

腔内带圆形空心波导的可调谐 窄带脉冲染料激光器

吕振国 周建英 李庆行 余振新

(中山大学激光与光谱学研究所, 广州 510275)

提 要

本文报道了一种腔内带圆形空心波导和掠入射光栅的可调谐窄带脉冲染料激光器;实验结果表明:该激光系统能获得基横模、窄频带和高效率的激光输出。文中对系统设计机理也进行了分析。

关键词: 圆形空心波导, 掠入射光栅; 窄带脉冲染料激光器。

由于窄频带可调谐脉冲染料激光器在物理、化学和生物学等领域有广泛应用,因此人们不断地研究用各种方法控制脉冲染料激光器的输出模式,以求获得高质量的窄频带激光振荡输出^[1~3]。本文报道一种新的设计:在一般李特曼(Litman)谐振腔^[4]中加入一根圆形空心波导,实验测量结果表明:与一般的李特曼谐振腔相比,该激光系统的输出在能量、模式和频带宽度等输出参数方面有很大的改善。

一、设计思想

对一般李特曼谐振腔结构,有^[4,5]

$$\Delta\lambda = \frac{2\sqrt{2}\lambda}{\pi Lm} a, \quad \frac{L \cos \theta}{2d} = \frac{\lambda}{\pi\omega}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为该腔的激光输出频带宽度, ω 为光束腰部半径, d 为掠入射时光栅中心到染料池的距离;由(1)式知道,在光栅常数 a 、衍射级数 m 和波长 λ 一定的情形下,增加光栅的照明宽度(L),就可使激光输出频带变窄;然而,要获得大的 L , 必须使 $\cos \theta \rightarrow 0$, 即光栅入射角 θ 趋于 90° , 此时激光腔内的衍射损耗将剧烈增加。按图 1 所示,该系统的光谱频带宽度为

$$\Delta\lambda = [(\Delta\lambda_\lambda)^2 + (\Delta\lambda_\theta)^2]^{1/2} = \left[\left(\frac{\partial\lambda}{\partial\theta_1} \right)^2 (\Delta\theta_1)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial\theta_2} \right)^2 (\Delta\theta_2)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $(\partial\lambda/\partial\theta)$ 为角色散, $\Delta\theta$ 为一束光的入射角或出射角的变化值。根据(3)式可知,若有某种方法能提高李特曼腔内激光束的准直效果,就可压窄激光输出频带。同时,也克服了一般李特曼腔中的缺点:即压窄激光输出频带是以增加腔内衍射损耗为代价的。文献[6,7]采用了在腔内插入柱面会聚透镜或扩束系统来准直光束,以达到压窄激光输出频带的目的;尽管这些方法也有效,但它们具有增加腔内吸收损耗,不易调整和不能获得基模膜输出等缺点。

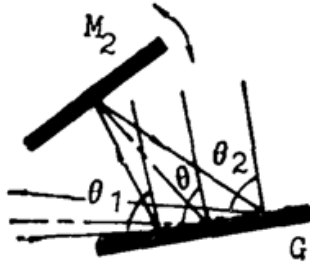


Fig. 1 Detail of the optical path between a grazing-incidence grating G and a tuning fully reflecting mirror M_2

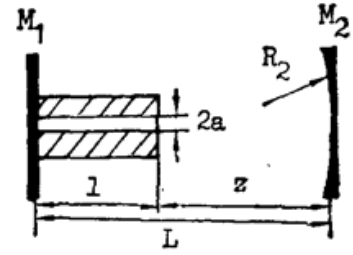


Fig. 2 A hollow circular dielectric waveguide laser cavity

图 2 所示的圆形空心波导谐振腔可用一组正交归一向量 V 来表示腔内波导本征模的模函数, 即

$$TV = AV, \quad (3)$$

式中 T 为腔内往返一次的复转换矩阵; A 为其本征值。作者首次采用矩阵非对角化分析法的计算表明^[8]: 在激光腔内插入一根适当的圆形空心波导后, 发现它在谐振腔内能起控制模式和准直光束的作用, 同时还能使谐振腔内高阶模能量耦合成为低阶模能量, 从而大大加强了该谐振腔的基模激光振荡输出。

二、实验技术

在实验中, 脉冲染料激光的泵浦源采用脉宽为 10 ns、输出能量为 4.2 mJ~6.4 mJ、脉冲频率为 1 Hz 的调 Q Nd³⁺:YAG 激光器的倍频光 ($\lambda = 532$ nm)。带圆形空心波导的激光腔结构如图 3 所示。若丹明 6G 的浓度为 2.9×10^{-4} mol; 光栅 (G) 刻线为 1800 l/mm、闪耀波长为 600 nm、宽度为 40 mm; 输出镜 M_1 在 500~620 nm 范围内的透射率为 60%; 调谐镜 M_2 为全反镜; 激光腔长为 200 mm; 在实验过程中, 曾采用了各种不同尺寸的圆形空心波导, 发现长为 80 mm、内径为 0.6 mm 的圆形空心波导最适合于本实验的要求。所选波导管内径过小, 则腔内的衍射损耗较大; 而所选波导管内径过大, 又达不到限横模和准直光束的效果; 所以对不同谐振腔结构和增益的脉冲染料激光器, 应选用不同孔径和长度的圆形空心波导, 方能达到限横模和准直光束的最佳效果。带圆形空心波导的李特曼腔调整步骤为

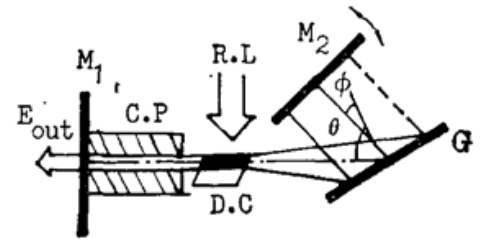


Fig. 3 Schematic diagram of the Littman cavity with hollow circular dielectric waveguide
C. P.—a hollow circular dielectric waveguide of length = 80 mm and internal diameter = 0.6 mm

(1) 用输出镜 M_1 和全反镜 M_2 构成一个平-平激光腔, 调整到使其输出的激光达到最强; (2) 在紧贴着输出镜 M_1 这边的腔中插入一根内径为 0.6 mm、长为 80 mm 的圆形空心波导, 仔细调节波导管, 不仅使其激光输出能量达最大, 同时还应使其输出激光在远场处为一明亮的光点; (3) 拿掉无波导管那边的反射镜 M_2 , 按图 3 所示放置光栅 G 和调谐全反镜 M_2 , 调整 G 和 M_2 , 使其激光输出光斑在远场处为一明亮的光点。实验中用平面法布里-珀罗标准具分析输出激光频带, 用相机摄下法布里-珀罗标准具焦平面上的干涉圆环, 再用自动记录扫描黑度计记录和分析。

三、实验结果和讨论

(1) 用一般李特曼腔(图 3 中取走圆形空心波导 $C.P.$), 仅当 $\theta \geq 85^\circ 18'$ 时, 在平面法布里-珀罗标准具焦平面上才能出现明暗相间的干涉条纹, 并测得 $\theta = 87^\circ 20'$ 时的激光输出频带宽度为 12 GHz(如图 4 所示)。而用腔内带圆形空心波导的李特曼腔(图 3), 在 $\theta \geq 69^\circ 5'$ 时, 就能在平面法布里-珀罗标准具焦平面上出现明暗相间的干涉条纹, 并测得 $\theta = 85^\circ 37'$ 时的激光输出频带宽度为 2 GHz(如图 5 所示)。本实验用的平面法布里-珀罗标准具的自由光谱区为 20 GHz, 其分辨极限约为 2 GHz。所以对腔内带波导的李特曼谐振腔而言, 只要掠入射角 $\theta > 85^\circ 37'$, 则该腔的输出激光频带宽度一定小于 2 GHz。

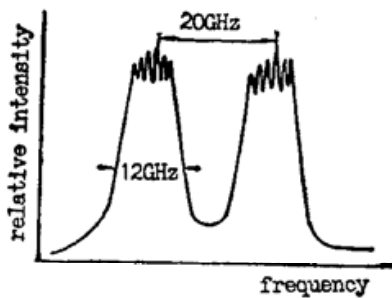


Fig. 4 Characteristic of laser output linewidth for a basic Littman cavity at the grazing incidence angle $\theta = 87^\circ 20'$

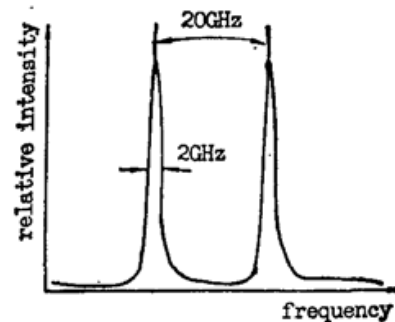


Fig. 5 Characteristic of laser output linewidth for a Littman cavity with a hollow circular dielectric waveguide at the grazing incidence angle $\theta = 85^\circ 37'$

(2) 实验发现腔内带有圆形空心波导的李特曼腔的激光输出光斑在远场处为一明亮的圆点, 即该腔的激光输出模式为基横模如图 6 所示; 当此时光栅入射角 θ 从 $60^\circ \rightarrow 89^\circ$ 范围内变化时, 该脉冲染料激光的输出能量 E_{out} 在 $1.12 \text{ mJ} \sim 290 \mu\text{J}$ 范围内变化。一般李特曼腔的激光输出光斑在远场处并非是一明亮的圆点, 即此时激光输出模式为高阶横模, 如图 7 所示。当此时光栅入射角 θ 从 $60^\circ \rightarrow 89^\circ$ 范围内变化时, 该脉冲染料激光的输出能量 E_{out} 在 $720 \mu\text{J} \sim 44 \mu\text{J}$ 范围内变化。

上面实验测量结果对比可知, 在一般的李特曼腔内插入一根内径为 0.6 mm、长为 80 mm 圆形空心波导后, 能使脉冲染料激光输出参数得到很大的改善, 主要体现在: 在光栅入射角 θ 相同情形下, 腔内带圆形空心波导的李特曼腔与一般李特曼腔相比, 前者能明显地比后者获得更窄的输出激光频带和有更高的激光能量输出, 且其输出模式也更好。作者认为导致这些参数改善的原因是: (i) 在一般李特曼腔内插入一根合适的圆形空心波导后, 由于在谐振腔内的激光振荡模式由原来的高阶横模变成了基横模, 所以大大提高了腔内传播光束的准直效果, 这就使图 1 中光栅 G 上的入射光和出射光的角色散大大减小, 也即使(3)式中的 $(\partial\lambda/\partial\theta_1)^2(\Delta\theta_1)^2$ 和 $(\partial\lambda/\partial\theta_2)^2(\Delta\theta)^2$ 这两个量明显变小, 结果在光栅入射角 θ 一定情况下, 由于腔内圆形空心波导的存在, 而使激光输出频带明显变窄; (ii) 由于腔内的圆形空心波导除了对腔内激光振荡模式进行选择和控制外, 还能使腔内高阶横模的激光能量耦合成为低阶横模的激光能量, 结果使得腔内加圆形空心波导后, 不但不象一般腔内加小孔光阑限横模那样使激光输出能量减小, 甚至还能使输出能量增加, 圆形空心波导在谐振腔内的这种模式间



Fig. 6 The far-field pattern of dye laser for a Littman cavity with hollow circular dielectric waveguide

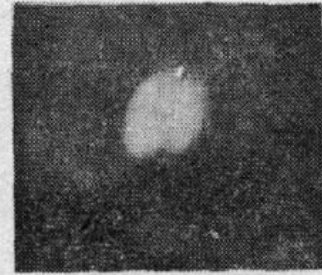


Fig. 7 The far-field pattern of dye laser for a basic Littman cavity

相互耦合作用和文献[9, 10]报道的实验结果是相符的

参 考 文 献

- [1] A. Lago *et al.*; *Appl. Phys.*, 1989, **B49**, No. 1, 73~76.
- [2] T. D. Raymond *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, **1**, No. 20 (Oct), 1116~1118.
- [3] P. Ewart *et al.*; *Opt. Commun.*, 1988, **71**, No. 3/4 (May), 197~201.
- [4] M. G. Littnan *et al.*; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 14 (Jul), 2224~2227
- [5] M. K. Iles; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 6 (Mar), 985~986.
- [6] J. A. Lisboa *et al.*; *Opt. Commun.*, 1983, **44**, No. 6 (Feb), 393~396.
- [7] T. Chang *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 21 (Nov), 3651~3654.
- [8] Zhou Jianying *et al.*; *Opt. Commun.*, (to be published).
- [9] Zhou Jianying *et al.*; *Opt. Commun.*, 1989, **74**, No. 1/2 (Dec), 75~79.
- [10] 吕振国等;《光学学报》, 1991, **11**, No. 3 (Mar), 285~288.

Single transverse mode narrow bandwidth pulsed tunable dye laser with hollow circular dielectric waveguide

LU ZHENGGUO, ZHOU JIANYING, LI QINGXING AND YU ZHENXIN

(Institute for Laser and Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

(Received August 1990; revised 20 December 1990)

Abstract

This paper presents a novel widely tunable, pulsed dye laser with single transverse mode narrow bandwidth which can be constructed by using a grazing-incidence grating in conjunction with a hollow circular dielectric waveguide. The experimental results show that the single transverse mode narrow bandwidth laser output can be obtained while maintaining a high lasing efficiency. The mechanism of the improvement is also discussed in this paper.

Key words: hollow circular dielectric waveguide, grazing-incidence grating; narrow bandwidth pulsed dye laser.