

双棒串接 Nd : YAG 激光器的稳区分析和实验研究*

张玉萍^{1,2,3}, 李喜福^{1,2}, 张会云³, 王鹏¹, 何志红⁴, 姚建铨¹

(1 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)

(2 天达激光技术开发有限公司, 天津 300384)

(3 山东科技大学 理学院, 山东 青岛 266510)

(4 电子科技大学 中山学院 电子工程系, 广东 中山 528402)

摘要:用传输矩阵法理论分析了在含热致双折射补偿和不含热致双折射补偿两种情况下, r 偏振和 ϕ 偏振对双棒串接激光器谐振腔稳区的影响. 选用低掺杂浓度的 Nd : YAG 棒, 实验上用含 90° 石英旋光片的双棒对称平行平面短腔获得了最佳实验结果. 1 064 nm 激光最高输出功率达 482.3 W, 对应光-光转换效率为 40.2%.

关键词:双棒串接; Nd : YAG 激光器; 传输矩阵法

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)06-1317-5

0 引言

为了获得输出功率达数百瓦乃至数千瓦量级、同时具有较好光束质量的激光输出, 常常采用以下两种技术^[1-4]: 一是多棒串接腔技术, 二是主振荡-功率放大 (Main Oscillation-Power Amplification, MOPA) 技术. 多棒串接腔实际上是光束相干合成的一种技术方案, 相当于增加了激光工作物质的长度, 在棒与棒之间可以插入光学元件, 通过合理设计谐振腔结构和激光工作物质的位置, 在一定程度上补偿了激光工作物质的热效应, 提高输出光束的质量. 多棒串接腔的主要优点是可以通过增加棒的数量成比例地增加输出功率(能量), 同时, 与单棒腔相比其激光输出光束质量几乎不变, 并且结构简单, 性价比高, 易于产品化. MOPA 技术是利用 LD 抽运的板条或圆棒放大器, 对高光束质量的振荡级输出进行放大, 可以在基本保持振荡级输出光束质量的基础上, 提高输出功率, 从而获得更高亮度的激光输出, 不足之处是激光器系统比较复杂, 造价比较昂贵.

V. R. Kushnir^[5]等第一次提出采用多棒串接腔技术可以增加输出功率, 同时保持好的光束质量. K. P. Driedger^[6]等人在基模动态稳定腔的基础上对双棒串接腔的特性进行了详细的理论分析. M. Kumkar 等^[7]研究了多棒激光器的光束质量、效率和输出功率的上限. Y. Hirano 等^[8]在 1 100 W 泵浦

功率下得到 208 W TEM₀₀ 模 1 064 nm 激光输出. Hyun Su Kim 等^[9]从理论上研究了激光器的稳定性和光束质量随腔内光学元件间的距离、孔径尺寸等的变化. 薄勇等^[10]研究了双棒串接准连续绿光激光器, 得到平均功率 258 W, 1 064 nm 准连续激光输出, 光-光转换效率 23.1%. Sungman Lee 等^[11]用两个 1 080 W 的侧面泵浦模块, 总功率 2 160 W, 实验得到最高 776 W, 1 064 nm 激光输出.

本文使用两个侧面泵浦激光头, 在用 90° 石英旋光片进行热致双折射补偿和无热致双折射补偿两种情况下, 用传输矩阵法分析了 r 偏振和 θ 偏振对谐振腔的影响. 在理论研究的指导下, 又从实验上进行验证, 实验结果与理论分析相吻合. 用含 90° 石英旋光片的双棒对称平行平面短腔获得了 482.3 W, 1 064 nm 激光, 对应光-光转换效率为 40.2%. 该光-光转换效率在同类侧面泵浦高功率激光器中处于领先水平.

1 激光器稳区理论分析

所采用泵浦组件由三个等间距的泵浦激光二极管阵列按照三角形等间距排列泵浦棒状 Nd : YAG 晶体. 为减轻热效应, 选用较低掺杂浓度的晶体棒, Nd 掺杂浓度为 0.8at%, 晶体棒的尺寸为 $\phi 4 \times 97$, 每一列泵浦激光二极管阵列额定功率 200 W, 每个泵浦组件总泵浦功率为 600 W.

为了对谐振腔稳区进行分析, 将 He-Ne 激光扩束, 分别测量了泵浦组件激射与非激射时与泵浦功率相对应的热焦距长度, 结果见图 1. 非激射时热透镜焦距倒数与泵浦功率 P_{in} 的关系式为 $1/f \approx 10.75P_{in} + 0.042$, 激射时热透镜焦距倒数与泵浦功率 P_{in} 的关系式为 $1/f \approx 8.42P_{in} + 0.0458$, 测量时

* 国家自然科学基金(60671036)和天津市重点攻关项目(013184011)资助

Tel: 022-27407676 Email: zhangyuping1976@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-12-12

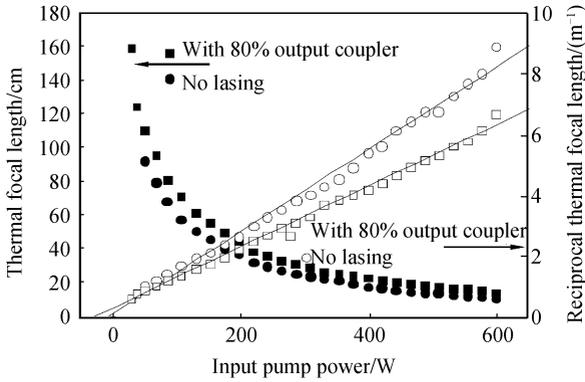


图1 泵浦组件在激射和非激射情况下,热焦距和光焦度与泵浦功率之间的关系
Fig.1 Thermal focal lengths and their reciprocal thermal focal lengths depending on the pump power at both lasing and nonlasing conditions

对应的输出耦合镜对 1 064 nm 激光的反射率为 80%。

采用两个同样型号的泵浦组件对双棒串接 Nd : YAG 激光器进行理论和实验研究. 图 2 是理论分析和实验采用的装置, 其中 d_R 是用于热致双折射补偿的 90° 石英旋光片.

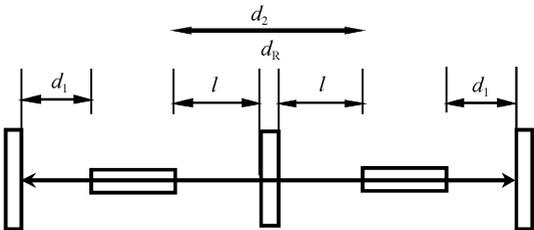


图2 实验装置
Fig.2 Experimental configuration

用传输矩阵法分析谐振腔的稳定条件, 考虑到激光工作物质的热透镜效应, 把激光棒看成类透镜介质, 其传输矩阵为^[11]

$$M_{r,\varphi} = \begin{pmatrix} \cos(\Gamma_{r,\varphi}L) & (n_0\Gamma_{r,\varphi})^{-1}\sin(\Gamma_{r,\varphi}L) \\ -(n_0\Gamma_{r,\varphi})^{-1}\sin(\Gamma_{r,\varphi}L) & \cos(\Gamma_{r,\varphi}L) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $\Gamma_{r,\varphi}$ 定义为 $\Gamma_{r,\varphi} = (\Delta n_{r,\varphi}/n_0)^{1/2}$, L 是棒长, n_0 是棒中心的折射率. $\Delta n_{r,\varphi}$ 为

$$\Delta n_{r,\varphi} = n_0 \frac{4\Delta T}{R^2} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\varphi} \right) \quad (2)$$

式中, R 是棒半径, dn/dT 是 Nd : YAG 折射率随温度的变化率, $C_{r,\varphi}$ 是 Nd : YAG 的法向和切向偏振光的弹光系数, ΔT 是棒中心到表面的温差, 与热焦距长度 $f_{r,\varphi}$ 有关, 可写为^[12]

$$\Delta T = \frac{A}{4\pi l} \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\varphi} \right) f_{r,\varphi}} \quad (3)$$

运用激光棒传输矩阵式(1), 激光束在腔内往返一次的往返传输矩阵 M_{tot} 为

$$M_{tot} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [d_1][M_r][l][d_R][l][M_\varphi] \cdot$$

$$[d_1][d_1][M_\varphi][l][d_R][l][M_r][d_1] \quad (4)$$

$[d_1]$ 是端镜与晶体棒近端距离 d_1 的传输矩阵, $[l]$ 是晶体棒和旋光片之间距离 l 的传输矩阵, $[d_R]$ 是长为 d_R 、折射率为 n_R 的旋光片的传输矩阵. 定义光束在两晶体棒之间的传输矩阵 $[d_2]$ 为

$$[d_2] = [l][d_R][l] = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_R/n_R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

从方程(4), 得出谐振腔的稳定条件为

$$-1 < (A+D)/2 < 1 \quad (6)$$

根据方程(6) 的稳定性条件, 双棒之间的距离 d_2 一定时, 以泵浦功率和 d_1 为坐标参量, 计算了双棒对称平行平面腔的稳区, 如图 3, 其中白色区域(1), (3), (5), (7)代表稳区, 黑色区域(2), (4), (6), (8)代表非稳区.

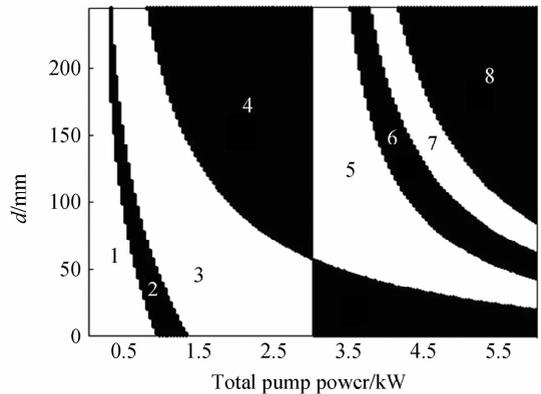


图3 含 90° 旋光片双棒串接对称平行腔的稳区 ($d_2 = 12$ cm)
Fig.3 Stability condition of symmetry plane-parallel resonator with two-rod in tandem with 90° rotator ($d_2 = 12$ cm)

图 3 的非稳区(2), 是由于插入 90° 旋光片进行补偿热致双折射时引起 r 偏振和 φ 偏振的热焦距长度不同引起的. 非稳区(4) 是由端镜到棒近端距离 d_1 引起的, 当端镜到棒近端距离 d_1 不等于激光棒之间的距离的一半时 ($d_2/2$) 会出现非稳区(4). 所以端镜到棒近端距离 d_1 应该等于 $d_2/2$, 以缩小非稳区(4) 的宽度.

当激光棒之间的距离 $d_2 = 12$ cm, 端镜到棒近端距离 d_1 在小于 6 cm 时, 从稳区图可以看出, 激光器可以稳定运行在稳区(3), 最大总泵浦功率可以达到 3 000 W. 当端镜到棒近端距离 d_1 大于 6 cm 时, 激光稳定输出受非稳区(4) 限制.

在激光棒之间的距离 (d_2) 增加时, 谐振腔的稳区会发生变化. 图 4 是晶体间距相对较长 (35 cm) 时的谐振腔稳区. 白色区域代表稳区, 黑色区域代表非稳区. 从图 4 可知, 主要的变化是: 上非稳区(4) 右侧向左缩进, 下非稳区(4) 左侧向左扩张, 因此在泵浦功率较低时谐振腔就到达非稳区(4). 只有端镜到棒近端距离为 $d_1 = d_2/2$ 的时候, 输入泵浦功率可以在

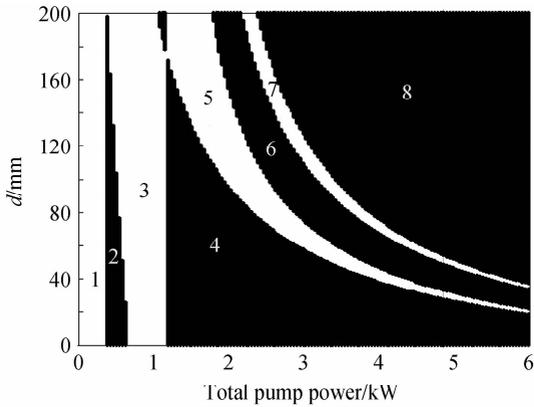


图4 含90°旋光片双棒串接对称平平腔的稳区($d_2=35\text{ cm}$)
 Fig. 4 Stability condition of symmetry plane-parallel resonator with two-rod in tandem with 90° rotator ($d_2=35\text{ cm}$)

宽的稳区内运行。

图5是两晶体棒间距离为12 cm、两棒中间不加旋光片的情况下的稳区图。区域(1)对 r 和 φ 都是稳区(第一稳区),区域(2)仅对 φ 偏振是稳区,区域(3)对 r 和 φ 偏振都是非稳区,区域(4)对仅对 r 偏振是稳区。区域(5)在 $g_1g_2=0$ 附近,对 r 偏振和 φ 偏振都是稳区,谐振腔处于近临界稳定状态。区域(6)是第二个对 r 偏振和 φ 偏振都是稳区(第二稳区),稳区(7)仅对 φ 偏振是稳区,区域(8)对 r 偏振和 φ 偏振都是非稳区。和图3相比,图5没有90°旋光片引起的非稳区。

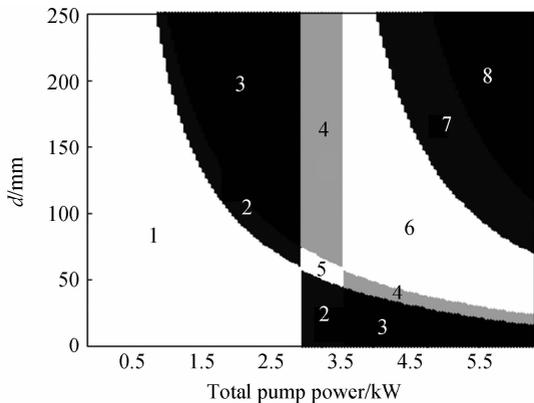


图5 不加旋光片双棒串接对称平平腔的稳区($d_2=12\text{ cm}$)
 Fig. 5 Stability condition of symmetry plane-parallel resonator with two-rod in tandem without 90° rotator ($d_2=12\text{ cm}$)

2 实验结果

在对激光器稳定条件分析模拟的指导下,进行了双棒串接、含90°石英旋光片和不含90°石英旋光片的平行平面腔激光器实验。当两晶体棒间距较小($d_2=12\text{ cm}$)时,在 d_1 不同的条件下,激光输出功率的变化如图6。在图6中,总泵浦功率是两个激光棒受到的泵浦功率之和,输出耦合镜的透过率为

30%。

对于 d_1 较短的情况($d_1=6\text{ cm}$,对应于 $d_2/2$),激光输出功率随总泵浦功率成比例稳定增加,只是在泵浦功率800 W附近出现小的波动,这与图3中非稳区(2)基本吻合。最大激光输出功率为482.3 W,按总泵浦功率1 200 W计算,光-光转换效率为40.2%。但在固定晶体间距12 cm条件下,当两个端镜到棒近端距离 d_1 同时等量增加时,激光输出功率在高输入泵浦功率时达到饱和。 $d_1=20\text{ cm}$ 时,总泵浦功率的饱和点在1 100 W; $d_1=23\text{ cm}$ 时,总泵浦功率的饱和点在1 000 W。可以看出实验测得的饱和点同计算出的稳区(图3)符合得较好。

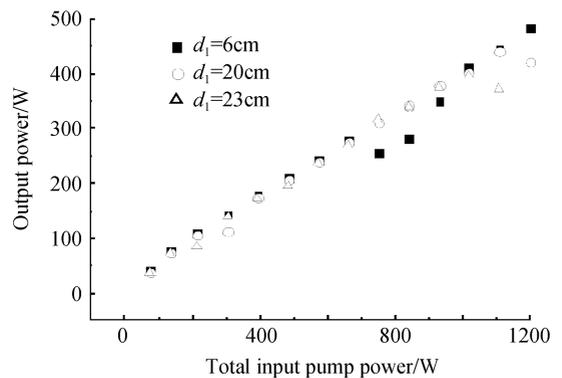


图6 不同腔长情况下1 064 nm输出功率与泵浦功率关系($d_2=12\text{ cm}, d_1=6\text{ cm}, 17\text{ cm}, 23\text{ cm}$)
 Fig. 6 Laser output power of 1 064 nm as a function of pump power ($d_2=12\text{ cm}, d_1=6\text{ cm}, 17\text{ cm}, 23\text{ cm}$)

由图3可知,对激光棒之间的距离(d_2)较小的情况,那么 $d_1=d_2/2$ 也较小,从而限制了腔长。对于含调Q开关和倍频器件的激光腔,为了达到高功率激光输出,腔长应较长。从图3可知,可以利用第三个稳区(5)达到这个条件。为了使腔长变长,充分利用谐振腔稳定条件避开非稳区(4),构建了一个 $d_1=d_2/2$ 的长腔长对称谐振腔。图7是 $d_2=22\text{ cm}, d_1=11\text{ cm}$ 时的平行平面腔实验结果,激光总泵浦功率

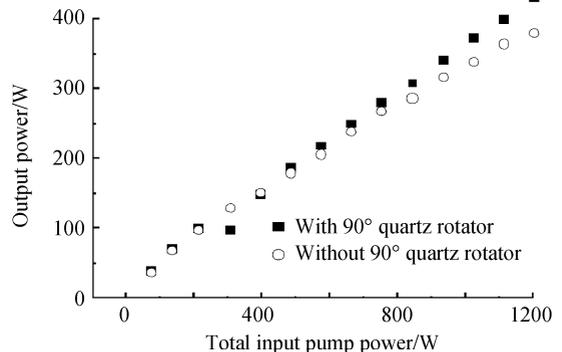


图7 1 064 nm输出功率与泵浦功率关系($d_2=22\text{ cm}, d_1=11\text{ cm}$)
 Fig. 7 Laser output power of 1064 nm as a function of pump power ($d_2=22\text{ cm}, d_1=11\text{ cm}$)

稳定增加到了 1 200 W,在非稳区(4)附近没有观察到任何功率下降.这证明了 $d_2=22\text{ cm}$, $d_1=d_2/2=11\text{ cm}$ 的对称谐振腔中激光可以稳定输出.同激光棒间距离 $d_2=12\text{ cm}$ 相比较,在相对较低的泵浦功率 250 W 处,观察到的小范围的输出功率下降,这是因为非稳区(2)在激光棒间距变大时移动到了低泵浦功率范围处.在图 7 中,还测出了没有 90° 旋光片时输出功率与泵浦功率的关系,在低泵浦功率时输出功率没有出现波动,结果与稳区图 5 相吻合.

图 8 是 $d_2=35\text{ cm}$, $d_1=17.5\text{ cm}$ 的对称平行平面腔 1 064 nm 激光输出功率与泵浦功率关系曲线图,与图 4 相吻合,由于非稳区(2)向低泵浦功率范围移动,所以在低泵浦功率时有一个小的范围内输出功率下降,其对激光输出功率的影响可以忽略不计.在总泵浦功率约为 1 100 W 时,即对应于非稳区(4)时,激光输出功率有所下降.究其原因,非稳区(4)附近的功率下降是由于激光功率稳定性对长谐振腔条件下机械和(或)热扰动的敏感程度增加引起的.

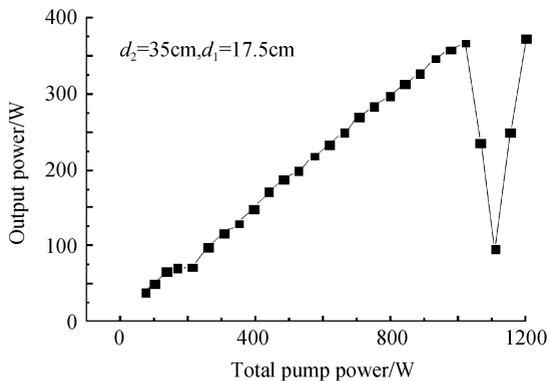


图 8 1 064 nm 输出功率与泵浦功率关系 ($d_2=35\text{ cm}$, $d_1=17.5\text{ cm}$)

Fig. 8 Laser output power of 1 064 nm as a function of pump power ($d_2=35\text{ cm}$, $d_1=17.5\text{ cm}$)

在泵浦功率为 1 000 W 时,测量了平平腔激光器的光子质量因子 M^2 ,如图 9,其中横坐标为 d_1 的

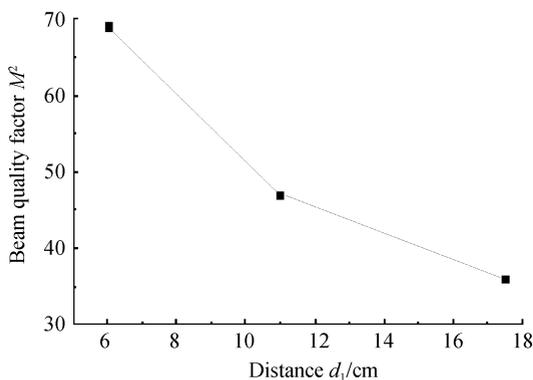


图 9 双棒串接对称平平腔激光器 M^2 光束质量因子与端镜到棒近端距离 d_1 的关系

Fig. 9 Dependence of the M^2 beam quality factor on the mirror distance (d_1) measured for symmetry plane-parallel resonator with two-rod in tandem

值,测量时 $d_2=2d_1$.从测量结果可知, M^2 的值随 d_1 的增大而减小,因此,在实际应用中,要同时考虑对输出功率和光束质量的要求来确定激光器的腔长.

3 结论

用传输矩阵法,通过稳区图分析了双棒对称和非对称平行平面腔结构.在分析稳定条件、 r 偏振和 φ 偏振模式尺寸的基础上,阐明了不同谐振腔内实现激光稳定运转的条件.又从理论上分析了有热致双折射补偿和无热致双折射补偿双棒串接腔中, r 偏振和 φ 偏振对谐振腔稳定条件的影响,得到了短腔和长腔情况下的稳区最大范围.实验研究结果与理论分析相一致,在双棒对称短腔情况下,获得了 482.3 W 的 1 064 nm 激光输出功率,光-光转换效率达到 40.2%.

参考文献

- [1] WAN Yun-fang, HAN Ke-zhen, ZUO Chun-hua, *et al.* An efficient diode-pumped Nd : YAG/LBO triple-frequency UV laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2182-2186.
万云芳,韩克祯,左春华,等.高效三倍频全固态 Nd : YAG/LBO 紫外激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2182-2186.
- [2] ZHU Xiao-wei, LI Ai-yun, YU Jin-tao, *et al.* A new configuration A-O Q-switch laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1726-1729.
朱筱玮,李爱云,于金涛,等.新型结构声光调 Q 激光器研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1726-1729.
- [3] LIN Hong-yi, TAN Hui-ming, NAN-nan, *et al.* LD end-pumped intracavity frequency doubled Yb : YAG green laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 22-25.
林洪沂,檀慧明,南楠,等. LD 端面泵浦腔内倍频 Yb : YAG 绿光激光器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 22-25.
- [4] ZHANG Hui-Yun, ZHENG Yi, ZHANG Yu-Ping, *et al.* High stability LD-pumped CW laser at 671 nm by intracavity-doubled Nd : YVO₄ Laser using LBO[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 769-772.
张会云,郑义,张玉萍,等.高稳定 LD 端面泵浦腔内倍频 Nd : YVO₄/LBO 连续红光激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 769-772.
- [5] KUSHNIR V R, NEMKOV A N, SHKUNOV N V. Influence of the resonator geometry on the output power of a laser with several active elements[J]. *Sov J Quantum Electron*, 1975, **5**(99): 713-715.
- [6] DRIEDGER K P, IFFANDER R M, WEBER H. Multirod resonators for high-power solid state lasers with improved beam quality[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, **24**(4): 665-675.
- [7] KUMKAR M, WEDEL B, RICHTER K. Beam quality and efficiency of high-average-power multirod lasers[J]. *Optics and Laser Technology*, 1992, **24**(22): 67-72.
- [8] HIRANO Y, KOYATA Y, YAMAMOTO S, *et al.* 208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd : YAG rod laser[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**(10): 679-681.

- [9] KIM H S, KIM J T, PARK J R. Stable range enhancement in a symmetric confocal two-rod resonator with 90° optical rotator [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, **39**(12): 1594-1599.
- [10] BO Yong, GENG Ai-cong, BI Yong, *et al.* High average power Q-switched quasi-continue-wave Nd : YAG laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1171-1175.
薄勇, 耿爱丛, 毕勇, 等. 高平均功率调 Q 准连续 Nd : YAG 激光器[J]. 物理学报, 2006, **55**(3): 1171-1175.
- [11] LEE S, YUN M, CHA B H, *et al.* Stability analysis of a diode-pumped, thermal birefringence-compensated two-rod Nd : YAG laser with 770 W output power [J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(27): 5625-5631.
- [12] TEEHAN R F, BIENFANG J C, DENMAN C A. Power scaling and frequency stabilization of an injection-locked Nd : YAG rod laser [J]. *Appl Opt*, 1981, **20**(23): 4124-4134.

Analysis in Stability Region and Experimental Research of Diode-side-pumped Two-rod Nd : YAG Laser

ZHANG Yu-ping^{1,2,3}, LI Xi-fu^{1,2}, ZHANG Hui-yun³, WANG Peng¹, HE Zhi-hong⁴, YAO Jian-quan¹

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

(2 Tianda Laser Technology Development Co., Ltd, Tianjin, 300384, China)

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

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

Received date: 2008-12-12

Abstract: Using a ray matrix method, the influences of r and θ polarization on the resonator stability condition of two laser heads in tandem with or without thermal birefringence compensation were theoretically analyzed. Optimal experimental result was obtained with a short plane-parallel resonator including two laser heads and with a 90° quartz rotator in between. 480 W laser output power was obtained with optical-to-optical efficiency of 40.2% for such a resonator.

Key words: Two laser heads in tandem; Nd : YAG laser; Matrix method



ZHANG Yu-ping was born in 1976. She received her Ph. D. degree in 2007 from Tianjin University. Now she is working at College of Science, Shandong University of Science and Technology. And she is also doing her enterprise postdoctorate research at Tianjin University. Her current research interest focuses on solid state lasers, nonlinear frequency conversion and THz technology.