猫眼逆向器,实现腔长调节。猫眼逆向器与增益管间加入石英晶体片,其晶轴与晶片表面垂直,晶轴与光轴夹角 θ 可通过蜗轮蜗杆转台调节,从而改变频率分裂的频差。整个激光器封装在一个外壳中。在进行横模观测实验时,激光器输出光束经衰减片 A 后照射在 CCD 上,并由计算机采集横模图样。在进行频率相关实验时,激光器输出光束直接入射到扫描干涉仪 S 中。扫描干涉仪被锯齿波电压 SD 驱动,干涉仪输出经信号放大器 AM 后在示波器 OS 上显示频谱图,用以观测纵模、频率分裂和模竞争等。锯齿波信号的同步信号输入示波器的另一通道,作为触发信号。

为获得高阶横模,需减小衍射损耗,而衍射损耗随谐振腔菲涅耳数 N 的增加而减小,菲涅耳数 $N = a^2/\lambda L$ 随毛细管内径 $2a$ 的增加而增加。为此,选择较大毛细管内径,系统中选择 1.6 mm。同时,腔的几何参数 $g = 1 - L/R$ 越小,各阶横模的损耗也越小,也越容易输出高阶横模。为此,选择较小的腔镜曲率半径 R ,系统中选用 $R = 1$ m 的凹面输出镜。对于另一个腔镜即猫眼而言,选择凸透镜焦距和凹面镜的曲率半径均为 20 mm,其间距的初始值也为 20 mm。进行横模实验时利用凹面镜后的精密螺旋微调其间距,以输出高阶横模。

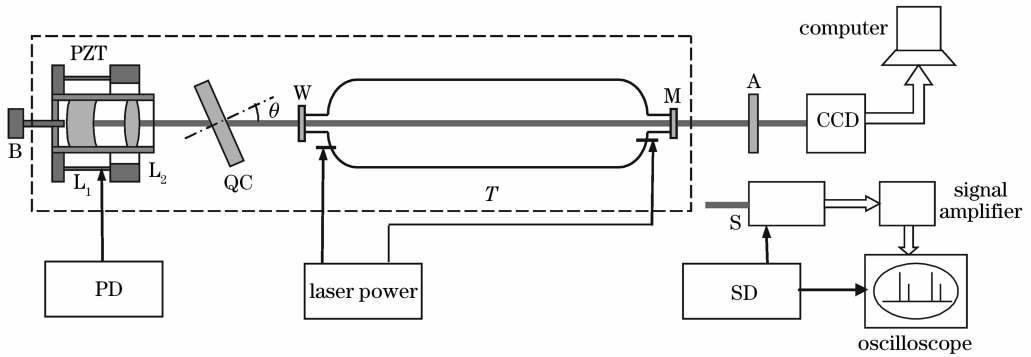


图 1 系统示意图

Fig. 1 Sketch of the system

4 实验结果

4.1 多横模输出

在激光谐振腔内无双折射元件时,通过调节精密螺旋改变凹凸两镜间距,并调整猫眼调节架改变猫眼中心位置,可观察到激光横模图样的变化。该系统可以获得如图 2 所示的十余种典型的矩形对称横模图样:TEM₀₀、TEM₀₁、TEM₀₂、TEM₀₃、TEM₁₀、TEM₁₁、TEM₁₂、TEM₁₃、TEM₂₀、TEM₂₁、TEM₂₂、TEM₃₀、TEM₃₁等,同时可获得 TEM₁₀^{*}等简并模以及 TEM₂₁(circle)等圆形模,除此之外还可观察到多种典型横模叠加的复杂横模。

对于低阶横模,如 TEM₀₀、TEM₀₁、TEM₁₀、TEM₁₁等,出现的频率较高,且图样稳定。而高阶横模,如 TEM₁₀、TEM₀₄、TEM₄₁、TEM₁₄、TEM₅₀、TEM₀₅等,则出现机率极少,且图样黯淡、模糊、不稳定。这说明横模的阶数越高,谐振腔对其的衍射损耗也越大,越难振荡输出,其稳定性也越差。

进一步实验表明,在改变猫眼逆向器与增益管间距时,间距越短,则系统越容易输出高阶横模,而且所输出的横模种类也越多。间距为 50 mm 时,可观察到 TEM₀₄、TEM₁₄ 等高阶横模;当间距为 200 mm 时,则只能观察到 TEM₀₀、TEM₀₁、TEM₁₀ 等低阶横模。

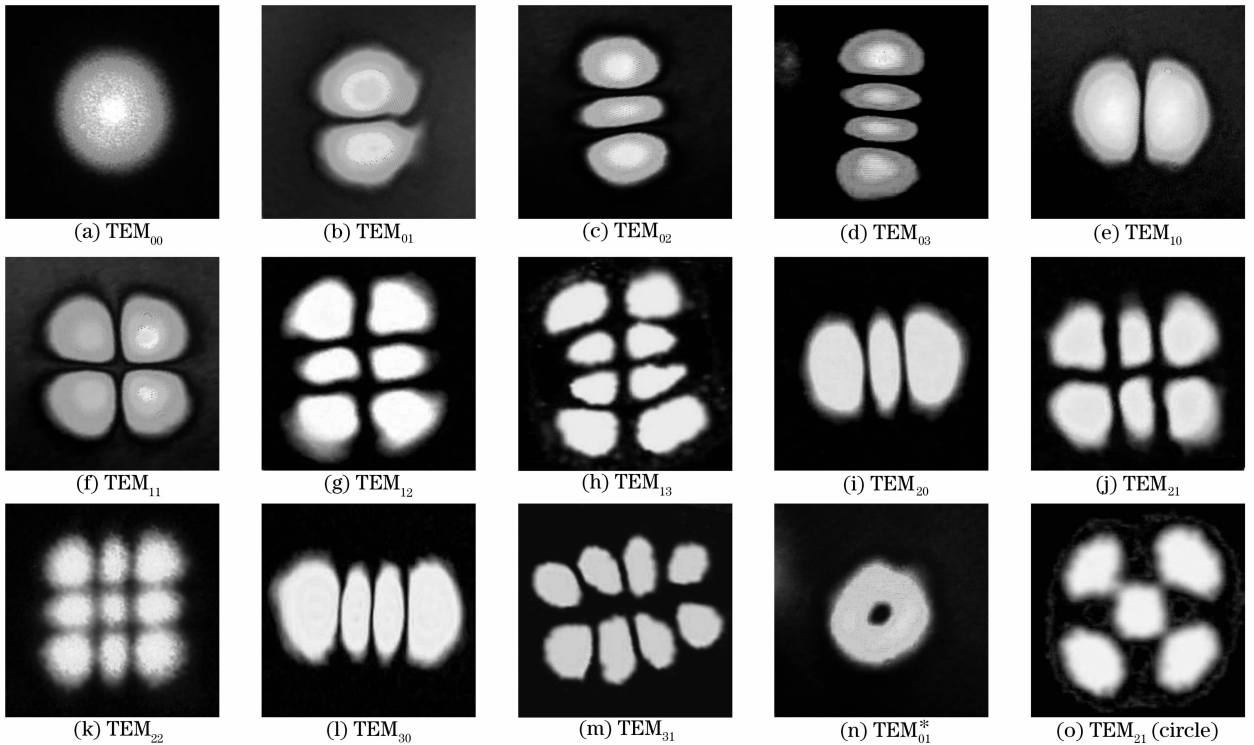


图 2 输出的典型横模图样

Fig. 2 Typical patterns of transverse modes

因此,为获得高阶横模,应在不影响置入双折射元件的前提下,尽量缩短猫眼逆向器与增益管的间距。在进行后续频率相关实验时,为获得典型的频谱图,均使用基横模。

4.2 纵模观测与频率分裂

改用扫描干涉仪和示波器可以观察到激光的频谱图像,并通过扫描干涉仪的自由光谱区测得激光的纵模间隔、出光带宽等。

谐振腔中加入石英晶体片并使其晶轴与光轴重合,由于改变了谐振腔的物理长度 nL 和腔内损耗,纵模间隔和出光带宽会有所改变,可以重新测得此时的纵模间隔和出光带宽等。旋转石英晶体片,改变其晶轴与光轴的夹角 θ ,可以在示波器上明显地观察到频率分裂现象,即一个纵模分裂为两个频率。通过检偏器可测得分裂出的两个频率偏振方向相互垂直。从 0 逐渐增加 θ ,由示波器测量频率分裂量,并由蜗杆旋钮对应表盘上的刻度测量 θ ,即可测得频率分裂量随 θ 的变化曲线。

图 3 即为实验所测曲线。其中星号表示实测数据,实线为拟合曲线。在 5° 以下没有观察到频率分裂现象。 5° 时发生频率分裂,在一个频率脉冲曲线旁长出一个新脉冲,此时频差为 62 MHz,频差与两脉冲间距相对应。频差随着石英晶体转角变化而改变,如图 3 所示。在 15° 、 21.5° 、 24° 、 26.5° 附近的很小范围内,由于两个频率非常靠近,产生强模竞争,一个频率抑制掉另一个频率,因而观察不到频率分裂现象。当转角大于 27.6° 时,激光器出光很弱,一个频率消失,不再有频率分裂现象。当转角大于 32° 时,激光器完全不出光。实验测得纵模间隔 $\Delta = 343$ MHz。为反映出频差 $\Delta\nu$ 与纵模间隔 Δ 的比例关系,图 3 同时给出了频差 $\Delta\nu$ 与相对频差 $\Delta\nu/\Delta$ 的数值。

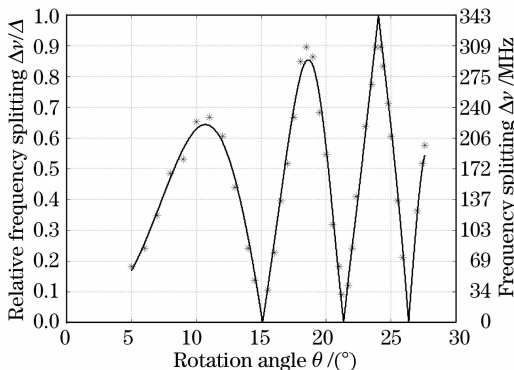


图 3 实验测得频率分裂量 $\Delta\nu$ 随石英晶体转角 θ 的变化曲线

Fig. 3 Measured frequency splitting $\Delta\nu$ versus rotation angle of quartz crystal θ

4.3 模竞争观察

旋转石英晶体片使一个纵模刚好产生频率分裂,此时频差约几十 MHz。再对与猫眼逆向器相连的 PZT 逐渐增加直流电压,驱动猫眼沿光轴方向移动,实现腔长扫描。此时在示波器屏上观察到这两个分裂的频率同时移动,并且在出光带宽的不同频段有不同的模竞争现象:有的频段模竞争激烈,一个频率抑制了另一个频率的产生,仅存在一个频率;有的频段模竞争相对较弱,两个频率同时存在,但一个频率增加的时候另一个频率减弱,形成此起彼伏的现象。

5 结 论

基于猫眼谐振腔 He-Ne 激光器的本实验系统,具有结构简单、调节方便、现象直观、功能全面等优点。既可直观演示激光原理教学中的基本概念:如各阶横模、纵模、偏振态、出光带宽等,也可演示高级的激光物理现象:如频率分裂和模竞争等。该系统将以往很难观察到的模竞争的动态过程得以演示,使包括基横模、低阶横模、高阶横模在内的十余种典型横模输出的调节变得非常方便。

参 考 文 献

- Xu Zhiguang, Zhang Shulian, Du Wenhua *et al.*. Ultra stable and adjustment-free "cat's eye" cavity He-Ne laser[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 133~137
- 许志广,张书练,杜文华等. 高稳定及免调试“猫眼”谐振腔 He-Ne 激光器的研究[J]. *激光技术*, 2006, **30**(2): 133~137
- Lin Yongbing, Zhang Guoxiong, Li Zhen. Design and optimization of a cat's-eye retroreflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1245~1250
- 林永兵,张国雄,李真. 猫眼逆向器的设计与优化[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1245~1250
- Du Wenhua, Zhang Shulian, Li Yan. Optimizing design of the cat's eye cavity in a nanometer laser ruler[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1305~1308
- 杜文华,张书练,李岩. 纳米激光器测尺中猫眼腔的优化设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1305~1308
- Xu Zhiguang, Zhang Shulian, Liang Dong *et al.*. Research of the laser transverse mode modulated by the cat's eye resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 86~90
- 许志广,张书练,梁栋等. 猫眼激光谐振腔横模选择特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 86~90
- Zhang Shulian, Tang Liying, Li Chunling *et al.*. Experimental He-Ne laser of frequency splitting and mode competition[J]. *Physical Experiments*, 1992, **13**(1): 7~10
- 张书练,唐丽英,李春苓等. 频率分裂与模竞争现象教学实验 He-Ne 激光器[J]. *物理实验*, 1992, **13**(1): 7~10
- An Yuying, Shi Shunxiang, Wen Jianguo. Multi-transverse modes running He-Ne laser[J]. *Laser and Infrared*, 1992, **23**(1): 52~58
- 安毓英,石顺祥,文建国. 多横模运转 He-Ne 激光器[J]. *激光与红外*, 1992, **23**(1): 52~58
- Zhang Sunlian. *Principles of Orthogonal Polarized Laser* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 57~58
- 张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 57~58