文章编号:1001-5078(2012)01-0026-05 ·激光器技术·

四镜8字环形腔激光器的设计与实验研究

杜晨林[1,2,3],廖桂浩[1],张 力[1,2,3],郭亚银[1,2,3],黄国溪[1,2,3],阮双琛[1,2,3]
(1. 深圳大学电子科学与技术学院,广东 深圳 518060;2. 深圳市激光工程重点实验室,广东 深圳 518060;
3. 先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室,广东 深圳 518060)

摘 要:采用ABCD传输矩阵计算方法结合Matlab软件进行模拟计算,设计热稳定性良好的四镜8字环形激光谐振腔。该环形谐振腔在高功率泵浦条件下,腔模参数随热透镜焦距变化具有良好的稳定性。在腔内插入由法拉第旋光器和半波片组成的光学单向器,实现了单向运转。在泵浦功率为40 W时,获得最高功率为14 W的连续波单向1064 nm波长激光输出,光光转换效率为35%。

关键词:环形谐振腔;热稳定性;热透镜效应;行波腔
中图分类号:TN24 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.01.006

Design and experimental research of laser with four-mirror ring resonator

DU Chen-lin[1,2,3], LIAO Gui-hao[1], ZHANG Li[1,2,3], GUO Ya-yin[1,2,3], HUANG Guo-xi[1,2,3], RUAN Shuang-chen[1,2,3]
(1. College of Electronic Science and Technology, Shenzhen 518060, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen 518060, China; 3. Key Laboratory of Advanced Optical Fine Manufacturing Technology of Guangdong Higher Education Institutes, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The optical ABCD matrix method and Matlab programs are used for the simulation of four-mirror ring laser resonator. A ring laser resonator with good stability has been designed. At high pump power, the ring resonator parameters can keep good stability with the change of thermal focal length. By inserting the Faraday rotator and half-wave plate into the cavity, the laser is kept in single-direction operation. The maximum output power at the wavelength of 1064 nm is measured to be 14 W with the corresponding optical efficiency of 35% and the pump power of 40 W.

Key words: ring resonator; thermal stability; thermal lens effect; travelling wave resonator

1 引 言

环形激光谐振腔是一种行波谐振腔,使用行波谐振腔的激光器具有噪声低和频率特性佳的优点,被广泛应用于高精度激光测量、精度光谱学、频率计量及相干信息处理等领域。采用环形谐振腔是获得高功率行波激光器的一个有效方法。环形激光行波谐振腔可有效抑制谐振腔内的驻波效应和空间烧孔效应,实现单频激光输出[1-7]。环形行波激光谐振腔还可在压缩输出谱宽的同时,维持输出功率[8]。在双向的环形激光器中,存在两列独立的正反向行波模,这是行波激光器区别于驻波激光器的根本特性[9];在单向运转时功率输出更高。在高功率激光器中,设计光学谐振腔的一个重要因素是端面泵浦激光晶体的温度分布引起的热透镜效应,因为谐振腔内存在热透镜后,相当于改变了原来谐振腔的参数。它对激光谐振腔内的模半径影响较大,从而影响整个激光器的输出功率和光束质量。泵浦功率越

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10804074);深圳市科技计划项目重点实验室提升发展计划项目;先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室开放基金项目(No. GZZ201002)资助。
作者简介:杜晨林(1976-),男,教授,研究方向为高功率固体激光器。E-mail:cldu@szu.edu.cn
收稿日期:2011-05-20;**修订日期**:2011-07-01

高,热透镜效应越严重。

本文设计了一个热稳定性良好的环形谐振腔,并通过实验证明,当端面泵浦功率高达 40 W 时,激光器仍然能够稳定运转,获得 14 W 的 1064 nm 连续波激光输出,光光转换效率达 35%。

2　环形激光谐振腔的计算方法

激光器光学谐振腔的稳定性通常可通过计算分析 ABCD 传输矩阵获得。从几何光学来看,变换矩阵一般为 4×4 的矩阵,但由于激光的发散角都很小,所以分析光学谐振腔时可看成是近轴对称光学系统。对于近轴对称光学系统,只需要用 2×2 的矩阵式(1)来描述近轴系统的光学变换:

$$M=\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \tag{1}$$

本文设计的四镜 8 字环形谐振腔结构图如图 1 所示。在不考虑像散的情况下,环形谐振腔可等效为一个多元件的直腔,进而可展开成一个周期性的薄透镜序列(激光工作物质等效成焦距为 f 的透镜)[10],如图 2 所示(以激光工作物质为参考面)。

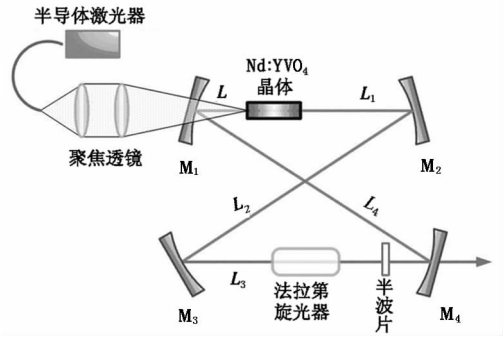

图 1　四镜 8 字环形激光谐振腔结构示意图

Fig. 1　the schematic diagram of four-mirror ring laser resonator

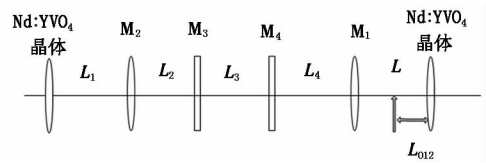

图 2　环形激光谐振腔等效透镜序列示意图

Fig. 2　the equivalent lens sequence diagram of ring resonator

设以激光工作物质为参考面展开的周期性透镜序列的环绕矩阵为:

$$M=\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{2}{R_1} & 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & L_4+L_3+L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{2}{R_2} & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

环形谐振腔的稳定性条件为:

$$\left|\frac{A+D}{2}\right|<1 \tag{3}$$

激光工作物质处的基模光斑大小(光斑半径):

$$\omega_i=\sqrt{\frac{\pm 2\lambda B/\pi}{\sqrt{4-(A+D)^2}}} \tag{4}$$

激光晶体和腔镜 M_1 之间的腰斑大小(束腰半径)为:

$$\omega_{012}=\sqrt{\pm\frac{\lambda}{2\pi C}\sqrt{4-(A+D)^2}} \tag{5}$$

以激光工作物质为参考面时腰斑的位置(图 1 中的 L_{012}):

$$L_{012}=\frac{A-D}{2C} \tag{6}$$

计算分臂 M_1 M_2 上距离束腰位置为 Z 处的光斑半径为:

$$\omega(z)=\omega_{012}\sqrt{1+\left(\frac{z}{Z_0}\right)^2} \tag{7}$$

其中,ω_{012}为分臂 M_1 M_2 上的束腰大小;Z_0 称为高斯光束的共焦参数,$Z_0=\dfrac{\pi\omega_{012}^2}{\lambda}$。由以上环绕矩阵及计算公式可算得分臂 M_1 M_2 之间光束的具体参数[11]。

当改变参考镜面时,只需改变环绕矩阵 M 的相乘顺序即可,其他参数计算公式是相似的[12]。

3　环形激光谐振腔的分析

激光器在实际工作中,激光工作物质会产生很大的热量,从而出现热透镜效应,影响谐振腔的性能。因此在设计谐振腔的过程中要考虑热透镜效应对谐振腔性能的影响,使设计出的谐振腔在热透镜效应的影响下仍然处于稳定状态[13]。

通过大量数值模拟,我们设计的热稳定性良好的谐振腔结构参数为:平凹镜 M_1 的曲率半径为 150 mm,平凹镜 M_2 的曲率半径为 250 mm,M_3 和 M_4 都是平面镜,$L+L_1=210$ mm(其中,激光工作物质中心到 M_1 的距离 $L=32$ mm,激光工作物质中心到 M_2 的距离 $L_1=178$ mm),$L_2=260$ mm,$L_3=290$ mm,$L_4=260$ mm。

环绕矩阵元$\left(\dfrac{A+D}{2}\right)$的值仅由谐振腔的参数决定,与计算参考面及环绕方向无关,因此我们以激光工作物质为参考面分析环形谐振腔的特性。从图 3 可见,在热透镜焦距为 100~1000 mm 之间变化时,谐振腔稳定性参数依然满足$\left|\dfrac{A+D}{2}\right|<1$,这说明该

环形谐振腔的稳定性好,即使热透镜焦距大幅度变化,谐振腔仍然处于稳定区域内。特别是在高功率泵浦情况下,环形谐振腔的稳定性依然良好。

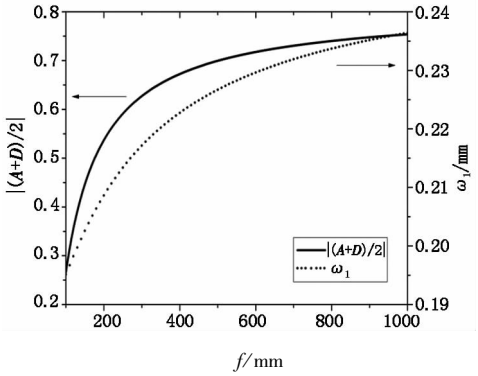

图3 谐振腔稳定性参数以及激光工作物质处光斑半径随热透镜焦距的变化曲线

Fig. 3 cavity stability parameter and beam size in laser material as a function of the thermal focal length

为了实现泵浦光与激光工作物质内基模光束的较好匹配,需使激光工作物质处光斑的大小与泵浦光大小相近。实验中,泵浦光经过耦合透镜聚焦后的光斑半径约为200 μm,因此激光工作物质处的光斑半径也需在200 μm附近,以便能够实现良好的模匹配。图3也给出了激光工作物质处光斑半径随热透镜的变化曲线图。从图3可见,随着热透镜焦距从100 mm增至1000 mm,激光工作物质处的光斑半径从195 μm增至235 μm,实现了良好的模匹配。

图4给出了谐振腔内激光晶体与M_2之间的束腰半径随热透镜焦距变化的曲线图。由图4可见,在热透镜焦距整个变化范围内,束腰半径仅仅在57~59 μm范围变化,说明束腰半径受热透镜效应的影响不大。

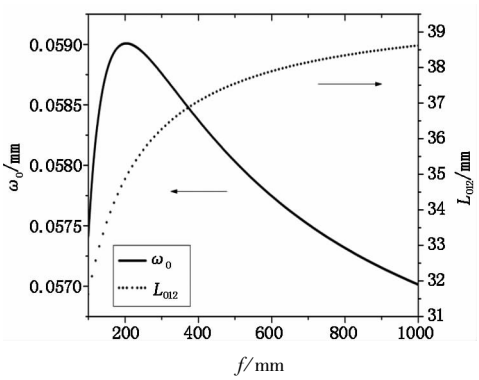

图4 激光晶体和M_2之间的束腰半径以及束腰位置随热透镜焦距的变化曲线

Fig. 4 the waist size and waist location between laser crystal and M_2 as a function of the thermal focal length

由于实验中一些具体光学元器件在谐振腔内的位置是固定的,我们希望腔内的光束分布,尤其是束腰位置,随热透镜焦距变化要尽量稳定,以减小对实验结果的影响。由于采用图2的环绕方向计算得出的束腰位置L_{012}为负值,所以激光工作物质与M_1之间的束腰是虚的,位于激光工作物质的右侧。因此我们采用逆向环绕矩阵计算激光工作物质与M_2之间束腰位置,如图4所示。计算结果为正值,表示该束腰是实的,位于激光工作物质与M_2之间,距离激光工作物质中心L_{012}。由图4可见,随着热透镜焦距的变化,束腰位置与激光晶体中心的距离L_{012}从38 mm减小至32 mm。变化幅度较小,说明腔内光束分布比较稳定。因此,在将来利用该环形谐振腔进行腔内倍频实验时,可以把倍频晶体放置在激光工作物质与M_2之间束腰位置处。

考虑到该环形谐振腔将会用于不同的实验,环形谐振腔内将插入不同的光学元器件。为此,我们计算出整个环形谐振腔内的光束大小分布,结果如图5所示。该光束分布图是在热透镜焦距f = 300 mm时算出的。当实验需要在环形谐振腔内插入倍频晶体或者Q开关等光学元器件时,根据腔内光束分布图,可较快地找到一个适合的放置位置。由于谐振腔中的M_3和M_4是平面反射镜,所以M_2M_3和M_3M_4以及M_4M_1之间的光束存在镜像关系。从图5中也可看出,在距离腔镜M_1为210 mm之后的光束大小是一个连续的高斯光束分布。

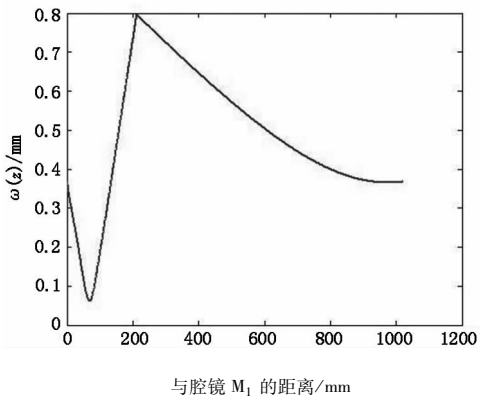

图5 环形谐振腔腔内光束大小分布图

Fig. 5 beam size distribution in the ring resonator

图5的光束大小分布曲线图是从M_1开始,图中看到整个腔内的光束分布曲线中,在距离腔镜M_1为0 mm(M_1处)和210 mm(M_2处)处出现突变,这与腔镜M_1和M_2对高斯光束的变换有关。而在距离腔镜M_1为32 mm处(激光工作物质处)的变化并不明显,通过计算发现是因为激光工作物质对腔内高斯光束的变换影响不大,因此看不出突变情况。由于M_3和M_4都是平面反射镜,所以从与腔镜M_1

距离 210 mm(M_2 处)到 1020 mm(回到 M_1 之前)这一段的光束大小分布是连续的高斯光束分布。

4　激光实验

激光工作物质选用 Nd:YVO_4 晶体,尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,掺杂浓度为 0.3 at.%,晶体端面镀有对 808 nm 和 1064 nm 的增透膜。泵浦源采用 LIMO 公司的光纤耦合半导体激光器,中心波长为 808 nm。经透镜聚焦耦合后的泵浦光斑半径为 200 μm。泵浦光从 M_1 进入 Nd:YVO_4 晶体。由于泵浦光功率较高,为保护 Nd:YVO_4 晶体及减小热透镜效应的影响,Nd:YVO_4 晶体用铟箔包裹住 4 个侧面,放置在铜块中,并通入循环水以便实现冷却控温。谐振腔是 4 镜组成的 8 字环形腔,如图 1 所示。平凹镜 M_1 曲率半径为 150 mm,对 808 nm 高透,对 1064 nm 高反;平凹镜 M_2 曲率半径为 250 mm,对 1064 nm 高反;M_3 为平面镜,对 1064 nm 高反;M_4 为平面输出镜,对 1064 nm 部分透过。$L + L_1 = 210$ mm(其中,Nd:YVO_4 晶体中心到 M_1 的距离 $L = 32$ mm, Nd:YVO_4 晶体中心到 M_2 的距离 $L_1 = 178$ mm),$L_2 = 260$ mm,$L_3 = 290$ mm,$L_4 = 260$ mm;环形谐振腔的总腔长约为 1020 mm。

环形谐振腔内插入了由光隔离器和半波片组成的单向器,使得激光器实现了单向运转。在 M_4 为不同透过率的条件下测得的输出功率如图 6 所示。从图 6 可见,在输出镜对 1064 nm 透过率分别为 20% 和 30% 的时候,获得较高的输出功率。在泵浦功率为 40 W 的情况下测得最高输出功率为 14 W,光光转换效率为 35%。此时,激光器的输出功率仍然没有表现出饱和的变化趋势,表明该谐振腔的热稳定性是非常良好的。为了预防激光晶体在更高泵浦功率下被打坏,我们没有继续增大泵浦功率。在泵浦功率为 20 W 的情况下获得的最高光光转换效率高达 40%,相应的输出功率为 8 W。

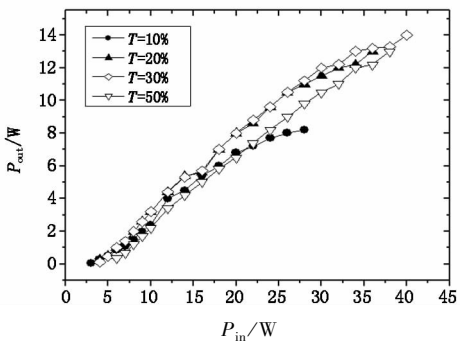

图 6　不同输出镜透过率下 1064 nm 激光的输出功率

Fig. 6　the output power of 1064 nm as a function of pump power with different output transmissions

5　结　语

本文利用 ABCD 传输矩阵法和 Matlab 软件进行数值模拟计算,设计出一个热稳定性良好的 8 字环形激光谐振腔。经过实验验证,该环形谐振腔在高泵浦功率条件下仍然能够保持良好的热稳定性。在泵浦功率为 40 W 的情况下,获得最高输出功率为 14 W 的 1064 nm 连续波激光输出,光光转换效率达 35%。该四镜 8 字环形谐振腔能够应用于高功率的频率变换激光器中,获得高光束质量可见光激光。

参考文献:

[1]　Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. Experimental study of a ring cavity configuration single-frequency Nd:YVO_4 laser[J]. Optical Technique, 2010, 36(1): 7-9. (in Chinese)
陈三斌,周寿桓,赵 鸿,等. 单频环形腔 Nd:YVO_4 激光器实验研究[J]. 光学技术,2010,36(1):7-9.

[2]　Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. Hingh power single-frequency Nd:YVO_4 laser dual-end-pumped by diode laser [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 87(92): 87-91. (in Chinese)
赵晶云,张宽收. LD 双端端面泵浦的高功率连续单频 Nd:YVO_4 激光器[J]. 量子光学学报,2004,87(92):87-91.

[3]　Benjamin A Thompson, Ara Minassian, Michael J Damzen. Unidirectional single-frequency operation of a Nd:YVO_4 ring laser with and without a faraday element [J]. Applied Optics, 2004, 43(15): 3174-3177.

[4]　Zhang Jing, Chang Hong, Jia Xiaojun, et al. Suppression of the intensity noise of a laser-diode-pumped single-frequency ring Nd:YVO_4-KTP green laser by optoelectronic feedback[J]. Optics Letters, 2001, 26(10): 695-697.

[5]　Hao Erjuan, Tan Huiming, Li Te, et al. Study of LD end pumped *Q*-switched single frequency laser[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 41-43. (in Chinese)
郝二娟,檀慧明,李特,等. LD 端面泵浦单频调 *Q* 激光器的研制[J]. 激光与红外,2007,37(1):41-43.

[6]　Hao Erjuan, Li Te, Tan Huiming, et al. Single-frequency laser at 473 nm by twisted-mode technique [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 924-927. (in Chinese)
郝二娟,李特,檀慧明,等. 单频蓝光激光器的实现[J]. 激光与红外,2009,39(9):924-927.

[7]　Lin Haifeng, Chen Jianlin. Nd:$GdVO_4$ single frequency green micro-chip laser by new type loyt filter [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 38-40. (in Chinese)
林海峰,陈建林. 基于新型 Loyt 滤波器选频的 Nd:$GdVO_4$ 单频绿光微片激光器[J]. 激光与红外,2010,

40(1):38 – 40.

[8] Zhang Guifen. A Nd^{3+}:YAG ring laser [J]. Laser, 1982, 9(12):757 – 760. (in Chinese)
张贵芬. 环形腔 Nd^{3+}:YAG 激光器[J]. 激光, 1982, 9(12):757 – 760.

[9] Wan Shunping. Research on diode-pumped single-frequency bidirectional LD solid-state ring laser[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
万顺平. LD 泵浦单频双向连续波固体环形激光器的研究[D]. 北京:清华大学, 2004.

[10] Lu Baida. Laser optics-laser beam transmission, transformation and beam quality control [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992:284 – 291. (in Chinese)
吕百达. 激光光学 – 激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 成都:四川大学出版社, 1992:284 – 291.

[11] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Laser principle [M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:70 – 71. (in Chinese)
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 5 版. 北京:国防工业出版社, 2008:70 – 71.

[12] Lu Baida, Qin Yali. Beam propagation characteristics in ring resonators[J]. China Laser, 1985, 13(10): 623 – 627. (in Chinese)
吕百达, 覃亚丽. 环形腔内光束的传输特性[J]. 中国激光, 1985, 13(10):623 – 627.

[13] Lin Bizhou. Beam characteristics of the four-mirror ring resonator with an internal thermal thin lens [J]. Laser Technique, 1993, 17(2):120 – 124. (in Chinese)
林碧洲. 内含热薄透镜四镜环形腔的光束特性[J]. 激光技术, 1993, 17(2):120 – 124.