腔镜曲率半径对高功率单频激光器工作状态的影响

尹祺巍　卢华东

山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室，极端光学协同创新中心，山西 太原 030006

摘要　研究了高功率单频激光器中增益晶体所在分臂腔镜的曲率半径对激光器工作状态的影响。当增益晶体所在分臂腔镜的曲率半径增大时，如果腔长不变，则激光器最佳工作点对应的抽运功率和最大输出功率均降低；而适当调整腔长，又可以恢复激光器最佳工作点对应的抽运功率和最大输出功率。在自制的高功率单频激光器上进行验证，实验结果和理论预期比较吻合。

关键词　激光器；环形腔；输出功率；曲率半径；单频

中图分类号　TN248.1　　**文献标识码**　A

doi: 10.3788/LOP53.071401

Influence of Curvature Radius of Cavity Mirrors on Performance of High-Power Single-Frequency Laser

Yin Qiwei　Lu Huadong

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, *China*

Abstract　The influence of curvature radius of the cavity mirrors on the performance of high power single frequency laser is investigated. When the cavity length is kept constant, both the pump power at the optimal operation point and the maximum output power decrease with the increase of curvature radius of the cavity mirrors beside the gain medium. However, if the cavity length is shorten to a certain extent, the pump power at the optimal operation point and the maximun output power can be recovered. The experimental results are consistent with the theoretical expectation.

Key words　lasers; ring cavity; output power; curvature radius; single frequency

OCIS codes　140.3560; 140.3410; 140.3570; 140.3580

1 引　　言

全固态高功率单频激光器因具有较好的光束质量，较低的强度噪声而广泛应用于超精细光谱学、相干通信、激光雷达、引力波探测、光参量振荡以及量子光学实验等领域。在端面抽运的固体激光器中，高功率抽运光的照射会导致增益介质产生严重的热效应[1]，限制激光功率的进一步提升，并使激光光束质量变差。目前人们已经提出多种方法来缓解或消除增益晶体的热效应，如降低增益晶体的掺杂浓度[2]、采用复合晶体[3-4]、双端抽运[4-5]和直接抽运[6-7]等。本课题组利用888 nm的抽运光直接抽运Nd^{3+}掺杂原子数分数为0.8%的Nd…YVO_4复合晶体，已经获得最大输出功率为25.4 W的单频绿光激光器[8]。高功率单频激光器一般采用包含有单向器的环形谐振腔，通过消除空间烧孔效应实现激光器的单频运转[9-10]。本课题组也已经研究了单向器中铽镓石榴石(TGG)晶体的热透镜效应对激光器工作状态的影响，并提出了激光器最佳工作

收稿日期：2016-02-17；**收到修改稿日期**：2016-03-18；**网络出版日期**：2016-06-22

基金项目：国家自然科学基金(61405107，61227015，61227902)、山西省自然科学基金(2014021011-3)

作者简介：尹祺巍(1985—)，男，博士研究生，主要从事全固态高功率激光器器件方面的研究。

E-mail: yinqiweiouc@126.com

导师简介：卢华东(1981—)，男，博士，副教授，主要从事量子光学及光量子器件方面的研究。

E-mail: luhuadong@sxu.edu.cn(**通信联系人**)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

点(OOP)的概念[11]。在最佳工作点处,激光器不但对应着较高的抽运功率,而且子午面和弧矢面内的基模束腰半径在增益晶体处相等,有利于抽运光斑和基模光斑的模式匹配,最终有助于激光器获得高功率输出。McDonagh L等[6]和Lenhardt F等[12]指出:在高功率激光器中,采用凸面腔镜可以补偿增益晶体的热透镜效应。这一结论有一定局限性,因为即使采用平面腔镜,只要适当调整腔长也能获得和凸面腔镜类似的补偿效果,本文将对这一问题进行讨论。

本文分析了高功率内腔倍频单频激光器中,增益晶体所在分臂的腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径 R_{12} 对激光器工作状态的影响,并在自制的高功率单频激光器上进行验证。另外,计算了不同腔镜曲率半径下激光器的最佳腔长,这对高功率单频激光器的设计有一定的指导意义。

2 理论计算

激光器采用由4个腔镜(M_1, M_2, M_3, M_4)组成的单向运转的8字型环形谐振腔,在计算中考虑增益晶体和单向器中TGG晶体的热透镜效应[11]。以增益晶体为参考点,将该环形腔展开成周期性薄透镜序列,如图1所示,其中增益晶体 Nd…YVO_4 和单向器中的TGG晶体均等效为薄透镜,M_1 和 M_2 为凸面反射镜,其曲率半径均为 R_{12}(取负值),M_3 和 M_4 为凹面反射镜,其曲率半径均为 R_{34}(取正值)。

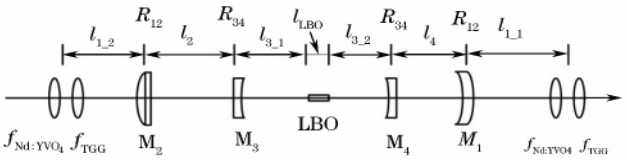


图1 环形腔的等效薄透镜序列

Fig. 1 Equivalent thin lens sequence of ring cavity

激光器的环绕矩阵表示为

$$\boldsymbol{M}=\begin{pmatrix}A & B\\ C & D\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & l_{1_1}\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ -\frac{2}{R_{12}} & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & l_4\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ -\frac{2}{R_{34}} & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & l_{3_2}\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & \frac{l_{LBO}}{n_{LBO}}\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & l_{3_1}\\ 0 & 1\end{pmatrix}\cdot$$
$$\begin{pmatrix}1 & 0\\ -\frac{2}{R_{34}} & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & l_2\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ -\frac{2}{R_{12}} & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & l_{1_2}\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{f_{TGG}} & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{f_{Nd\cdots YVO_4}} & 1\end{pmatrix},\quad(1)$$

式中 l_{LBO} 和 n_{LBO} 为LBO倍频晶体的长度和折射率,$f_{Nd\cdots YVO4}$ 和 f_{TGG} 为增益晶体 Nd…YVO_4 和单向器中TGG晶体的热透镜焦距,l_i(i=1_1, 1_2, 2, 3_1, 3_2, 4)为相邻元件之间的距离。

根据上述 *ABCD* 矩阵计算了激光器的稳区和基模束腰半径随 R_{12} 的变化情况。当 R_{12} 为1500 mm时,如果 L_{34} 为97 mm,则激光器处于比较理想的工作状态,其稳区较宽,为24~78 W,最佳工作点对应的抽运功率达52 W,如图2(a)所示。此时,在较宽的抽运功率范围内,子午面和弧矢面内的基模束腰半径基本重合,也即像散补偿的效果较好,有利于激光器的稳定运转。如果保持腔长不变,并将 M_1 和 M_2 更换为曲率半径为3000 mm的凸面镜,则激光器的稳区变为20~74 W,最佳工作点对应的抽运功率下降至44 W,如图2(b)所示。如果将 M_1 和 M_2 更换为平面镜($R_{12}=+\infty$),则激光器的稳区变为16~72 W,最佳工作点对应的抽运功率进一步降低至38 W,如图2(c)所示。可见,当腔长保持不变时,随着腔镜曲率半径的增大,激光器的阈值降低,最佳工作点对应的抽运功率也显著降低,子午面和弧矢面内稳区的重叠部分也在变窄,像散补偿的效果变差,一方面限制激光器的输出功率,另一方面也不利于激光器的稳定运转。

改变 M_1 和 M_2 的曲率半径后,通过适当调整倍频晶体所在分臂的长度 L_{34},能够操控激光器的最佳工作点对应的抽运功率进而提升输出功率。当 M_1 和 M_2 的曲率半径由1500 mm更换为3000 mm后,将 L_{34} 从97 mm缩短至92 mm,则激光器的稳区变为26~76 W,最佳工作点对应的抽运功率提升至52 W,如图3(b)所示。而将 M_1 和 M_2 更换为平面镜后,如果将 L_{34} 进一步缩短至90 mm,则激光器最佳工作点对应的抽运功率也

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可提升至50 W，如图3(c)所示。可见，当腔镜M_1和M_2的曲率半径增大时，如果将腔长缩短到一定程度，激光器也能恢复至比较理想的工作状态。

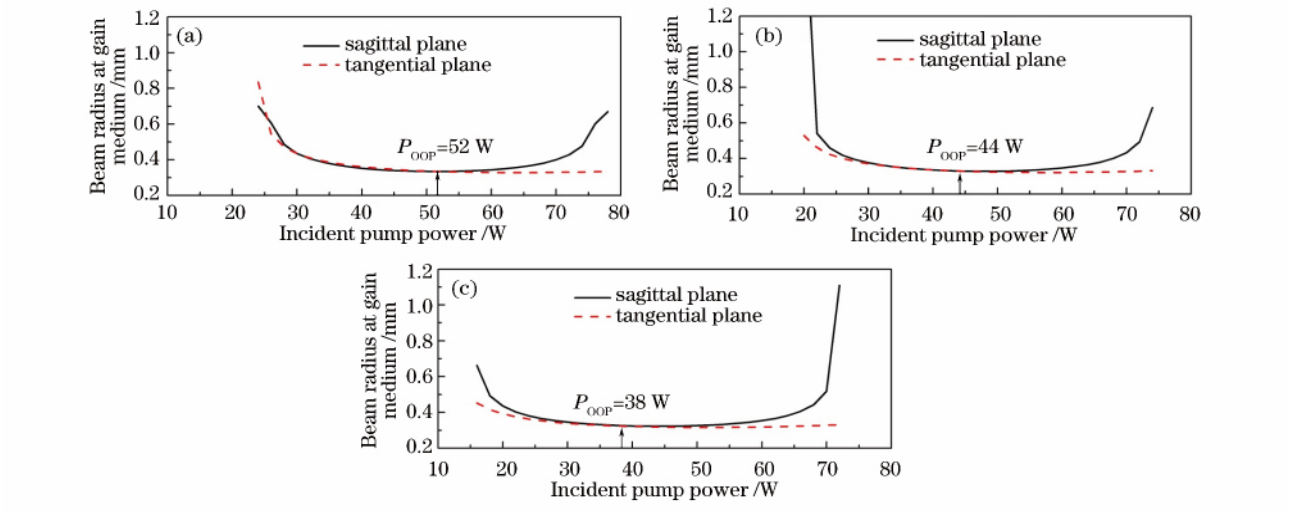


图2　腔镜曲率半径变化但腔长固定时，增益晶体处的基模束腰半径与抽运功率的关系。

(a) $R_{12}=1500$ mm, $L_{34}=97$ mm; (b) $R_{12}=3000$ mm, $L_{34}=97$ mm; (c) $R_{12}=+\infty$, $L_{34}=97$ mm

Fig. 2　Beam radius at gain medium as a function of pump power with constant cavity length and variable R_{12}.

(a) $R_{12}=1500$ mm, $L_{34}=97$ mm; (b) $R_{12}=3000$ mm, $L_{34}=97$ mm; (c) $R_{12}=+\infty$, $L_{34}=97$ mm

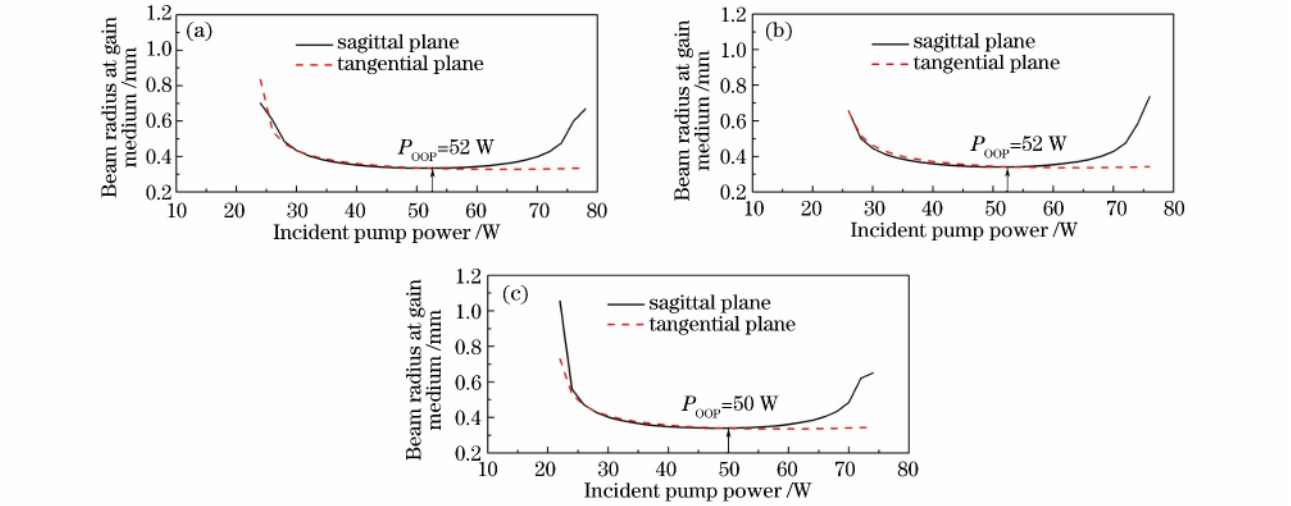


图3　腔镜曲率半径和腔长均变化时，增益晶体处的基模束腰半径与抽运功率的关系。

(a) $R_{12}=1500$ mm, $L_{34}=97$ mm; (b) $R_{12}=3000$ mm, $L_{34}=92$ mm; (c) $R_{12}=+\infty$, $L_{34}=90$ mm

Fig. 3　Beam radius at gain medium as a function of pump power with variable cavity length and R_{12}.

(a) $R_{12}=1500$ mm, $L_{34}=97$ mm; (b) $R_{12}=3000$ mm, $L_{34}=92$ mm; (c) $R_{12}=+\infty$, $L_{34}=90$ mm

3　实验装置

实验装置如图4所示，抽运源为光纤耦合输出的激光二极管，中心波长为808 nm，最大输出功率为60 W，光纤芯径为400 μm，数值孔径为0.22 mm。抽运光通过两个焦距分别为30 mm和80 mm的平凸透镜组成的望远镜系统聚焦到增益晶体的中心。增益晶体为a轴切割的$YVO_4/Nd\cdots YVO_4$复合晶体，尺寸为3 mm×3 mm×(5+15) mm，前端5 mm为非掺杂的YVO_4基质，后段15 mm Nd^{3+}掺杂原子数分数为0.2%。采用复合晶体是为了缓解增益晶体的端面热效应[3-4]。增益晶体的后端面切割成1.5°的楔角以充当偏振分束器，可以使o光和e光分得更开，从而使发射截面较大的e光(π偏振)优先于o光(σ偏振)在腔内起振，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

最终提高激光器偏振度和偏振方向的稳定性[13]。增益晶体的 c 轴水平放置，可使增益晶体的热像散和腔镜离轴放置引入的像散相互补偿[8]。增益晶体由铟薄包裹并安装在紫铜控温炉内，通过半导体制冷器(TEC)进行精密温度控制，控温精度为 ±0.0045 ℃[14]，TEC 的热沉由通有冷却循环水的紫铜块充当。激光器谐振腔为四镜 8 字形环形腔，腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径均为 R_{12}，M_3 和 M_4 均为曲率半径为 100 mm 的平凹镜。为保证激光器的单向运转，腔内插入由永磁体包裹的 TGG 晶体和半波片组成的单向器。倍频晶体为 3 mm×3 mm×18 mm的 LBO，前后端面镀膜均在 532 nm 和 1064 nm 增透，被放置于腔镜 M_3 和 M_4 之间的基模束腰半径处以保证较高的倍频效率。倍频方式为 I 类非临界相位匹配，相位匹配温度为 149 ℃。LBO 安装在紫铜控温炉内，控温精度为 ±0.005 ℃[14]。

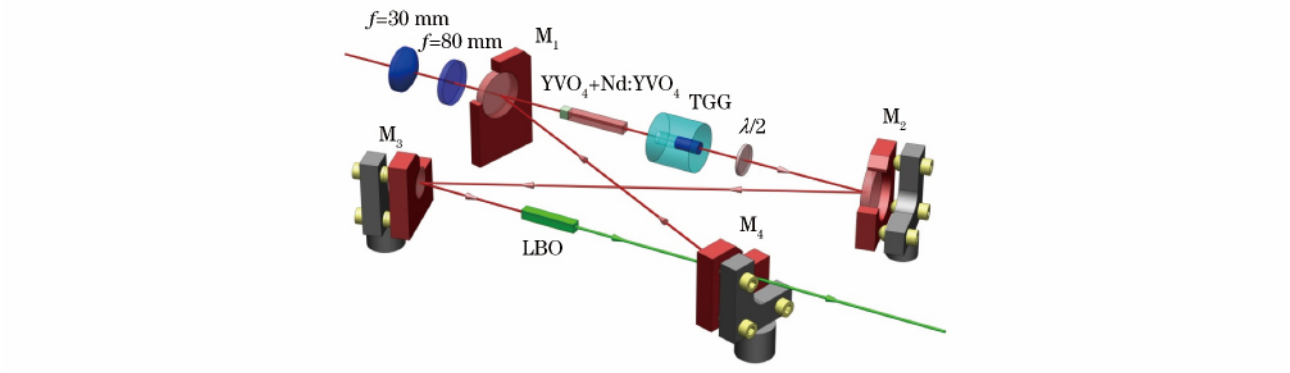


图 4　激光器结构图

Fig. 4　Schematic diagram of the laser

4　实验结果和分析

在实验中，首先保持谐振腔的腔长为 97 mm，然后更换不同曲率半径的腔镜 M_1 和 M_2，实验结果如表 1 所示。可以发现，当腔长保持不变时，随着 R_{12} 的增大，激光器的阈值抽运功率和最佳工作点对应的抽运功率都会明显降低，最大输出功率也在降低，实验结果和理论预期比较一致。

表 1　腔长固定，R_{12} 变化时的实验结果

Table 1　Experimental results with a constant cavity length and variable R_{12}

R_{12} /mm	P_{th} /W	P_{OOP} /W	P_{out} /W
1500	27.2	51.5	13
3000	21.7	37.5	9.6
+∞	17.1	30.4	7.8

将腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径改变为 3000 mm 和 +∞ 后，如果分别将 L_{34} 缩短至 92 mm 和 90 mm，则激光器最佳工作点对应的抽运功率可分别从 37.5 W 和 30.4 W 提升至 50.8 W 和 48.7 W，最大输出功率 P_{out} 可从 9.6 W 和 7.8 W 提升至 12.97 W，如图 5 所示。可见当腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径增大时，只要适当缩短腔长就可以提升激光器最佳工作点对应的抽运功率进而提升输出功率，实验结果和理论预期比较吻合。图 5 中，激光器的输出功率在某一抽运功率处出现突变是由 TGG 晶体吸收腔内基频光产生的热透镜效应导致，已经在之前的研究中对这一现象进行过定性分析[11]。

下面对实验结果进行分析。从前面的理论计算可知，当腔长固定时，随着 R_{12} 的增大，增益晶体处的基模束腰半径基本不变，见图 2，则抽运光斑和基模光斑之间的交叠程度基本不变，因此模式匹配不是导致输出功率明显降低的原因。最佳工作点参数会受倍频效率的影响，而在其他参数一定的情况下，倍频效率主要取决于增益晶体处的基模束腰半径 ω_1 和倍频晶体处的基模束腰半径 ω_2 的比值[15]。根据计算，当腔镜曲率半径变化时，比值 ω_1/ω_2 基本不变，因此倍频晶体处束腰变化对最佳工作点参数基本没有影响。影响激光器的最佳工作点对应的抽运功率和最大输出功率的决定性因素在于增益晶体和谐振腔之间的像散补偿程度。增益晶体 Nd…YVO_4 具有折射率各向异性的特征，在高功率抽运光的照射下，其子午面和弧矢面内的热透镜焦距并不相等，因此增益晶体存在热像散[16]。而谐振腔中离轴放置的腔镜也会引入像散，并且受腔长、入

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

射角度、腔镜曲率半径等因素的影响。当抽运功率一定时，增益晶体的热透镜焦距和热透镜像散也是固定的。在腔长保持不变的情况下，R_{12}的变化会导致谐振腔像散的变化，进而影响增益晶体和谐振腔之间的像散补偿。只有当增益晶体的热像散和谐振腔像散在较宽的抽运功率范围内可以相互补偿时，激光器才能稳定运转；只有当激光器的最佳工作点对应的抽运功率较高时，激光器才可能获得较高的输出功率。因此，腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径变化时，激光器实现稳定的高功率输出所需的最佳腔长也在变化。由此可见，文献[6]和文献[12]关于高功率固体激光器中应当包含有凸面腔镜以补偿增益晶体热透镜效应的说法并不完备，因为即使采用平面腔镜，只要适当调整腔长也能实现对增益晶体的热透镜效应的补偿，获得和采用凸面腔镜时性能相近的稳定运转的高功率单频激光器。计算得到了腔镜 M_1 和 M_2 取不同的曲率半径时，激光器的最佳腔长，如图6所示，这对采用环形腔的高功率单频激光器的设计具有一定的指导意义。

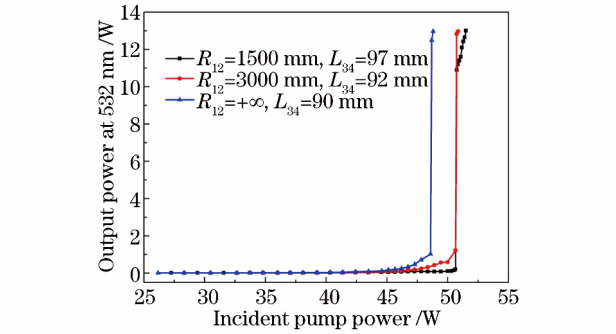


图5　不同腔长和曲率半径下的激光器输出功率特征曲线

Fig. 5　Output power versus incident pump power with different R_{12} and cavity lengths

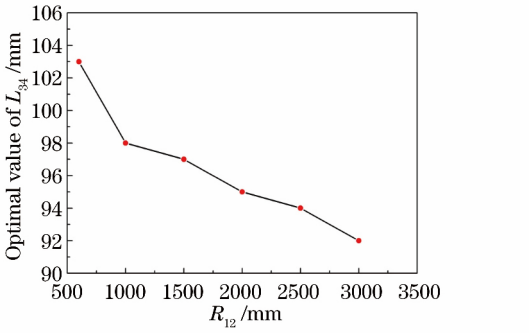


图6　不同曲率半径下的最佳腔长 L_{34}

Fig. 6　Optimal value of L_{34} as a function of R_{12}

当腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径为1500 mm时，已经在文献[6]和文献[11]中证明激光器可以稳定地单频运转，且输出光束接近衍射极限。为进一步证明结论的有效性，在腔镜 M_1 和 M_2 为平面镜时进行调试，激光器的最大输出功率为12.97 W，5 h功率稳定性优于±0.5%，如图7所示。利用一精细度为200的法布里-帕罗(F-P)干涉仪监测激光器的纵模结构，激光器可以稳定地单频运转，见图8；利用光束质量分析仪(Thorlabs M2SET-VIS)测量了输出激光的光束质量，在 X 方向和 Y 方向的衍射倍率因子均小于1.1，见图9。

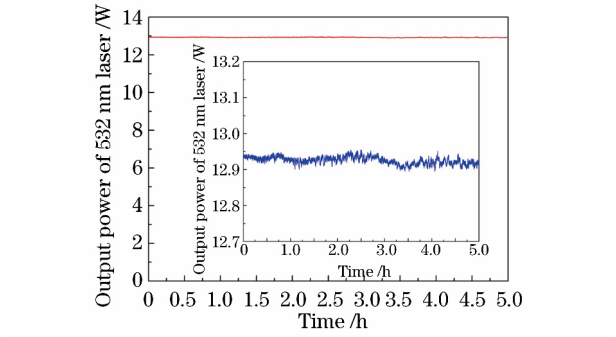


图7　532 nm激光的长期功率稳定性

Fig. 7　Long term power stability of 532 nm laser

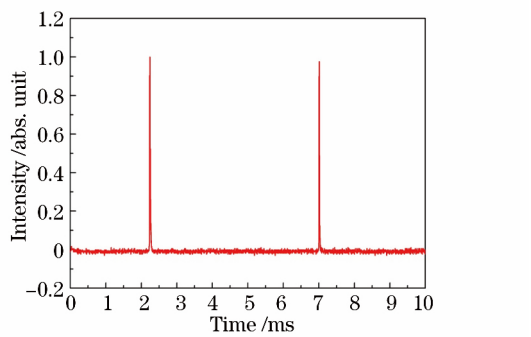


图8　F-P干涉仪扫描获得的激光器单频特性

Fig. 8　Longitudinal mode of laser scanned by a F-P interferometer

5　结　　论

首先在理论上计算了采用环形腔的高功率单频激光器中增益晶体所在分臂的腔镜的曲率半径 R_{12} 对激光器的稳区、增益晶体处的基模尺寸以及最佳工作点对应的抽运功率的影响。当腔长固定时，随着 R_{12} 的增大，激光器的阈值抽运功率和最佳工作点对应的抽运功率明显降低，而通过适当调整腔长，又可提升激光器的阈值抽运功率和最佳工作点对应的抽运功率。然后在自制的高功率单频激光器上进行验证，实验结果和

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

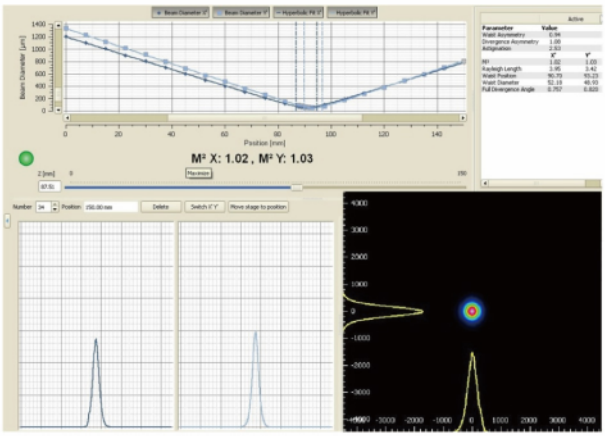


图 9 光束质量测量结果

Fig. 9 Beam quality measurement result

理论预期比较吻合。另外,计算了不同腔镜曲率半径下的激光器的最佳腔长,可为采用环形腔的高功率单频激光器的设计提供一定的理论指导。当腔镜的曲率半径选定时,应当适当调整腔长;而当腔长固定或者其调节范围受限时,应当选择曲率半径合适的腔镜,以保证在较宽的抽运功率范围内实现增益晶体和谐振腔之间的像散补偿,同时提升激光器最佳工作点对应的抽运功率,从而获得稳定的高功率输出。最后,在腔镜 M_1 和 M_2 为平面镜时进行调试,激光器的最大输出功率为 12.97 W,5 h 功率稳定性优于 ±0.5%,激光器能够稳定地单频运转,在 X 方向和 Y 方向的光束质量因子均小于 1.1。

参 考 文 献

1 Koechner W. Thermal lensing in a Nd…YAG laser rod [J]. Appl Opt, 1970, 9(11): 2548-2553.

2 Cheng E, Dudley D R, Nighan W L, *et al.*. Lasers with low doped gain medium: US, 6185235 [P]. 2001-2-6.

3 Wang Yaoting, Zhang Ruihong, Li Wujun. High power all-solid-state continuous-wave Nd…$GdVO_4$ laser of single-frequency operation at 1342 nm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111402.
王垚廷, 张瑞红, 李武军. 高功率全固态连续单频 1342 nm Nd…$GdVO_4$ 激光器的设计及实现 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111402.

4 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. Investigation on LD double-end-pumped high power Q-switched YVO_4-Nd…YVO_4-YVO_4 fundamental mode solid state laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2409-2414.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. LD 双端抽运 YVO_4-Nd…YVO_4-YVO_4 复合晶体的高功率调 Q 基模固体激光器研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2409-2414.

5 Zhao Jingyun, Zhang Kuangshou. High-power single-frequency Nd…YVO_4 laser dual-end-pumped by diode laser [J]. J Quantum Opt, 2004, 10(2): 87-92.
赵晶云, 张宽收. LD 双端端面抽运的高功率连续单频 Nd…YVO_4 激光器 [J]. 量子光学学报, 2004, 10(2): 87-92.

6 McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R, *et al.*. High-efficiency 60 W TEM_{00} Nd…YVO_4 oscillator pumped at 888 nm [J]. Opt Lett, 2006, 31(22): 3297-2399.

7 Yin Qiwei, Lu Huadong. Influence of wavelength of pump source on output power of 1064 nm laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091402.
尹祺巍, 卢华东. 抽运波长对连续单频 Nd…YVO_4 激光器输出特性的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091402.

8 Wang Y J, Zheng Y H, Shi Z, *et al.*. High-power single-frequency Nd…YVO_4 green laser by self-compensation of astigmatisms [J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(7): 506-510.

9 Martin K I, Clarkson W A, Hanna D C. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd…YAG ring laser [J]. Opt Lett, 1996, 21(12): 875-877.

10 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin, *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd…YVO_4/KTP laser of single-frequency operation [J]. Chinese J lasers, 2007, 34(6): 739-742.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

郑耀辉, 卢华东, 李凤琴, 等. 全固态高输出功率单频 Nd…YVO_4/KTP 激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 739-742.

11 Yin Q W, Lu H D, Peng K C. Investigation of the thermal lens effect of the TGG crystal in high-power frequency-doubled laser with single frequency operation[J]. Opt Express, 2015, 23(4): 4981-4990.

12 Lenhardt F, Nittmann M, Bauer T, *et al.*. High-power 888-nm-pumped Nd…YVO_4 1342-nm oscillator operating in the TEM_{00} mode[J]. Appl Phys B, 2009, 96(4): 803-807.

13 Zheng Y H, Li F Q, Wang Y J, *et al.*. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd…YVO_4 as a polarizing beam splitter[J]. Opt Commun, 2010, 283(2): 309-312.

14 Jin Xiaoli, Su Jing, Jin Pixian, *et al.*. Study on a high-precision digital temperature-control system for all-solid-state single-frequency green laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902010.
靳晓丽, 苏 静, 靳丕锫, 等. 全固态单频绿光激光器高精度数字温度控制系统的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902010.

15 Smith R. Theory of intracavity optical second-harmonic generation[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1968, 6(4): 215-223.

16 Cheng Y, Fanning C G, Siegman A E. Transverse-mode astigmatism in a diode-pumped unstable resonator Nd…YVO_4 laser[J]. Appl Opt, 1997, 36(6): 1130-1134.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net