

文章编号: 0258-7025(2010)06-1560-04

# 二极管抽运百瓦级红光固体激光器

王建军<sup>1,2</sup> 邹跃<sup>2</sup> 赵书云<sup>2</sup> 张弛<sup>2</sup> 苑利刚<sup>2</sup> 杨涛<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015; <sup>2</sup> 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

**摘要** 采用大功率二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体, 在含望远系统的双棒串接四镜折叠腔结构下, 利用双声光开关调 Q 及三硼酸锂(LBO)晶体腔内倍频的方式, 通过谐振腔和倍频晶体参数优化设计, 获得了重复频率为 10 kHz、波长为 659.5 nm, 平均功率大于 105 W 的高功率红光激光输出, 光-光转换效率达 6.6%。

**关键词** 激光器; 二极管抽运; 四镜折叠腔; 百瓦级; 红光

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1560

## Hector-Watt-Level Diode Pumped Solid-State Red Laser

Wang Jianjun<sup>1,2</sup> Zou Yue<sup>2</sup> Zhao Shuyun<sup>2</sup> Zhang Chi<sup>2</sup> Yuan Ligang<sup>2</sup> Yang Tao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China  
<sup>2</sup> No.11 Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract** A multiple diode-arrays side-pumped two-rod series connection four-mirror resonator in which has a telescope system has been demonstrated. Using two acousto-optic Q-switches and the intra-cavity frequency doubling of LBO crystal, up to 105 W output at 695.5 nm with the repetition rate of 10 kHz is obtained by resonant cavity and frequency doubling systal parameters optimal design; the optical-to-optical conversion is up to 6.6%.

**Key words** lasers; diode pumped; four-mirror folded cavity; hector-watt-level; red laser

## 1 引言

红光作为可见光波段的一个重要波段范围, 在激光显示、激光演示等领域具有广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>。作为激光显示所需的三基色之一, 全固态的红光激光器是研究的热点之一。目前研究大都集中在小功率范围, 大功率的红光激光器还少见报道。2005 年天津大学温午麒等<sup>[3]</sup>采用二极管连续抽运 Nd:YAG 晶体, 磷酸氧钛钾(KTP)腔内倍频的方法实现了 12 W 的红光输出; 2006 年中国科学院物理所彭海波等<sup>[4]</sup>采用二极管抽运 Nd:YAG 晶体, 三硼酸锂(LBO)倍频的方法, 在 Z 型腔上实现了 28 W 的红光输出; 2007 年中国电子科技集团公司第十一所杨涛等<sup>[5]</sup>报道了采用激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体, 双棒串接直通腔, KTP 晶体腔内倍频的方法实现了 83 W 的红光输出。

本文从含望远系统的双棒串接四镜折叠腔理论分析入手<sup>[6,7]</sup>, 通过理论模型的建立和计算机模拟分析, 优化谐振腔设计; 然后对倍频器的选择做较详

细的分析, 给出了具体参数, 介绍了实验装置, 并对实验结果进行分析和总结。

## 2 谐振腔理论分析

在柱对称稳定腔中, 高阶横模由缔合拉盖尔多项式与高斯分布函数的乘积来描述, 沿  $z$  方向传输的拉盖尔-高斯光束可表示为一般形式<sup>[7]</sup>

$$\phi_{nm} = \frac{C_{nm}}{\omega} \left( \sqrt{2} \frac{r}{\omega} \right)^m L_n^m \left( 2 \frac{r^2}{\omega^2} \right) \exp(r^2/\omega^2) \times \exp\{-i\{k[z + r^2/(2R)] - (m + 2n + 1)\arctan(z/f)\}\} \begin{cases} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{cases}, \quad (1)$$

设基模的束腰和远场发散角分别为  $\omega_0$  和  $\theta_0$ , 可以证明, 对于 TEM<sub>nm</sub> 阶横模, 束腰和远场发散角分别为

$$\omega_{nm} = \sqrt{m + 2n + 1} \cdot \omega_0, \quad (2)$$

$$\theta_{nm} = \sqrt{m + 2n + 1} \cdot \theta_0, \quad (3)$$

显然, 高阶模的增加, 是光束质量变差的主要原因。因此, 如何减少增益介质的热透镜效应和抑制谐振

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-23

作者简介: 王建军(1976—), 男, 高级工程师, 主要从事二极管固体激光器方面的研究。

E-mail: wjianjun76@yahoo.com.cn

腔内高阶模的振荡是获得大功率、高光束质量激光输出的关键。在腔内加入望远系统,对振荡光束进行扩束,是一种常见的解决办法<sup>[8~10]</sup>。

图 1 是双棒串接含望远系统的四镜折叠腔结构主体光路示意图。图中, M1, M4 为全反镜, 曲率分别为  $R_1, R_4$ 。M2, M3 为凹面镜, 曲率分别为  $R_2, R_3$ , 构成望远系统。M1 到 1<sup>#</sup> 聚光腔中心距离为  $L_1$ , 双棒中心间距离为  $L_2$ , 2<sup>#</sup> 聚光腔中心到 M2 距离为  $L_3$ , M2 到 M3 距离为  $L_4$ , M3 到 M4 距离为  $L_5$ 。

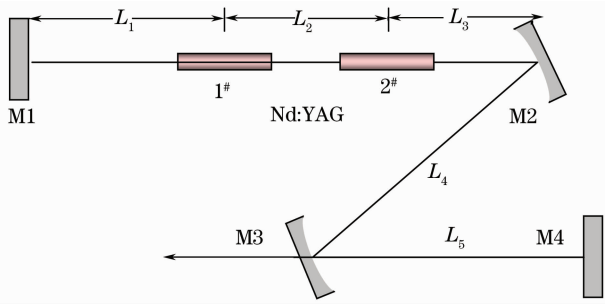


图 1 双棒串接四镜折叠腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-rod series connection four-mirror resonator

根据 ABCD 矩阵原理,对该激光腔内的光束参数(光斑大小,束腰位置,远场发散角等)进行计算。为了便于分析,对其做一些简化近似和假设:1)把图 1 中的折叠腔等效成含透镜的直通腔,折叠镜等效成焦距分别为  $f_1 = R_2/2, f_2 = R_3/2$  的透镜;2)把 Nd:YAG 棒看作热焦距  $f$  随抽运功率不断变化的薄透镜;3)假设相同抽运电流下,两根 Nd:YAG 棒的热焦距  $f$  始终一致;4)在较小的折叠角下,忽略由于引入折叠镜而产生的像散。以全反镜 M1 为参考面,则单向的传输矩阵为

$$\begin{aligned} T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_3 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

令  $G_1 = a - b/R_1, G_2 = d - b/R_4, G = G_1 \times G_2$ , 则谐振腔稳定条件为

$$0 < G < 1, \quad (5)$$

同时可以计算求得腔内基模振荡光束在 M1 处的光斑半径<sup>[11,12]</sup>为

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda b}{\pi} \sqrt{\frac{G_2}{G_1(1-G_1 \cdot G_2)}}, \quad (6)$$

由此可以计算出腔内任意位置的基模光斑半径,同

样也能确定束腰的位置和远场发散角。

通常情况下,激光器谐振腔内最小的孔径是激光增益介质的截面,因此,要抑制高阶模的振荡,就需要选择适当的腔参数,使增益介质棒上基模光斑尽可能的大。为了能更直接地分析谐振腔参数对实际输出的多模激光光束质量的影响,找到满足输出光束质量要求的谐振腔参数,在理论分析中做了进一步的假设:1)激光介质在腔内起限模光阑的作用,只要在棒中的光斑小于增益介质直径的模式均可以起振;2)忽略各振荡模式之间的相干作用,粗略认为输出光束发散角及光斑由各模式中的最大者决定。

设增益介质棒的直径为  $d$  时,腔内起振的最高阶模在棒内的最大光斑半径为  $\omega_{mm}$ , 则输出光束的光束质量乘积(BPP)为

$$\begin{aligned} f_{\text{BPP}} &= 2\omega_{mm} \cdot 2\theta_{mm} = 2(\sqrt{m+2n+1} \cdot \omega_0) \times \\ &2(\sqrt{m+2n+1} \cdot \theta_0) \approx 4\omega_0 \cdot \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \cdot \left(\frac{d}{2\omega_0}\right)^2 = \\ &\frac{4\lambda}{\pi} \cdot \left(\frac{d}{2\omega_0}\right)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

基于以上的理论分析,通过计算机对其进行了理论计算,寻找满足一定光束质量情况下的合适的腔参数组合。根据之前一些实验数据,对其中的一些参数进行设置:1)实验中,每个抽运腔运转在阈值之上时,增益介质热焦距范围为  $135 \text{ mm} < f < 350 \text{ mm}$ ;2)对于望远系统,设计中放大倍率选取为 2。由以上理论计算出的符合条件的组合很多,根据实际需要,对计算结果做进一步筛选:1)从谐振腔的稳定方面考虑,选取总腔长比较短的腔型,以节省空间并提高机械稳定性和腔的调整灵敏度;2)腔内最小光斑尺寸要适当,不要太小,以免损失光学元件;3)对于调 Q 运转来说,可以选择谐振腔中光束相对较宽,这样有利于声光 Q 开关的关断。

图 2 为选取既定条件下的基模振荡光束包络的

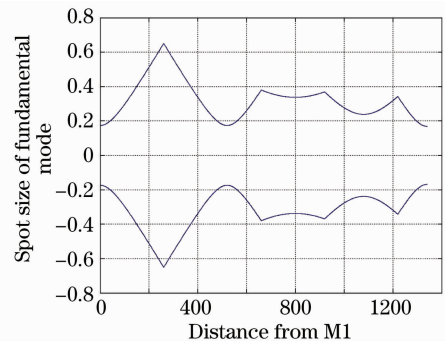


图 2 谐振腔内基模振荡光光束包络

Fig. 2 Spot size of fundamental mode in the cavity

一种典型模拟结果。图中给出了谐振腔内各个位置处的基模光斑大小。图 3 是当  $L_1=260$  mm,  $L_2=400$  mm,  $L_3=260$  mm,  $L_4=300$  mm,  $L_5=120$  mm,  $R_2=400$  mm,  $R_3=200$  mm, M1 和 M4 均为平面镜情况下,这种既定谐振腔下的  $G$  参数随热焦距变化(抽运功率变化)的参数曲线。图中给出了谐振腔的稳区范围,可为进行聚光腔的设计提供参考。

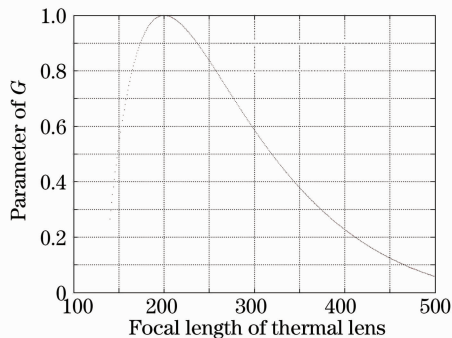


图 3 谐振腔的  $G$  参数随热焦距的变化曲线

Fig. 3 Parameter of  $G$  versus focal length of thermal lens

### 3 倍频器选择

由倍频理论可知,选择非线性晶体的依据是应具有较大的有效非线性系数,在宽光谱范围内有尽量高的透明度,在需要的波段容易实现相位匹配,具有强的抗光损伤能力且容易实现晶体的生长和加工。对于  $1\ \mu\text{m}$  左右激光的倍频,目前最佳晶体为 KTP 及 LBO。

KTP 晶体具有高的非线性系数、不潮解、折射率的温度系数较低和倍频时的走离角很小等优点,但破坏阈值低于 LBO,因此,由 KTP 晶体作为倍频器,重点要关注的是其破坏阈值。为提高二次谐波功率,在一定基频激光输出功率及特定晶体尺寸下,减小晶体处基频激光光束的束腰,从而提高基频激光功率密度是一种十分有效的措施,不过随之出现的是 KTP 晶体的破坏阈值问题。晶体的各种形式的破坏主要包括内部破坏及表面破坏,内部破坏中有一种皮秒量级脉冲造成的“灰线”(gray line)状破坏,在大多数情况下,这种破坏具有自然恢复的特性;表面破坏中,主要针对纳秒量级脉宽的破坏,表现为通光面上开始出现很多“麻点”,如继续使用,这些麻点会发展为小凹坑,随后这种凹坑加深,麻点增多,导致输出功率急剧下降  $30\% \sim 35\%$ ,这些破坏麻点是永久性的,必须重新抛光及镀膜后,才能再重新使用。这种破坏的根源在于杂质吸收,或材料对

于倍频光的强吸收,也存在抛光质量、镀膜前清洗及膜层质量引起的破坏等。

另外,由于晶体材料本身的纯度不高,造成对激光的吸收较大,尤其是在长期工作下,形成的 KTP 晶体“灰迹”(gray tracking)效应就是制约 KTP 晶体在高功率下广泛应用的缺陷。因此,要使激光器长期稳定地运行,采用 LBO 晶体倍频将是可选的一个方案。

LBO 晶体具有非常高的抗损伤阈值(约  $2.5\ \text{GW}/\text{cm}^2$ ),是 KTP 晶体的 5 倍,并且不存在灰迹效应,材料本身对光的吸收率较低,有利于在高功率情况下长期连续稳定运行。但是,它的不利因素是有效非线性系数较低。为了提高转换效率就必须尽量提高 LBO 晶体内部的基频激光的功率密度和增加倍频晶体的长度,在谐振腔的设计中,采用含望远镜系统的四镜折叠 Z 型腔,将倍频晶体放在腔内功率密度最高的束腰位置,同时,为了提高倍频效率,选用比较长的晶体材料,以保证 LBO 的转换效率。

综合考虑各种因素,在实验中采用 LBO 晶体作为倍频晶体,采用临界相位匹配方式,匹配角为  $\theta=86.1^\circ$ ,  $\Phi=0^\circ$ 。

## 4 实验研究

### 4.1 实验装置

实验结构如图 4 所示。图中 M1, M4 为平面镜。M1 镀膜参数为:  $R_{1319} > 99.8\%$ ,  $T_{1064} > 80\%$ ,  $T_{1338} > 20\%$ ; M4 镀膜参数为  $R_{1319} > 99.8\%$ ,  $R_{659.5} > 99\%$ ,  $T_{1064} > 60\%$ ,  $T_{1338} > 20\%$ ; M2, M3 为凹面镜,曲率分别为  $R_2=400$  mm,  $R_3=200$  mm, 构成望远系统,其中 M2 镀有  $7^\circ$  入射角下  $R_{1319} > 99.8\%$ , M3 镀有  $7^\circ$  入射角下  $R_{1319} > 99.8\%$ ,  $T_{659.5} > 99.8\%$  的激光介质膜。LBO 晶体尺寸为  $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$ , 采用临界相位匹配方式,匹配角为  $\theta=86.1^\circ$ ,  $\Phi=0^\circ$ 。Nd:YAG 晶

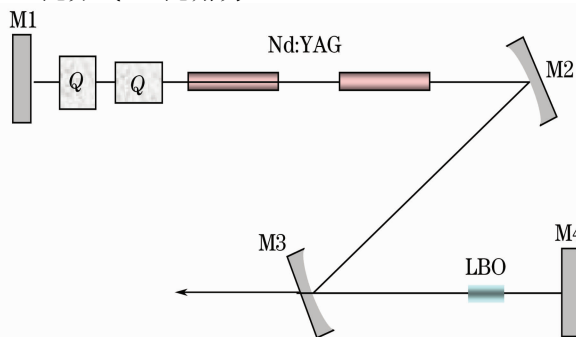


图 4 百瓦级红光激光器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hector-watt-level red laser

体尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ , 两端镀有 1064 nm 和 1319 nm 双增透介质膜。

## 4.2 实验结果及分析

在实验中, 首先去掉声光 Q 开关, 将 M4 镜换为 1319 nm 输出透射率为 10% 的基频输出镜, 测试了 1319 nm 连续激光的输出特性, 如图 5 所示。在每个抽运腔功率为 800 W, 总抽运功率为 1600 W 时, 获得了 1319 nm 连续激光输出功率 230 W。在此基础上, 插入双声光 Q 开关调制, 在重复频率为 10 kHz 下, 获得了平均功率 202 W 的高重复频率激光输出, 连续运行 1 h, 功率稳定性小于 1%。

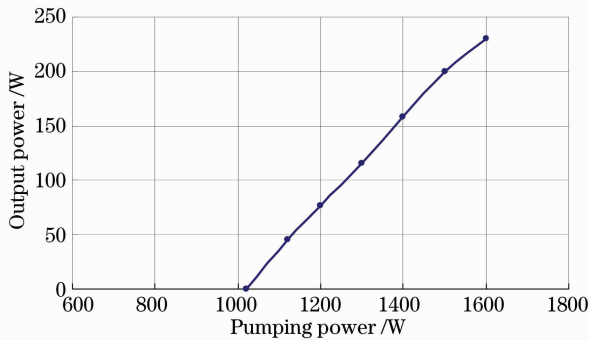


图 5 1319 nm 连续输出特性曲线

Fig. 5 Curve for 1319 nm CW output power versus pump power

插入 LBO 晶体, 换上 M4 镜片, 调整谐振腔, 在 10 kHz 下, 获得了波长为 659.5 nm, 平均功率为 105 W 的高重复频率红光激光输出, 总的光-光转换效率达 6.6%, 采用美国 Spiricon 公司的  $M^2$  测试仪测量, 输出激光的  $M^2$  约为 27, 测试结果如图 6 所示。

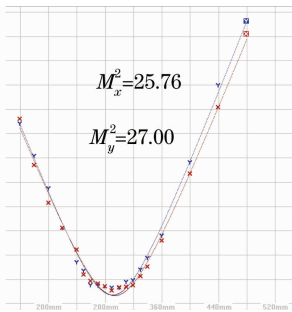


图 6 光束质量测试图

Fig. 6 Beam quality of the laser

## 5 结 论

采用含望远系统的双棒串接四镜折叠腔结构, 双声光开关调 Q, LBO 晶体腔内腔倍频的总体技术方案, 在重复频率为 10 kHz 下, 实现了 659.5 nm 输出功率为 105 W 的高功率、高光束质量红光激光输

出,  $M^2$  约 27, 光-光转换效率达 6.6%。在实验中发现, 高光束质量和高功率是不可兼得的, 如何利用理论分析的结果在提高光束质量情况下获得尽可能高的输出功率, 提高转换效率, 我们将会继续开展相应的研究工作。

## 参 考 文 献

- 1 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327  
常冬霞, 刘 侠, 王 宇等. 连续波 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 323~327
- 2 Ge Qing, Yu Lin, Jia Xiaojun *et al.*. Extracavity frequency doubled red laser with single frequency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1744~1748  
葛 青, 于 琳, 贾晓军等. 外腔谐振倍频单频红光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1744~1748
- 3 Wen Wuqi, Yao Jianquan, Wang Tao *et al.*. LD pumper Nd:YAG/KTP Q-CW red laser with 12 W power [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(3): 271~273  
温午麒, 姚建铨, 王 涛等. 二极管抽运 Nd:YAG/KTP 12 W 红光激光器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(3): 271~273
- 4 H. B. Peng, W. Hou, Y. H. Chen *et al.*. 28 W red light output at 659.5 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YAG laser using LBO[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 3961~3967
- 5 Yang Tao, Wang Jianjun, Jiang Dongsheng *et al.*. All-solid-state red laser with 83 W output power at 659.5 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1178~1181  
杨 涛, 王建军, 姜东升等. 83 W 659.5 nm 全固态红光激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1178~1181
- 6 Zou Yue, Wang Jianjun, Yang Tao *et al.*. Theoretic simulation and experimental research for two-rod series connection telescopic resonator laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(suppl.): 418~421  
邹 跃, 王建军, 杨 涛等. 双棒串接望远镜腔的理论模拟和实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(增刊): 418~421
- 7 Wang Hailin, Zhou Zhuoyou, Cao Hongbing *et al.*. Study on the stable characteristic of two-rod Nd:YAG laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 149~152  
王海林, 周卓尤, 曹红兵等. 双棒串接 Nd:YAG 激光器的稳定特性研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(2): 149~152
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Laser Theory [M]. 4<sup>th</sup> Edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2000  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理 [M]. 第四版, 北京: 国防工业出版社, 2000
- 9 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. 5<sup>th</sup> Edition, Beijing: Science Press, 2002. 197  
W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 第五版, 北京: 科学出版社, 2002. 197
- 10 Lü Baida. Study on telescopic resonator [J]. *Laser Technology*, 1984, **5**: 48~53  
吕百达. 望远镜谐振腔的研究[J]. *激光技术*, 1984, **5**: 48~53
- 11 H. R. Yang. 41 W CW TEM<sub>00</sub> ( $M^2 = 1.2$ ) 1064 nm beam generation from a diode-side-pumped Nd:YAG laser by use of a dual-telescopic optics configuration [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **204**: 263~266
- 12 Lu Yaxiong, Lü Baida. Matrix Optics [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989. 222~236  
卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989. 222~236