

文章编号: 0258-7025(2010)10-2472-05

片状陶瓷 YAG 激光器的束转动 90° 环形非稳腔设计与数值模拟

杨美霞 钟 鸣 夏惠军 刘文兵

(西南技术物理研究所 四川 成都 610041)

摘要 提出将束转动 90° 环形非稳腔应用于片状陶瓷 YAG 激光器的设计。该设计采用两个薄片状 YAG 增益介质垂直放置形成屋脊镜,与另一屋脊镜共同构成光束旋转系统。采用快速傅里叶变换方法,计算了该腔的空腔模式分布。分析了该腔对抽运不均匀影响光束质量进行补偿的机理。并以片状增益介质侧面抽运不均匀为模型,计算比较了束转动 90° 环形非稳腔与常规腔的光场分布。说明束转动 90° 环形非稳腔应用于固体激光器,对抽运技术引起的不均匀增益平均化,改善了光束质量。为束转动 90° 环形非稳腔在固体激光器的应用提供依据。

关键词 激光器;束转动 90° 环形非稳腔;增益均匀补偿;片状陶瓷 YAG 激光器

中图分类号 TN248.1; O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2472

Design and Numerical Simulation for Unstable Ring Resonator with 90° Beam Rotation Employed in Ceramic YAG Disk Laser

Yang Meixia Zhong Ming Xia Huijun Liu Wenbing

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract A design of unstable ring resonator with 90° (UR90) beam rotation employed in ceramic YAG disk laser is presented. The system of beam rotation is built up by a prism and two thin ceramic YAG disks which are placed vertically. Fast Fourier transform method (FFT) is used to simulate the mode of UR90 beam rotation. The effect of inhomogeneous gain on laser mode of an UR90 beam rotation is also analyzed. For two laser-diode side-pumped disk laser, the difference between the mode of UR90 and normal unstable resonator is compared. It provides evidences that UR90 beam rotation adopted by solid-state laser is feasible.

Key words lasers; unstable ring resonator with 90° beam rotation; inhomogeneous gain compensate; ceramic YAG disk laser

1 引 言

20 世纪 70 年代末, S. I. Zavgorodneva 和 Yu. A. Anan'ev 等^[1,2]先后提出束转动的概念,他们均指出场转动型非稳腔在激光中的应用前景。1983 年, V. N. Kuprenyuk 等^[3]首次报道了 90° 束转动环形非稳腔 (UR90), 认为此腔可以减小腔的失调灵敏度以及因增益介质不均匀化导致的光学畸变, 并从低增益激光介质中得到实心输出光束。之后从理论和实验上对 UR90 非稳腔进行了许多研究, 验证了 UR90 腔的一系列优越性, 并得到好的光束质量^[4~8]。1986 年, Paxton 等^[9]对 UR90 进行了

理论研究。1988 年 Holswade 等^[10]报道了将其用于 CO_2 激光器的实验结果, 光束质量 (BQ) 最好值为 1.06, 验证了该腔对系统失调灵敏度低的说法。1997 年, 周大正等^[11]将 UR90 腔用于化学氧碘激光器, 测量了输出光斑的近场相位分布及远场强度分布, 得到当激光输出平均功率为 2 kW 时, 光束质量 β 为 3~4 的实验结果。比同样条件下常规非稳腔的结果好 1 倍。1999 年, 金玉奇等^[12,13]报道了将 UR90 腔应用于千瓦级化学氧碘激光器, 实验中获得了在放大率 $M=1.695$ 时, 4.0~5.0 kW 的激光平均输出功率。空心光束输出的激光光束质量为

收稿日期: 2009-12-25; 收到修改稿日期: 2010-03-18

作者简介: 杨美霞 (1978—), 女, 博士研究生, 主要从事强激光技术方面的研究。E-mail: yangmx0430@163.com

导师简介: 钟 鸣 (1957—), 男, 博士, 研究员, 主要从事强激光技术方面的研究。E-mail: office@xiwi.net

3.2 倍衍射极限。同时对空心光束输出特性进行了分析,并验证了 UR90 腔能够很好地起到空间平均的效果,对系统失调灵敏度低。此前的研究均将 UR90 腔应用于低增益大体积的气体、化学、铜蒸气等激光器中,事实上 UR90 腔也可用于固体激光器,起到抽运效率高,对增益介质由于抽运不均匀引起的热畸变均匀化,抗系统失调等作用,有效地改善固体激光器输出激光的光束质量。本文报道了该腔应用于固体激光器的设计以及数值模拟。

2 UR90 应用于片状陶瓷激光器的设计

UR90 腔核心特点是光束旋转、扩束、耦合输出。UR90 腔的光束旋转由两个相对的屋脊镜实现,两个屋脊镜的棱位于两个平行的竖直平面内,成空间 45°角。在腔内放置望远镜系统对光束进行扩束,同时决定腔的放大率和输出耦合率。输出耦合方式采用圆孔光阑,输出激光为环状。采用薄片激光器设计可以允许介质具有高的抽运功率密度而不产生显著的温度梯度,当抽运区尺寸远大于薄片厚度时,热流可认为是沿厚度方向的一维分布。同时,片状增益介质表面积大,厚度薄,通光口径大,因此本设计采用两片陶瓷互相垂直放置,代替一个屋脊镜,与另一个屋脊镜相对放置,共同实现光束旋转。设计如图 1 所示。

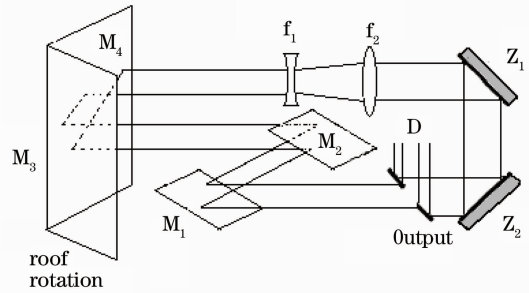


图 1 UR90 示意图

Fig. 1 schematic diagram of UR90

图中 M_3M_4 代表一个屋脊镜。凹透镜 f_1 和凸透镜 f_2 构成腔的扩束系统。 Z_1Z_2 是端面垂直的两片陶瓷片,它们共同构成与屋脊镜 M_3M_4 相对的另一个屋脊镜。陶瓷片向着腔内的表面镀波长为 1064 nm 激光的 45° 增透膜,后表面镀波长为 1064 nm 激光的 23° 内高反膜。D 代表输出耦合圆孔光阑,圆孔的半径和增益介质的尺寸决定了系统的放大率。 M_1, M_2 代表两个平面反射镜,它们共同实现对光束在光轴垂直面上的斜上 45° 方向平移。这样的设计不仅结构相对简单便于调节,减少腔内光学元件,节约成本,可以有效地减小激光器尺寸,而且可以通过调节片状增益介质的位置得到充分增大的正向模模体积,起到反向模抑制的效果。

腔内的光场传输可以从图 2 看到。光束 a 经过屋脊镜 M_3M_4 ,在谐振腔内环行,位于屋脊镜的斜表面,即与光轴垂直的表面上,入射光斑和出射光斑的示意图如图 2 所示。

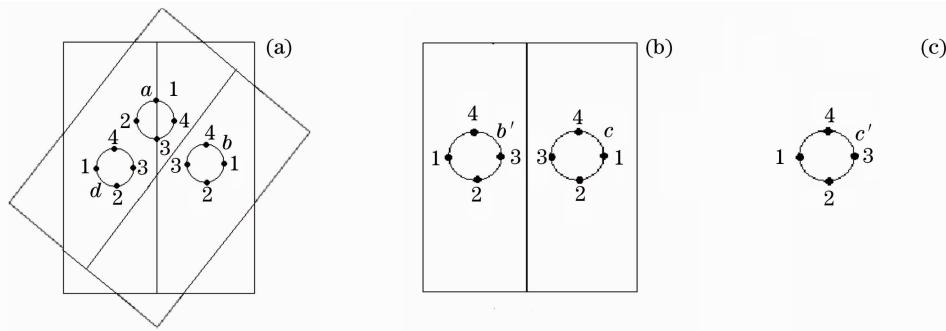


图 2 光束旋转示意图。(a)屋脊镜 M_3M_4 上光斑, (b)屋脊镜 Z_1Z_2 上光斑, (c)环形一周后的光束

Fig. 2 Schematic diagram of beam rotation. (a)optical spot on prism M_3M_4 ,

(b) optical spot on prism Z_1Z_2 , (c) optical spot after a circle

图 2(a)是在竖直面内旋转 45° 的屋脊镜上光斑示意图, a, b 分别是入射光和出射光,观察角度是面向棱镜内侧。1, 2, 3, 4 表示光斑上的四个位置。图 2(b)是垂直水平面放置的屋脊镜上光斑的示意图, b', c 分别是入射和出射光, b' 和 b 为同一光束,区别

在于 b' 代表观察方向逆着光传播方向和 b 代表顺着光传播方向。同理 c' 和 c 为同一形状大小的光束。具体的过程是:光束 c' 通过一个圆孔光阑后,光斑变为与 a 同样大小,但是位于 a 的斜下方 d 处,所以先经过平移系统将其平移到 a 位置,经过左面屋脊镜

M_3M_4 从 b 位置出射,再先后经过凹透镜和凸透镜实现扩束,到达对面屋脊镜 Z_1Z_2 的 b' 位置,从 c 位置出射,再经过圆孔光阑反射输出,中心部分形成正反馈,继续在腔内形成环形振荡。由图中光斑的 1,2,3,4 这四个位置的变化可知,环形一周后的光束 c' 相对 a 逆时针旋转了 90° ,如图 2(c) 所示。

3 UR90 腔的空间平均效应

由 2 节的分析可以看到,由于光束在环形腔内旋转扩束的交替,光束每次经过增益介质时,相当于光束的某一位置扫过增益介质的不同区域。如果增益介质的不同区域增益不同,经过光束环形振荡多次后,这种多次旋转和扩束就会对空间的不均匀因素产生平均化效果,比如增益介质折射率不均匀,抽运光强分布不均匀、热透镜效应等影响光束质量的不均匀因素。对于环形输出的束转动 90° 环形非稳腔,利用其放大率和旋转角度计算并绘出其空间平均效应示意图如图 3 所示。可知放大率为 2,旋转角度为 90° 。

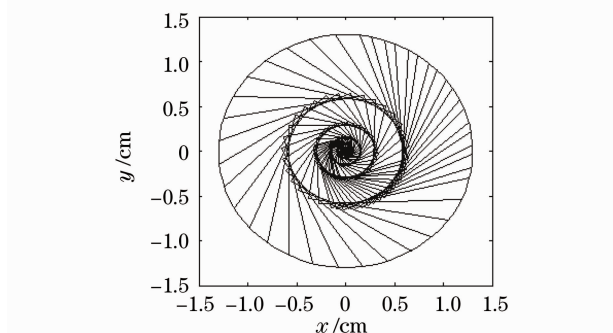


图 3 空间平均轨迹图

Fig. 3 Averaging track diagram in the space

由图 3 可以看出,对径向角向增益分布不均匀的情况,采用环形输出的 UR90 腔都可以起到很好的均匀化效果。原理上,也可以实现光束旋转的角度更小,这样可以得到更精细的平均效果。

4 计算方法

快速傅里叶变换方法具有计算速度快,可得到二维光场分布等优点,主要基于线性理论和离散快速计算技巧^[14]。采用快速傅里叶变换方法计算了 UR90 空腔模式。定义 L_1 为输出光阑到扩束系统凹透镜前表面的光束传输距离, L_2 为扩束系统的长度, L_3 为扩束系统后端凸透镜距离输出光阑的光传输距离。计算中以输出耦合镜的位置作为参考平

面,将一初始平面波光场代入,先后经过该腔各个光学元件及空间距离衍射变换。环形一周后,回到孔径光阑输出镜的位置,输出部分被反射输出,剩余部分继续在腔内环形。如此迭代计算,直到模场分布达到稳定。其中输出镜为圆孔光阑,计算时若只考虑光阑引起场振幅的变化,则光阑前后的光场分布变化关系就简单表述为孔径函数。利用孔径函数与入射光场相乘来表示出射光场

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi_0(x, y) & \sqrt{x^2 + y^2} < a \\ 0 & \sqrt{x^2 + y^2} \geq a \end{cases}, \quad (1)$$

式中 φ_0 为初始光场复振幅, φ 为经过光阑后的光场复振幅, a 为输出耦合镜内孔半径, x, y 描述与光轴垂直平面上的空间位置;假设光场的旋转在同一个平面内实现,则光束旋转可表示为 $\varphi(x, y) = \varphi_0(y, -x)$ 。

光场沿光轴方向空间传播采用角谱公式

$$\varphi(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[\varphi_0(x, y)] \times \exp[ikd \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] \}, \quad (2)$$

式中 d 表示空间传播距离, f_x, f_y 是空间频率, $\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶变换及反变换; Hunt 等^[15]曾经研究了经过望远镜系统后对光场复振幅的变化,得到初始光场与经过扩束系统后的光场复振幅分布关系

$$\begin{aligned} \varphi(-M_x, -M_y) = \\ -M^{-1} \mathcal{F}^{-1} \{ \exp[-i\pi\lambda L(x^2 + y^2)] \mathcal{F}[\varphi_0(x, y)] \}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 M 为扩束系统放大率, L 为扩束系统的两透镜间距。

5 UR90 腔的模式计算

采用 3 节的方法计算了 UR90 空腔光场模式,其中选用放大率 M 为 2,输出镜内孔半径 4.6 mm,望远系统两透镜焦距分别为 -200, 400 mm。 L_1 为 356 mm, L_2 为 200 mm, L_3 为 200 mm。

计算结果是光场腔内渡越 100 次归一化的结果,在 100 次渡越之前光场已达到稳定,两次渡越的光场振幅之比已经恒定为 1。图 4(a) 为输出耦合镜处的输出环形光斑,图 4(b) 为 800 cm 透镜对其聚焦后焦平面的远场分布,根据测量远场发散角的方法可以计算判断该输出激光远场发散角为 0.0735 mrad,接近衍射极限。这是理想状态下的输出光束,实际情况中会存在光学元件加工精度、腔调节的误差,而 UR90 能够对这些情况起到一定的补偿作用,使光束质量优于常规腔。

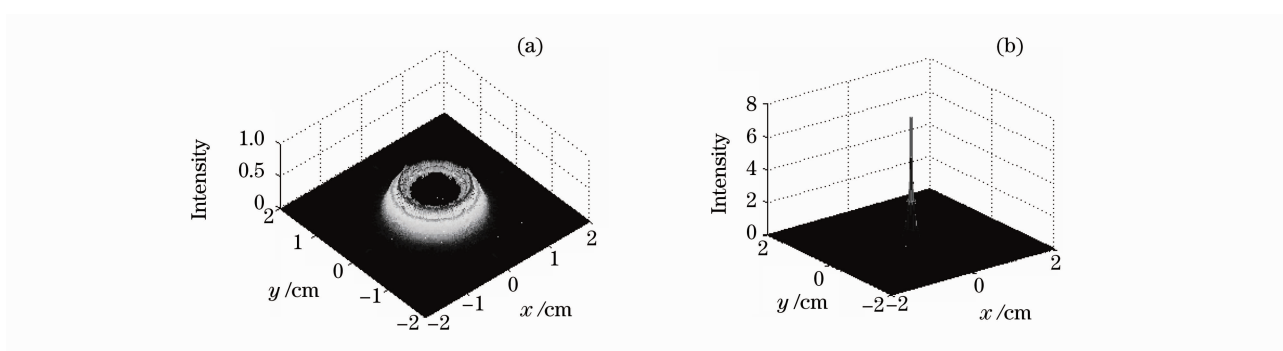


图 4 UR90 腔模式计算。(a) 近场光斑, (b) 远场光斑

Fig. 4 Simulation of mode of UR90. (a) near-field pattern, (b) far-field distribution

6 对固体增益介质抽运不均匀平均化的效果计算

假设增益介质的增益系数与抽运光强呈线性关系。在激光二极管线阵侧面抽运的情况下, 由于增

益介质内抽运光的传播和吸收, 引起的抽运光强分布可以得到介质中增益分布模型。图 5 给出了 2 个激光二极管线阵侧面抽运圆片增益介质输出光束的比较。

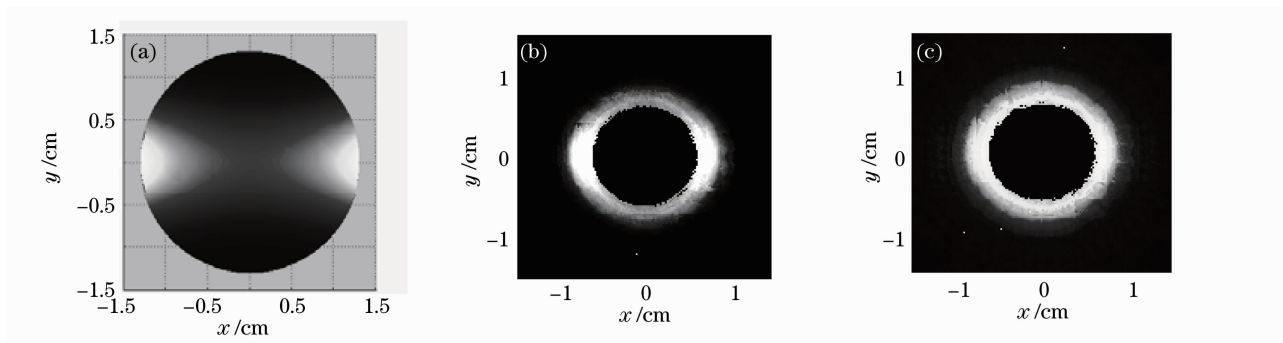


图 5 输出光束比较。(a) 抽运不均匀, (b) 常规腔输出, (c) UR90 输出

Fig. 5 Comparison of output beam. (a) inhomogeneous pump,

(b) output beam of conventional unstable resonator (CUR), (c) output beam of UR90

图 5(a) 为介质内抽运光强分布在对称的两侧面抽运光入射区域, 抽运光较强, 沿着抽运光传播方向, 逐渐减小。由图可知, 由于抽运光在增益介质内的吸收情况, 以及抽运源在增益介质侧面的布置方式, 在薄片增益介质中形成增益大小不同的各个增益区。在常规的平平腔或者望远镜非稳腔, 由于增益介质不均匀增益的积累, 势必形成光强分布极不均匀的输出激光。在激光的很多应用领域, 对光场分布均匀性要求极高, 这就要对抽运方式, 以及腔型设计进行改进和提高, 这里以上述 2 个激光二极管线阵侧面抽运的极端不均匀情况为例, 计算说明本文提出的腔形设计方案对不均匀增益的均匀补偿效果。图 5(b), (c) 是采用快速傅里叶变换的方法计算比较了 UR90 腔在对增益介质平均化方面的优势。就光强分布而言, 图 5(c) 中的 UR90 腔输出光场光强分布明显优于图 5(b) 中不均匀增益积累的情况。

7 结 论

提出了 UR90 片状陶瓷激光器的腔形设计。该设计采用两个薄片状增益介质垂直放置形成屋脊镜, 与另一屋脊镜共同构成光束旋转系统, 该设计简化了结构, 便于调节, 减少腔内光学元件, 可有效地减小激光器尺寸, 而且可以通过调节片状增益介质的位置得到大的正向模模体积, 起到反向模抑制的效果。采用快速傅里叶变换方法对其空腔模式进行了计算, 得到近场远场的光场分布、远场发散角、输出耦合率等特征参数。计算了抽运不均匀情况下, UR90 腔较之常规腔得到更好的光束质量。采用增益介质中抽运光场分布模型代表了 2 个激光二极管线阵侧面抽运薄片状增益介质的特点, 计算结果显示, 束转动 90° 环形非稳谐振腔能够克服固体增益介质抽运不均匀性带来的负面影响, 可以改善固体激光器中抽运不均匀对输出激光性能的影响, 使输

出光束质量保持在较高的水平,具有好的稳定性。

参 考 文 献

- 1 S. I. Zavgorodneva, V. I. Kuprenyuk, V. E. Sherstobitov. Unstable resonator with field rotation [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1977, **7**(6): 787~788
- 2 Yu. A. Anan'ev, V. I. Ku Prenyuk, V. E. Sherstobitov. Properties of unstable resonator with field rotation I. Theoretical principles [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1979, **9**(9): 1105~1110
- 3 V. N. Kuprenyuk, V. E. Semenov, L. D. Smirnova *et al.*. Wave approximation calculation of an unstable resonator with field rotation [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1983, **13**(12): 1613~1617
- 4 Wei Zaifu, Wang Runwen, Wang Zhijiang. Geometric property analysis of unstable ring resonators with 90° beam rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 513~519
魏在福,王润文,王之江. 90°束旋转环形非稳腔几何特性分析 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 513~519
- 5 Wei Zaifu, Wang Runwen, Wang Zhijiang. Numerical simulations of field distortion of unstable ring resonators with 90° beam rotation [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(12): 882~890
魏在福,王润文,王之江. 90°束转动环形非稳腔场畸变数值模拟 [J]. *中国激光*, 1995, **A22**(12): 882~890
- 6 Gao Huide, Dong Yunhua, Li Qi *et al.*, Numerical analysis of output mode of UR90 unstable ring resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1705~1707
高惠德,董蕴华,李琦等. UR90 环形非稳腔输出模式特性的数值分析 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(12): 1705~1707
- 7 Wei Qing, Wei Zaifu, Wang Runwen. Mode calculation in annular output ring unstable resonators with 90° beam rotation [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(9): 852~858
魏青,魏在福,王润文. 环状耦合输出的 90°束转非稳腔的模式计算 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(9): 852~858
- 8 Wei Qing, Wu Tieqiang, Wei Zaifu *et al.*. Experimental research of UR90 resonator with combined coherent output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(7): 593~596
魏青,吴铁强,魏在福等. UR90 腔相干并束输出的实验研究 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(7): 593~596
- 9 Alan H. Paxton, William P. Latham Jr.. Unstable resonators with 90° beam rotation [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17): 2939~2946
- 10 Scott Holswade, Rafael Riviere, Carl A. Huguley. Experimental evaluation of an unstable ring resonator with 90° beam rotation: HiQ experimental results [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4396~4406
- 11 Zhou Dazheng, Jin Yuqi, Zhao Tong. Experimental investigation on a 2 kW COL UR90 [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(2): 215~220
周大正,金玉奇,赵彤. 千瓦级 COL UR90 实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(2): 215~220
- 12 Jin Yuqi, Zhao Tong, Xu Wengang *et al.*. Investigation of UR90 with aperture output beam for a chemical oxygen iodine laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 513~516
金玉奇,赵彤,徐文刚等. 氧碘化学激光器束转动 90° 环形非稳腔空心束输出研究 [J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 513~516
- 13 Yuqi Jin, Fengting Sang, Bailing Yang *et al.*, Investigation of UR90 outputting annular beam for a chemical oxygen iodine laser [C]. *SPIE*, 2001, **4184**: 70~74
- 14 Li Junchang. Laser Diffraction and Thermal Acting Calculation [M]. Beijing: Science Press, 2002. 98~117
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算 [J]. 北京, 科学出版社, 2002. 98~117.
- 15 J. T. Hunt, J. A. Glaze, W. W. Simmons. Light propagation through large laser systems [J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**: 1741~1743