

文章编号: 0253-2239(2008)08-1543-04

激光二极管侧抽运双棒串接准连续 Nd:YAG 高功率绿光激光器

冯忠耀¹ 李成荣² 李 修³ 汪 俊⁴ 白晋涛³

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

摘要 研制一台激光二极管(LD)侧面抽运双棒串接准连续 Nd:YAG 折叠腔高功率绿光激光器,理论分析了热致双折射效应对系统的影响,并对用石英旋转片补偿前后的情况进行模拟对比。在考虑了补偿后的情况下设计了热稳定谐振腔。实验中采用两个串接的由 30 个 20 W 的 LD 阵列侧面抽运的 Nd:YAG 棒和 II 类临界相位匹配 HGTR-KTP 晶体,在抽运电流均为 21.6 A,重复频率为 27.2 kHz 时,获得了最大平均输出功率为 164 W,脉冲宽度为 130 ns 的 532 nm 绿光输出,光-光转换效率为 13.7%,测得光束质量因子为 $M_x^2=9.52$, $M_y^2=9.86$,不稳定度为 2.3%。实验结果显示,经补偿后的激光系统能在宽的稳区范围内稳定运转。

关键词 激光器;高功率;热致双折射效应;532 nm 绿光

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082808.1543

Laser-Diode Side-Pumped Two Rods Quasi-Continuous-Wave Nd:YAG Green Laser

Feng Zhongyao¹ Li Chengrong² Li Xiu³ Wang Jun⁴ Bai Jintao³

¹ Department of Physics, Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China

² Physics and Electrical Engineering Department, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China

³ Institute of Photonics and Photo-Technology and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China

⁴ School of Information Science and Technology, Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China

Abstract A laser diode (LD) side-pumped two rods quasi-continuous-wave (QCW) Nd:YAG green laser has been demonstrated. The influence of thermal birefringence effect is analyzed. Considering the compensation, a heat-stabilized cavity is designed. In the experiment, two sequent Nd:YAG rods side-pumped by 30×20 W laser diodes array and type-II critical phase-matched HATR-KTP crystal are used. The spot sizes on rod B as a function of pumping current before and after compensation are simulated. The green laser output power of 164 W has been measured at single laser diode pumping current 21.6 A, with the repetition rate of 27.2 kHz, pulse width of 130 ns, optical-to-optical conversion efficiency of 13.7%, beam quality factors of $M_x^2=9.52$, $M_y^2=9.86$, and output power fluctuation of 2.3%. The results show that the system can work at wide stable range after the compensation of the thermal birefringence effect.

Key words lasers; high power; thermal birefringence effect; 532 nm green laser

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的调 Q 全固态绿光激光器具有功率高、体积小、寿命长、使用方便等特点而

成为其他类型的绿光激光器的替代产品,在科研、医疗、通信、国防等领域有着广阔的应用前景^[1~5]。为了获得更大功率激光输出,通常采用激光二极管阵

收稿日期: 2007-12-07; 收到修改稿日期: 2008-04-02

基金项目: 陕西省科技创新重大项目(2006156)资助课题。

作者简介: 冯忠耀(1975-),男,讲师,主要从事激光器件及信息光学等方面的研究。E-mail: fzhy3039550@163.com

列侧面抽运多棒串接工作物质的方式,此时抽运功率较强,大量的抽运功率转化为热功率,直接导致激光晶体横截面内的温度呈不均匀分布,从而导致热应力、热应力双折射、激光晶体端面变形等多种热效应。当激光器高功率运转时,激光晶体的热效应是激光系统设计、优化时首要考虑的因素之一^[6]。

在激光工作物质的热效应中由温度梯度引起的热透镜效应起主要作用,其次是由热致应力双折射引起的热效应,而端面效应引起的热透镜效应最低^[7]。近几年来,随着高功率固体激光器的不断问世,研究晶体的热致双折射效应问题,已成为全固态激光器研究的一个热点^[8~11]。对热致双折射的理论探讨和数值计算也就显得尤为重要。

本文对用石英旋转片补偿前后的情况进行了理论分析与模拟对比,采用 LD 侧面抽运 Nd:YAG、双棒串接、HGTR-KTP 晶体腔内倍频、双声光调 Q 技术以及三镜 V 型腔结构,并利用大功率抽运条件下激光晶体中的热效应优化谐振腔结构,在两个激光半导体模块抽运电流均为 21.6 A 时,获得了 164 W 准连续绿光激光输出,脉冲宽度为 130 ns,光-光转换效率为 13.7%。

2 理论分析

应力产生热应变,而热应变通过光弹效应将改变介质折射率。通过光弹效应理论,由热引入的应力将会使棒的折射率产生特殊的变化,这时激光晶体则可看作在径向(r)和切向(θ)两个方向上有不同焦距值的薄透镜,这就是双折射效应。同样地,谐振腔内光斑模式也将分成沿径向偏振和切向偏振两个部分。热致双折射将显著地改变激光光束质量,并且会使输出功率下降。

补偿热致应力双折射的技术有:1) 对于含有单棒的谐振腔,可以在激光晶体和反射腔镜之间插入 45°法拉第旋转器。光在每次往返中都要经过 45°法拉第旋转器,因此偏振平面旋转了 90°,这样可以实现双折射补偿。2) 采用两个被动光学元件,如波罗(Porro)棱镜和波片,使光线往返通过热像差棒,也能够实现双折射补偿。3) 对于含有两个激光晶体的系统,在两棒之间插入 90°石英旋转片也是一种典型的补偿方法。采用这种方法,径向和切向两个偏振方向在两个激光晶体之间将发生改变,从而使偏振得到补偿。4) 在偏振片上设置光学成像系统从而补偿双折射和双焦点。

实验中采用第三种补偿方法。在高功率腔内倍

频 Nd:YAG 激光系统中,激光晶体由于吸收大量抽运能量而被看作类透镜介质,切向热焦距与径向热焦距分别用 f_r 与 f_θ 表示,类透镜介质的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{r,\theta}l) & (n_0\beta_{r,\theta})^{-1}\sin(\beta_{r,\theta}l) \\ -n_0\beta_{r,\theta}\sin(\beta_{r,\theta}l) & \cos(\beta_{r,\theta}l) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\beta_{r,\theta}$ 为引入 f_r 和 f_θ 的类透镜系数, l 为激光晶体长度, n_0 为折射率。

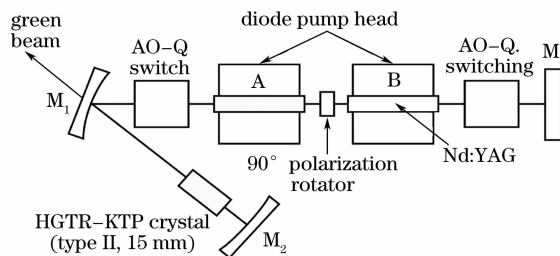


图 1 谐振腔结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the resonator configuration

如图 1 所示,选择合适的谐振腔参数,以激光棒 B 的主平面为参考面,采用 ABCD 光学传输矩阵和光斑半径的表达式,我们分别模拟了加入石英旋转片前后激光棒 B 上的光斑半径随抽运功率的变化情况,如图 2(a)、图 2(b)所示。由图 2(a)可知,当不加石英旋转片时,径向和切向两个偏振方向上的光斑半径重合度不高,且稳区范围差距较大,而系统

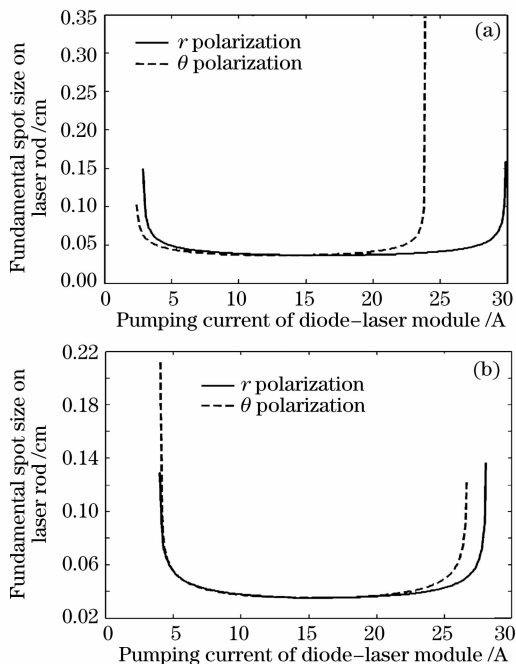


图 2 补偿前(a)、后(b)激光棒 B 上基频光斑随抽运电流的变化关系

Fig. 2 Fundamental frequency spot size on rod B as a function of pumping current before (a) and after (b) birefringence compensation

的稳定运转区域是两个偏振方向上稳区重合的公共部分,这就使整个系统稳区范围很窄;加入石英旋转片后[图 2(b)],径向和切向光斑重合度变高,且系统稳区范围比不加石英旋转片时下更宽,说明双折射效应得到了补偿。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,将两个型号相同的半导体激光抽运组件(美国 CEO)串接,同步驱动。每个组件由 30 个 20 W 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 1200 W。Nd:YAG 棒的尺寸均为 $\phi 5.0 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ 。利用具有抗灰线特性的 HGTR-KTP 作为倍频晶体 ($5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 以色列 RAICLO Crystals 公司),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,不但减小了倍频晶体的热透镜效应,而且在一定程度上补偿了因热效应引发的倍频晶体相位失配,提高了倍频效率。调 Q 方式采用正交放置、同步驱动的双声光调 Q 模块,中心频率为 27 kHz,调制频率在 1~100 kHz 可调,以实现在高功率激光运转下声光调 Q 所具有的较高的关断能力,增大基波脉冲的峰值功率,减少倍频晶体的热效应,提高倍频效率。平凹镜 M_1 凹面镀 1064 nm 高反与 532 nm 增透的双色膜,平面镀 532 nm 增透膜;平凹镜 M_2 凹面镀 1064 nm 与 532 nm 双色高反膜;平面镜 M_3 内表面镀 1064 nm 与 532 nm 双色高反膜。

4 实验结果

图 3 是 532 nm 绿光输出功率随抽运电流的变化关系。由图可知随抽运电流的增大,绿光输出功率逐渐升高,当两块半导体激光模块抽运电流均为 $I = 21.6 \text{ A}$,重复频率为 27.2 kHz 时,获得了 532 nm 绿光最大平均输出功率为 164 W,脉冲宽度为 130 ns,光-光转换效率为 13.7%。整个过程中,激光系统都在稳定状态下运转。在输出功率 164 W 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 $M_x^2 = 9.52, M_y^2 = 9.86$ 。激光器连续工作 2 h 以上,每隔 15s 测量一次输出功率,输出功率不稳定性为 2.3%。图 4 为绿光激光输出 164 W 时距输出镜 70 cm 处激光输出横向相对功率分布图(图中只给出了一维方向上的分布),它表明激光输出的远场光斑近似具有 TEM_{00} 模的空间分

布,图中实线代表理论值,圆点表示实验值。图 5 为激光输出最大功率下绿光的脉冲宽度图。

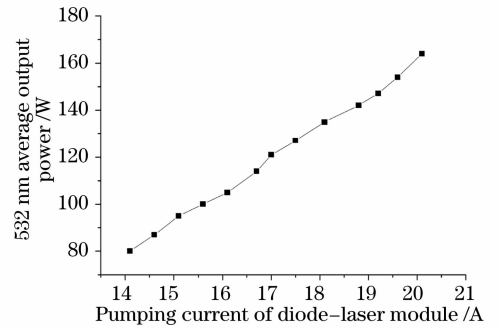


图 3 不同抽运电流下绿光输出功率

Fig. 3 532 nm output power at different pumping currents of laser diode

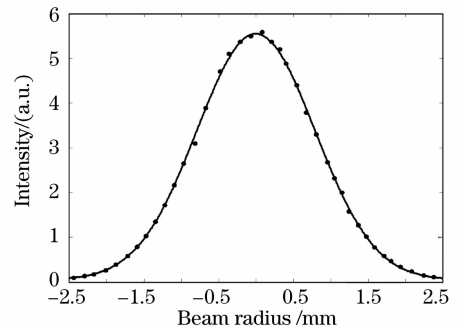


图 4 激光输出横向相对光强分布

Fig. 4 Horizontal relative intensity distribution of the output laser beam

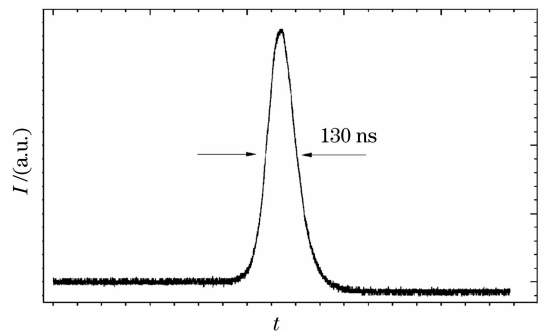


图 5 绿光脉宽图

Fig. 5 Pulse width of green laser

5 结 论

用石英旋转片补偿热致双折射,理论分析和实验研究表明,这种补偿方法能使径向和切向偏振方向上的光斑重复度变高,使激光二极管阵列侧面抽运双棒串接连续 Nd:YAG 绿光激光器在较宽的稳区范围内工作,为研究全固态绿光激光器提供了一条新的技术途径。

参 考 文 献

- 1 Sui Chen, Wenxiong Lin, Fei Shi *et al.*. Energy reduction: a technique for seed-injection locking of single-axial-mode Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 223~225
- 2 Ji Jianghua, Qi Yunfeng, Zhu Xiaolei *et al.*. High-power quasi-continuous-wave Nd:YAG ceramic laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 415~418
纪江华,漆云凤,朱小磊等. 大功率准连续 Nd:YAG 陶瓷激光器研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 415~418
- 3 Wang Nuanrang, Wang Canzhao, Yuan Ligang *et al.*. 138 W narrow pulse-width solid-state green laser operation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1017~1020
王暖让,王灿召,苑利钢等. 138 W 窄脉宽全固态绿光激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1017~1020
- 4 Qi Yunfeng, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. 10.5 W continuous-wave output from Yb:Y₂O₃ ceramic disk laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 797~798
漆云凤,楼祺洪,董景星等. Yb:Y₂O₃ 陶瓷薄片激光器获得 10.5 W 连续激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 797~798
- 5 Bi Yong, Sun Zhipei, Li Ruining *et al.*. High power blue Nd:YAG laser by intracavity summing frequency[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(1): 16~21
毕勇,孙志培,李瑞宁等. 高平均功率腔内和频蓝光 Nd:YAG 激光器[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 16~21
- 6 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effects[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~1429
- 7 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. 5th ed., Beijing: Science Press, 2002. 357~364
W. 克希奈尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 357~364
- 8 Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363
孙尧,李涛,于果蕾等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 359~363
- 9 Koji Yasui. Efficient and stable operation of a high-brightness cw 500-W Nd:YAG rod laser[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2566~2569
- 10 Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858
程小劲,牛金富,徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858
- 11 Yang Yongming, Wang Shiyu, Cai Defang *et al.*. Thermal effect of end deformation in laser diode end pumped Nd:YAG laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 582~586
杨永明,王石语,蔡德芳等. 激光二极管端面抽运 Nd:YAG 的端面形变[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 582~586