

文章编号: 1001-3806(2009)03-0291-03

## 164W LD 侧抽运准连续 Nd:YAG/HGTR-KTP 高功率绿光激光器

李成荣<sup>1</sup>, 陈秀艳<sup>2</sup>, 李修<sup>2</sup>, 郑新亮<sup>3</sup>, 汪俊<sup>4</sup>, 陈浩伟<sup>2</sup>, 任兆玉<sup>2</sup>, 白晋涛<sup>2\*</sup>

(1. 榆林学院 物理与电气工程系, 榆林 719000; 2. 西北大学 光子学与光子技术研究所 陕西省光电子省级重点开放实验室, 西安 710069; 3. 西北大学 物理学系, 西安 710069; 4. 西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710069)

**摘要:** 为了研究百瓦级高光束质量绿光激光器, 采用激光二极管侧面抽运双棒串接、双声光调  $Q$  的方法, 依据光束传输矩阵, 分析比较了  $V$  型折叠腔内分别置入单、双激光晶体时, 其热透镜效应对谐振腔稳定性、折叠臂内光场分布以及倍频晶体处子午光斑和弧矢光斑大小的影响, 倍频晶体选用具有抗灰迹特性的 II 类临界相位匹配 KTP 晶体。当总抽运功率为 1200W、重复频率为 27.2kHz 时, 得到了脉冲宽度为 130ns 的 164W 准连续绿光输出, 光光转换效率为 13.7%, 光束质量因子  $M_x^2 = 10.46$ ,  $M_y^2 = 10.59$ 。结果表明, 使用双棒串接、双声光调  $Q$   $V$  型腔结构, 可以获得百瓦级高功率、高光束质量 532nm 绿光输出。

**关键词:** 激光器; 高功率激光; 双棒串接; 热透镜效应

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## 164W LD side-pumped quasi-continuous-wave Nd:YAG/HGTR-KTP green laser

Li Cheng-rong<sup>1</sup>, CHEN Xiu-yan<sup>2</sup>, LI Xiu<sup>2</sup>, ZHENG Xin-liang<sup>3</sup>, WANG Jun<sup>4</sup>,  
CHEN Hao-wei<sup>2</sup>, REN Zhao-yu<sup>2</sup>, BAI Jin-tao<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Electrical Engineering, Yulin College, Yulin 719000, China; 2. Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Institute of Photonics and Photo-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 4. College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** In order to investigate more than one hundred Watt green laser, two serial rods pumped by laser diodes and two  $Q$ -switched  $V$ -shaped resonators were used. Based on the transmission matrixes, when single and double rods were placed in the cavity respectively, the stable condition of cavity, the light distribution in the folded arm, along with the sagittal and tangential spot size on the nonlinear crystal influenced by the thermal lens effect were analyzed and compared. A high gray tracking resistivity (HGTR)-KTP crystal with type II critical phase-matching was adopted as intracavity frequency doubler. When the pump power of two diode lasers was 1200W and the repetition rate was 27.2kHz, 164W green laser with the pulse width of 130ns was obtained. The optical-optical conversion efficiency was 13.7%. The beam quality factor was  $M_x^2 = 10.46$ ,  $M_y^2 = 10.59$ . The result shows that one hundred Watt green laser could be obtained in the two-rod and two  $Q$ -switched  $V$ -shaped resonator configuration.

**Key words:** lasers; high power laser; two serial rods; thermal lens effect

### 引言

激光二极管抽运的全固态激光器具有体积小、效率高、稳定性好和寿命长的特点, 在医疗、科研、通讯、国防、工业加工等领域有着广阔的应用前景, 国内外学者对此进行了广泛的研究<sup>[1-5]</sup>。特别是近几年来, 随着千瓦级 LD 阵列的出现, 利用非线性晶体进行激光器腔内外倍频、和频、光参量振荡等技术获得高功率短波

长激光已成为激光领域中研究的热点, 其中, 最为瞩目的就是全固态百瓦级绿光激光器的研制<sup>[6]</sup>。

尽管激光二极管抽运的全固态激光器与传统的灯抽运激光器相比, 具有高效、长寿命、体积小、热效应小等优点, 但高功率运转下, 激光晶体的热透镜效应对谐振腔稳定性、功率输出、转换效率及光束质量等产生的负面影响仍然是激光器件应用研究的重要课题。关于解决激光器热透镜的问题, 除可以设计不同几何构型的增益介质外, 还可以通过腔内插入附加的光学元件或同时采用完全相同的双激光晶体来对热透镜效应进行补偿<sup>[7-13]</sup>。作者通过采用双棒串接  $V$  型腔结构, 在讨论谐振腔内单、双激光晶体热透镜效应对谐振腔稳定性、束腰半径等参量影响的基础上, 设计了大抽运功

基金项目: 国家火炬计划资助项目(2006GH041493)

作者简介: 李成荣(1956-), 男, 副教授, 现主要从事物理教学与激光技术研究。

E-mail: lcr1956@163.com

收稿日期: 2008-02-22; 收到修改稿日期: 2008-04-02

率变化范围内双 Nd:YAG 串接 V 型热不灵敏腔,最大获得了 164W 的 532nm 绿光激光输出。

### 1 理论分析与计算

在腔内倍频的情况下,折叠腔具有有效空间大、模参量调整灵活等特点,很容易实现腔内双向倍频单向输出,而且还可以使倍频转换过程与激光晶体隔离,这样不仅可以减少激光晶体对倍频光的吸收,还可以提高倍频转换效率,在一定程度上减缓激光器运转过程中的热透镜效应,因此,折叠腔结构被很多腔内倍频激光系统所采用。本文中所讨论的激光二极管抽运的双棒串接放大器输出 (amplifier output, AO) 双声光调 Q Nd:YAG/KTP 激光系统就采用了 V 型谐振腔结构,其实验装置图及其热透镜等效光路图见图 1 和图 2。

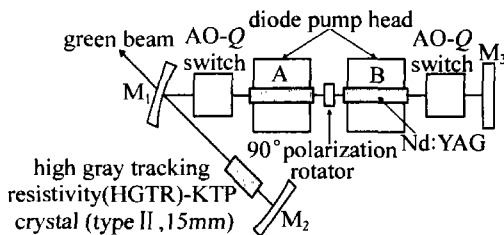


Fig. 1 Schematic drawing of the cavity configuration

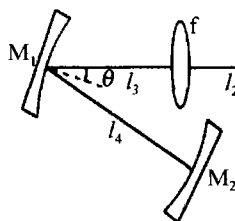


Fig. 2 Equivalent thermal lens resonator

假设两个激光晶体的物理性质和光学性质完全相同且具有相同的热焦距。以端镜  $M_3$  为参考面,则谐振腔内的单程传输矩阵为<sup>[5]</sup>。

$$M_s = \begin{bmatrix} a_s & b_s \\ c_s & d_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_t = \begin{bmatrix} a_t & b_t \\ c_t & d_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1\cos\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

G 参量因子为:

$$G_1 = a_i - \frac{b_i}{R_2}, G_2 = d_i - \frac{b_i}{R_2}, (i = s, t) \quad (3)$$

谐振腔稳定条件为:

$$0 < G_1 \times G_2 < 1 \quad (4)$$

式中,下角标 s, t 分别代表弧矢面和子午面,  $R_1, R_2, R_3$

分别为谐振腔镜  $M_1, M_2, M_3$  的曲率半径,  $\theta$  为腔内光束在折叠镜  $M_1$  上的入射角,  $f$  为激光晶体热焦距。

根据上述条件,用计算机做数值计算处理有关数据,首先筛选出一组较为理想的谐振腔参量:  $l_1 = 9\text{cm}, l_2 = 5\text{cm}, l_3 = 8\text{cm}, l_4 = 16\text{cm}$ , 折叠角(半角)  $\theta = 14^\circ$ , 在此基础上,讨论热透镜效应存在时谐振腔稳定运转条件下各参量的变化情况。

图 3 为谐振腔 G 参量随热焦距的变化规律图。

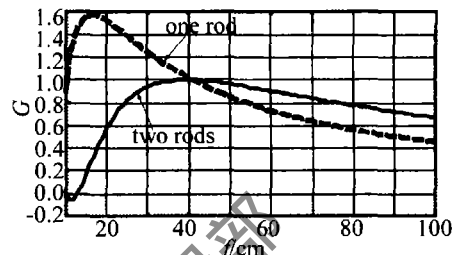


Fig. 3 The cavity stability of single and double laser crystals

为了方便比较,在其它条件完全相同的情况下,分别做出双激光晶体及去掉左激光晶体后的稳区图。从图 3 可以看出,利用双激光晶体补偿后,谐振腔的稳区范围明显加宽,双激光晶体的热焦距在  $[12\text{cm}, \infty)$  范围内变化时,谐振腔始终能满足腔的稳定性条件,宽的稳区范围更有利于高功率激光的输出。

对于 V 型谐振腔而言,为保证倍频效率的提高,一般把倍频晶体放在折叠臂的光腰处,并且要求腔内光场的像散要尽量小,以获得高质量激光输出。从图 4a 和图 4b 可以看出,图 4a 中双激光晶体折叠臂内子

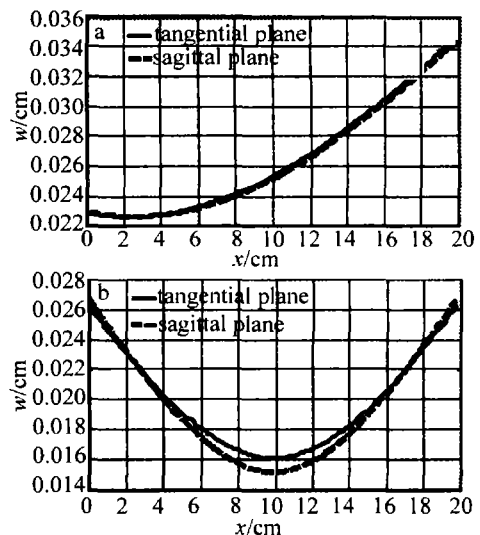


Fig. 4 a—the light distribution in folded arm for dual laser crystal cavity

b—the light distribution in folded arm for single laser crystal cavity

午面光斑半径与弧矢面光斑半径重合得更好,而且束腰半径在靠近谐振腔端镜  $M_2$  处,而图 4b 中单激光晶体谐振腔内折叠臂的束腰半径在折叠臂中间处,且像散较大。从实际操作角度出发,倍频晶体靠近端镜  $M_2$  处可使光路调节更为灵活方便,可以避免折叠臂内光

学元件对光路的遮挡,从而使折叠半角取值范围更大。

图 5a 和图 5b 分别为双激光晶体与单激光晶体谐振腔中倍频晶体处子午面和弧矢面光斑尺寸大小随激光晶体热焦距的变化关系图。结果表明,双激光晶体

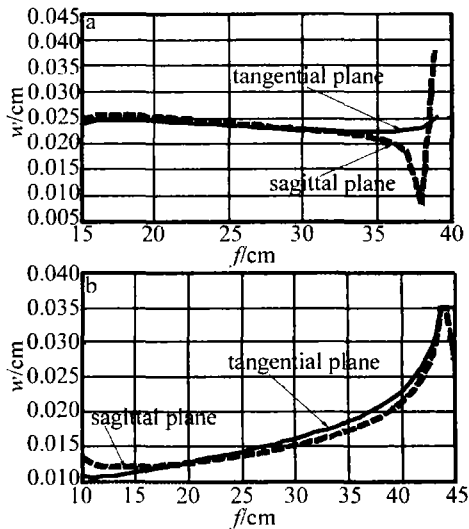


Fig. 5 a—the wave radius on SHG crystal in the dual laser crystal resonator  
b—the wave radius on SHG crystal in the single laser crystal resonator

谐振腔内子午面和弧矢面的光束光斑尺寸大小在高功率下重合得较好,而在单激光晶体谐振腔内二者差异较大且随热焦距的改变变化较为显著,可见前者更易于高功率抽运条件下获得高质量的绿光激光束。

## 2 实验装置与结果

图 1 所示的实验装置中,两个型号相同的半导体激光抽运组件串接且同步驱动。每个组件由 30 个 20W 的 LD 组成,按照五角形等间距侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒,总抽运功率 1200W。Nd:YAG 棒的尺寸均为  $\varnothing 5.0\text{mm} \times 105\text{mm}$ 。倍频晶体 HGTR-KTP 具有抗灰线特性,采用 II 类临界相位匹配方式 ( $\phi = 23.8^\circ, \theta = 90^\circ$ ),并实施恒温控制,在一定程度上补偿了因热效应引发的倍频晶体相位失配。调 Q 方式采用正交放置、同步驱动的双声光调 Q 模块以实现在高功率激光运转下声光所具有的较高的关断能力,增大基波脉冲的峰值功率,提高倍频转换效率。平凹镜  $M_1$  凹面镀 1064nm 高反与 532nm 增透的双色膜,平面镀 532nm 增透膜;平凹镜  $M_2$  凹面镀 1064nm 与 532nm 双色高反膜;平面镜  $M_3$  内表面镀 1064nm 与 532nm 双色高反膜。

图 6 是 532nm 绿光激光输出功率随抽运电流的变化关系。由图可知,随着抽运功率的增大,绿光输出功率逐渐升高,当两块半导体模块的总抽运功率为 1200W,重复频率为 27.2kHz 时,获得了 532nm 绿光最大平均输出功率为 164W,脉冲宽度为 130ns,见图 7。整个过程中,激光系统都在稳定状态下运转。在输出

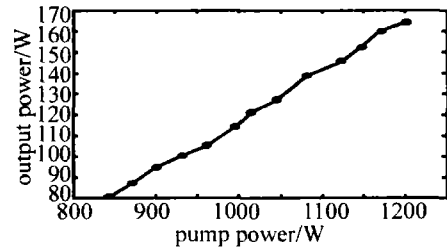


Fig. 6 Green laser output power vs. different pump power of diode-laser module

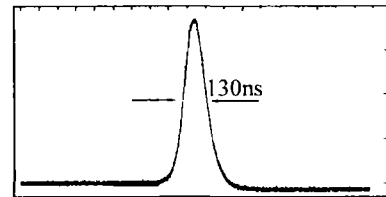


Fig. 7 The pulse width of 532nm green laser

功率为 164W 时,使用美国 Spiricon 公司生产的 LBA-200 光斑测试仪,测得光束质量因子  $M_x^2 = 10.46, M_y^2 = 10.59$ 。激光器连续工作 2h 以上,每隔 15s 测量 1 次输出功率,输出功率不稳定性小于 2.3%。

## 3 结论

通过讨论谐振腔内单、双激光晶体热透镜效应对谐振腔稳定性、腔内光场分布及束腰半径等参量的影响,设计了双 Nd:YAG 串接热不灵敏腔,采用激光二极管侧面抽运双 Nd:YAG 晶体 II 类临界相位匹配 HGTR-KTP 晶体腔内倍频的方案,最大获得了单端输出 164W 的 532nm 绿光激光。

### 参考文献

- [1] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP high power solid-state green laser [J]. Opt & Laser Technol, 2004, 34(4): 333-336.
- [2] LI B Ch. Experimental optimization of the output performance of a all-solid-state pulsed Nd:YAG laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 144-146 (in Chinese).
- [3] LIU X S, WANG Z Y, YAN X, et al. A high energy good-beam-quality krypton lamp pumped Nd:YAG solid-state laser with one pump cavity [J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(2): 521-523.
- [4] ZHOU R, YAO J Q, XU D G, et al. Study on resonator of 85W all-solid-state green laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(6): 641-645 (in Chinese).
- [5] CHAO L, YUAN X, ZHU Ch H, et al. Phase-matching characteristics of 589nm radiation generated by SFG with double-axis crystals [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 459-461 (in Chinese).
- [6] GENG A C, BO Y, BI Y, et al. One hundred and twenty one W green laser generation from a diode-side-pumped Nd:YAG laser by use of a dual-V-shaped configuration [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(6): 589-596.
- [7] CHEN Y F, HUANG M, KAO C F, et al. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power; influence of thermal effect [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(8): 1424-1429.

(下转第 296 页)

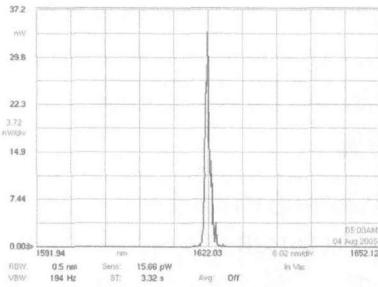


Fig. 5 Signal spectrum of 1662nm of PPMgLN-OPO

### 3 结论

实验中采用二极管端面抽运 1064nm 声光调 Q Nd:YAG 激光器作为抽运源,研究了 PPMgLN-OPO 的温度调谐特性和输出特性。当温度从 40℃ 升高到 200℃ 时,获得了 1565nm ~ 1670nm 宽调谐信号光输出,实现了全固态抽运的光参量振荡的宽调谐输出;当晶体的温度为 110℃,抽运光平均功率为 1.61W, Q 开关的重复频率为 10kHz,脉宽为 70ns 时,获得了 211mW 波长为 1.631μm 的信号光输出;随着温度的升高,输出信号光平均功率缓慢增大,并且在室温下实现了参量光输出,晶体没有受到损伤,证明了掺氧化镁铌酸锂晶体抗光损伤能力提高了。实验结果表明,温度调谐光参量振荡器可以作为宽波段的可调谐相干光源。

### 参 考 文 献

- [1] YAO B Q, WANG Y Zh, LIU Q, *et al.* Comparison of LiNbO<sub>3</sub> with KTP optical parametric oscillator operating in mid-infrared spectrum [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(10): 1228-1231 (in Chinese).
- [2] KALMANI G, ARIE A, BLAU P, *et al.* Polarization-mixing optical parametric oscillator [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(16): 2146-2148.
- [3] ZHANG H, YAO J Q, ZHANG B G, *et al.* Angle-tuned optical parametric oscillators based on PPLN pumped by 1064nm laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(12): 1250-1253 (in Chinese).
- [4] LIANG X Y, HOU W, LU J H, *et al.* Low-threshold and wide tunable PPLN optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(1): 10-12 (in Chinese).
- [5] ZHANG B G, YAO J Q, DING X, *et al.* Continuously tunable optical parametric oscillator based on multi-grating periodically poled lithium niobate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(8): 897-902 (in Chinese).
- [6] MYERS L E, ECKARDT R C, FEJER M M, *et al.* Multigrating quasi-phase-matched optical parametric oscillator in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(8): 591-593.
- [7] BRYAN D A, GERSON R, TOMASCHKE H E. Increased optical damage resistance in lithium niobate [J]. *A P L*, 1984, 44(9): 847-849.
- [8] ZHANG P, YIN Z, WANG L L, *et al.* Photorefractive effect in periodically poled lithium niobate and lithium tantalate and in MgO-doped lithium niobate [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 1998, 32(2): 450-452.
- [9] MYERS L E, ECKARDT R C, FEJER M M, *et al.* Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *J O S A*, 1995, B12(11): 2102-2116.
- [10] ZHANG B G, YAO J Q, ZHANG H, *et al.* Temperature tunable infrared optical parametric oscillator with periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, 20(7): 1077-1080.
- [11] FLUCK R, HERMANN M R, HACKEL L A. Energetic and thermal performance of high gain diode-side pumped Nd:YAG rods [J]. *Appl Phys*, 2000, B70(4): 491-498.
- [12] XIE W, TAM S, LAM Y, *et al.* Influence of the thermal effect on the TEM<sub>00</sub> mode output power of a laser-diode side-pumped solid-state laser [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(30): 5482-5487.
- [13] GUAN J, CHEN G F, CHENG G F, *et al.* Design of thermal effect compensation resonator for a sort of high-power end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12): 1418-1420 (in Chinese).

(上接第 293 页)

- [8] ZHANG H L, ZHU N Y, YANG Q S, *et al.* LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP red light laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(5): 470-472 (in Chinese).
- [9] XIE H M, CHEN H W, JIA Sh, *et al.* Double-end-pumped double Nd:YVO<sub>4</sub> crystals continuous green laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6): 597-600 (in Chinese).
- [10] GUO L, YAO J Q, YU G J, *et al.* Study on the thermal effect of KTP crystal for 85W green laser [J]. *Laser Journal*, 2003, 24(6): 20-22 (in Chinese).