

36 W 侧面抽运腔内倍频 Nd :YAG/KTP 连续绿光激光器*

张玉萍^{1,2)†} 张会云^{1,2)} 何志红^{3,2)} 王 鹏²⁾ 李喜福²⁾ 姚建铨²⁾

1) 山东科技大学理学院, 青岛 266510)

2) 天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) 电子科技大学中山学院电子工程系, 广州 中山 528402)

(2008 年 10 月 16 日收到, 2008 年 11 月 14 日收到修改稿)

通过优化平-凹-平三镜折叠腔结构设计, 利用大功率半导体激光器侧面抽运、II 类相位匹配 KTP 晶体腔内倍频, 获得高效高功率连续绿色激光输出. 当抽运电流约为 36 A 时, 得到最高 36.6 W 的连续绿光激光输出, 对应的光-光转换效率为 8.71%. 在输出功率 33 W 时测量激光功率稳定性, 其功率不稳定性为 0.27%. 用刀口法测量了激光器高输出功率时的光束质量, 光束质量因子小于 8. 对高功率抽运情况下三镜折叠腔的像散补偿、失调灵敏度和基模在腔内分布情况做了数值模拟.

关键词: 侧面抽运, 腔内倍频, 连续波

PACC: 4255R, 4260B

1. 引 言

半导体抽运内腔倍频高功率全固态绿光激光器具有效率高、体积小、稳定性好和寿命长等优点^[1-3], 在医疗卫生、潜卫通讯、激光彩色显示、激光加工、数据存储和科研等领域有重要的应用前景. 因此, 半导体抽运全固态连续绿光激光器成为国际上近年来的研究热点^[4-10]. 其中, 半导体侧面抽运的内腔倍频激光器是实现高功率、高稳定且低成本连续绿光激光器的有效方法. 近年来, 高平均功率侧面抽运腔内倍频声光调 Q 绿光激光器有了很大进展, 调 Q 绿光平均功率超过 100 W^[11-13]. 而连续绿光却难以实现高稳定和高功率. 迄今为止报道的侧面抽运内腔倍频绿光激光器的最高功率为 Mukhopadhyay 等实现的 30.5 W^[9]. 但其光束质量因子 M^2 值为 ~ 20 , 这在一定程度上限制了其应用范围. Kojima 等人^[10]报道了侧面抽运内腔倍频连续 Nd :YAG 激光器, 最大绿光输出功率 27 W, 对应的光束质量因子 $M^2 = 8$, 光光转换效率 8.2%; 当输出为基模时, 输出功率为 16 W, 对应的光束质量因子 $M^2 = 1.2$, 光-

光转换效率 4.8%. 但他们使用了两个抽运源串接, 这在一定程度上使系统的复杂性和成本增加, 且不利于产品化. 我们用不同的模块分别实现了 18 W 和 22.7 W 连续绿光输出, 光束质量因子小于 7^[14, 15].

本文中实现了 36 W 侧面抽运腔内倍频连续绿光输出, 功率不稳定性为 0.27%, 光-光转换效率约 8.71%, 光束质量因子 M^2 值小于 8. 本文采用的是 Nd :YAG 晶体单棒三镜折叠腔方案, 为了同时获得高平均功率与高光束质量的全固态连续绿光输出, 我们采取了以下几种技术: 一是利用低掺杂浓度的 Nd :YAG 晶体实现较均匀的抽运增益分布; 二是设计了三镜折叠腔, 并对所设计的腔的像散补偿特性进行了模拟, 以提高激光器的光束质量; 三是考虑了所设计的谐振腔的失调灵敏性, 以提高激光器的稳定性和可靠性; 四是同时考虑了基频光的模体积增大和倍频光的功率密度增大, 以提高激光器的输出功率. 我们在实验装置中抽运源仅使用单模块, 使系统复杂性降低, 利于产品化. 相对文献 [9] 我们的光束质量因子有了较大改善, 相比以前的工作^[14, 15], 我们对激光器腔参数等的优化又进行了较深入的研究, 使激光器输出功率、功率稳定性等有了很大提

* 国家自然科学基金面上项目(批准号: 60671036), 山东科技大学春蕾计划项目(批准号: 2008AZZ094) 资助的课题.

† E-mail: zhangyuping1976@yahoo.com.cn

高. 据我们所知, 这是目前报道的侧面抽运内腔倍频绿光激光器最高功率输出.

2. 实验装置

实验采用三镜 V 形腔结构, 装置如图 1 所示. 抽运源为北京国科世纪激光公司的 GKPM-150 型侧

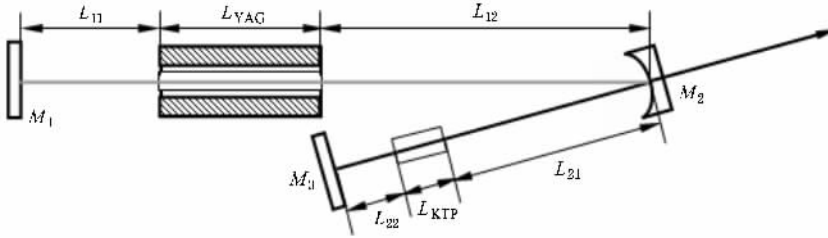


图 1 激光谐振腔示意图

倍频晶体为普通的 KTP 晶体, II 类相位匹配切割, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$, 尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 双面镀 1064 nm 532 nm 增透膜. KTP 晶体用铜片包裹置于紫铜热沉中, 以保持良好的热接触. 紫铜热沉用循环水冷却, 冷却温度设置为 $19.4 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

M_1 为平平镜, 面向腔内的一面对 1064 nm 激光镀全反膜, 反射率大于 99.9% ; M_2 为平凹镜, 凹面镀 1064 nm 高反、 532 nm 增透膜, 对 1064 nm 反射率大于 99.8% , 对 532 nm 透过率大于 90% , 凸面镀 532 nm 增透膜, 透过率大于 99.9% ; M_3 为平面镜, 面向腔内的一面对 1064 nm 和 532 nm 激光镀双色全反膜, 对 1064 nm 反射率大于 99.7% , 对 532 nm 反射率大于 95% , 折叠半角约为 10° .

抽运模块置于 M_1 镜与 M_2 镜之间, KTP 置于 M_2 与 M_3 之间.

倍频激光经 M_2 耦合输出, 输出激光再经滤波镜以滤掉其中的基频光成分. 用 OPHIR 公司 Nova II 功率计(探头为 1Z01550)测量绿激光输出功率.

3. 理论分析

三镜折叠腔具有以下优点: 模参数调整灵活、腔内模体积大. 在倍频晶体所在的折叠臂可以获得较小的光腰半径, 从而获得较大的基频光功率密度和倍频转换效率. 提高激光器对抽运光的利用率, 将基频光和倍频光分开, 减少了激光晶体对倍频光的吸

面抽运模块, 其测试腔 1064 nm 激光大于 150 W . 整个组件采用三个等间距的抽运激光二极管阵列, 按照三角形等间距排列抽运棒状 Nd:YAG 晶体, 晶体棒的尺寸为 $\phi 4 \times 97$, 掺杂浓度 0.8 at\% , 每一列抽运激光二极管阵列额定功率 200 W , 由四个单二极管条组成. 用循环水冷却模块和 YAG 棒, 冷却水的温度为 $22.6 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

收. 因此我们使用三镜折叠腔.

谐振腔的结构及参数直接影响激光器的输出功率、功率稳定性及输出激光的光束特性. 在确定全固态连续绿光激光器的谐振腔时, 我们主要考虑实现以下三个要求: 1) 进行像散补偿; 2) 将谐振腔设计为热稳腔, 既有大的基模体积, 又在宽的抽运功率范围内维持热稳定, 并具有低的失调灵敏性; 3) 由倍频效率公式 $\eta = kI(\omega)$ (k 为与非线性晶体有关的转换因子) 可知^[16], 倍频效率与基频光强成正比, 因此为了提高转换效率, 应该在倍频晶体处获得较高的基波功率密度.

根据以上设计原则和要求, 我们对三镜折叠腔进行数值模拟. 图 2 是 Nd:YAG 晶体和 KTP 晶体在理想面、子午面和弧矢面上的光斑大小. 由图可知,

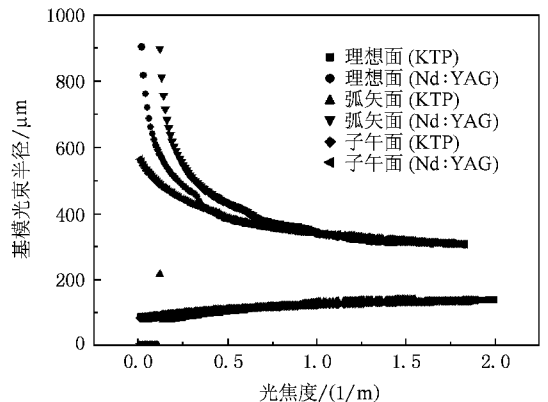


图 2 Nd:YAG 晶体和 KTP 晶体在理想面、子午面和弧矢面上的光斑大小

高抽运功率时,两晶体上子午面和弧矢面上光斑非常接近,说明在高功率时像散补偿的效果比较好。

图 3 是激光谐振腔失调灵敏度和棒的光焦度 D 的关系图,经过精心选择腔参数,我们得到了较低的失调灵敏度,使激光器更稳定并适于产品化。

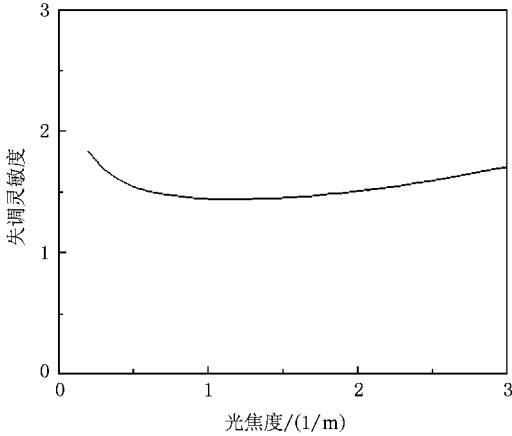


图 3 激光谐振腔失调灵敏度和棒的光焦度 D 的关系图

图 4 是高抽运功率下基模在腔内分布图,结合图 2 可知,Nd:YAG 晶体上的光斑半径是 KTP 晶体上光斑半径的 3 倍左右。因此,既能在 YAG 晶体上得到大的模体积,充分利用抽运能量,又能在 KTP 晶体上得到高的功率密度,以提高倍频效率。

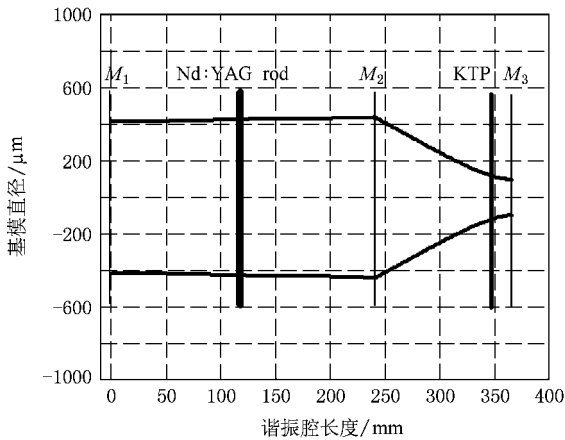


图 4 基模在腔内分布图

4. 实验结果及分析

根据以上理论模拟,同时在实验中进行适当调整,取以下参数时得到了较好的实验结果: M_2 凹面曲率半径 R 为 250 mm, M_1 到抽运模块之间的距离

L_{11} 为 125 mm,抽运模块与 M_2 之间的距离 L_{12} 为 116 mm, M_2 与 KTP 晶体之间的距离 L_{21} 为 116 mm,KTP 晶体与 M_3 之间的距离为 9 mm。

图 5 为 LD 抽运电流与输出绿光功率关系图。在抽运功率在 36 A 时得到最高 36.6 W 的激光输出功率,对应的光—光转换效率约为 8.71%,抽运功率再升高时,输出功率下降。由于抽运功率最高可以升到 45 A,因此,该激光器仍有较大的继续优化和提高绿光输出功率的潜力。

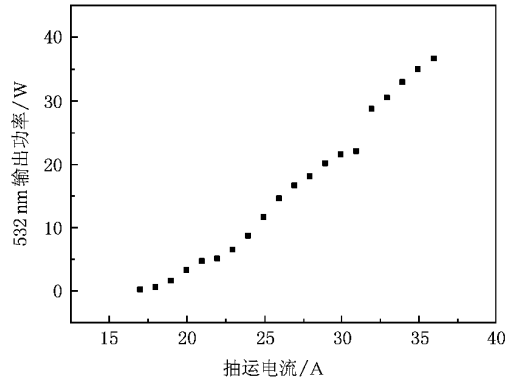


图 5 LD 抽运电流与输出绿光功率关系图

图 6 为我们在 33 W 附近测量的 532 nm 激光功率稳定性,每隔 1 min 从功率计上读取一个数据,共测量 30 组数,0.5 h 内其输出功率不稳定性为

$$\Delta \bar{P} / \bar{P} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n} \right]^{1/2} \cdot \frac{1}{\bar{P}}$$

$$\approx 0.27\% < 1\%$$

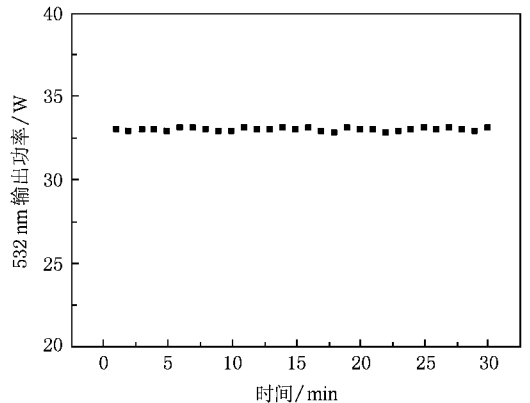


图 6 输出功率 33 W 附近时的功率稳定性

在抽运电流为 34 A,输出功率是 33 W 时,我们用刀口法测量了的光束的光斑半径分布,如图 7 所示,经计算得 M^2 值约为 7.3。

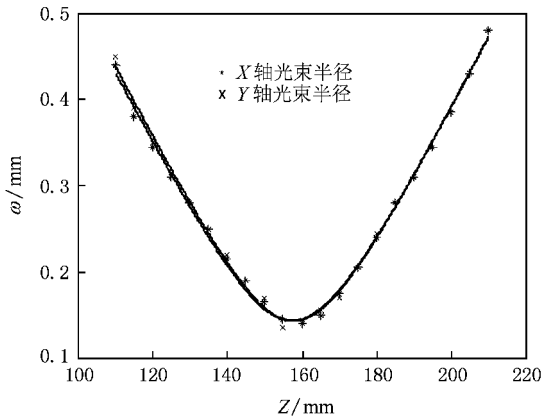


图 7 光束的光斑半径分布图

5. 结 论

本文采用一个 600 W 的 808 nm 侧面抽运模块作抽运源,侧面抽运 Nd:YAG 晶体,II 类相位匹配 KTP 晶体腔内倍频,通过合理的腔型设计及参数选择,获得了高效率、高功率、高稳定的 532 nm 绿光连续波输出.在 LD 抽运电流为 36 A 的情况下,激光器绿光稳定输出 36.6 W,对应的光光转换效率达到 8.71%.在输出激光为 33 W 时测得半小时功率不稳定性为 0.27%,光束质量因子 M^2 小于 8.

- [1] Yao Z Y , Jiang J F , Xu B , Zhou T J , Cui L L 2005 *Chinese Journal of Lasers* **32** 1459 (in Chinese) [姚震宇、蒋建锋、涂波、周唐建、崔玲玲 2005 中国激光 **32** 1459]
- [2] Xu D G , Yao J Q , Zhang B G , Zhao S Y , Zhou R , Ding X , Wen W Q , Wang P 2005 *Chin. Opt. Lett.* **2** 85
- [3] Xu D G , Yao J Q , Guo L , Zhou R , Zhang B G , Ding X , Wen W Q , Wang P 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 925 (in Chinese) [徐德刚、姚建铨、郭丽、周睿、张百刚、丁欣、温午麒、王鹏 2004 光学学报 **24** 925]
- [4] Peng X Y , Xu L , Asundi A 2005 *Appl. Opt.* **44** 803
- [5] He J L , Hou W , Zhang H L , Li J , Wang J M , Xu Z Y , Yang G Z 2000 *Chinese Journal of Lasers* **27** 481 (in Chinese) [何京良、侯玮、张恒利、李健、王建明、许祖彦、杨国桢 2000 中国激光 **27** 481]
- [6] Bai Y , Li L , Chen H W , Yang Z , Bai J T 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1532
- [7] Bai J T , Chen G F 2002 *Optics and Laser Technology* **34** 333
- [8] Louis M D , Richard W 2007 *Optic Letters* **32** 802
- [9] Mukhopadhyay P K , Sharma S K , Ranganathan K , Gupta P K , Nathan T P S 2006 *Optics Communications* **259** 805
- [10] Kojima T , Fujikawa S , Yasui K 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 377
- [11] LeGarrec B J , Raze G J , Thro P Y , Gilbert M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1990
- [12] Konno S , Kojima T , Fujikawa S , Yasui K 2000 *Opt. Lett.* **25** 105
- [13] Yi J , Moon H J , Lee J 2004 *Appl. Opt.* **43** 3732
- [14] Zhang Y P , Zhang H Y , Zhong K et al 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 2242
- [15] Zhang H Y , Zhang Y P , Zhong K , Wang P , Li X F , Yao J Q 2008 *Chinese Journal of Lasers* **35** 15 (in Chinese) [张会云、张玉萍、钟凯、王鹏、李喜福、姚建铨 2008 中国激光 **35** 15]
- [16] Zheng Q , Xue Q H , Wang J Y 2004 *Laser and Infrared* **34** 24 (in Chinese) [郑权、薛庆华、王军营 2004 激光与红外 **34** 24]

A 36 W intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Nd :YAG/KTP continuous wave green laser *

Zhang Yu-Ping^{1)2)†} Zhang Hui-Yun¹⁾²⁾ He Zhi-Hong³⁾²⁾ Wang Peng²⁾ Li Xi-Fu²⁾ Yao Jian-Quan²⁾

1) (College of Science , Shandong University of Science and Technology , Qingdao 266510 , China)

2) (Institute of Laser and Optoelectronics , College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

3) (Department of Electronic Engineering , University of Electronic Science and Technology of China , Zhongshan Institute , Zhongshan , Guangzhou 528402 , China)

(Received 16 October 2008 ; revised manuscript received 14 November 2008)

Abstract

High-power and high efficiency continuous wave green laser has been realized by optimizing the plane-concave-plane resonator of three mirrors in an laser diode side-pumped configuration and KTP of II -type phase-matching for frequency doubling. A maximum of 36.6 W continuous wave 532 nm green laser is obtained at pumping current of 36 A , corresponding to optical-to-optical conversion efficiency of 8.71% . The power stability of the laser is measured at output power of 33 W . During a half hour measurement time , the output power instability is 0.27% . The beam transfer factor is less than 8 measured by knife-edge method at output power of 33 W . Astigmatism compensation , misalignment sensitivity and mode profile inside resonator of three mirror folded resonator are also numerically simulated under high pump power.

Keywords : diode-side-pumping , intracavity-frequency-doubling , CW

PACC : 4255R , 4260B

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60671036) and the Spring Bud Project of Shandong University of Science and Technology (Grant No. 2008AZZ094).

† E-mail : zhangyuping1976@yahoo.com.cn