

文章编号: 0258-7025(2010)10-2467-05

LD 侧面抽运双棒串接 Nd:YAG 激光腔的基模输出特性研究

董延涛¹ 赵智刚¹ 潘孙强¹ 刘崇^{1*} 毛谦敏² 项震¹ 陈军¹

(¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; ²中国计量学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 在高功率线偏振基模输出激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 激光腔中,热致双折射效应是影响线偏振基模输出功率的主要热效应。利用双棒串接结构,对热致双折射效应引起的退偏效应进行了有效的补偿。在分析谐振腔参数对激光器性能影响的基础上,通过优化设计,在实验中得到了 35 W 的线偏振基模输出。

关键词 激光器;基模;热致双折射;退偏补偿;双棒串接

中图分类号 TN241.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2467

Investigation of the TEM₀₀-Mode Output Character from LD Side-Pumped Two Nd:YAG Rods in Laser Resonator

Dong Yantao¹ Zhao Zhigang¹ Pan Sunqiang¹ Liu Chong¹ Mao Qianmin²
Xiang Zhen¹ Chen Jun¹

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China
² China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract In high power polarized TEM₀₀-mode laser diode (LD) side-pumped Nd:YAG laser resonator, thermal birefringence is the main factor influencing the output power of the polarized TEM₀₀-mode. By using the construction of two Nd:YAG rods in laser resonator, depolarization effects caused by thermal birefringence have been compensated effectively. After analyzing the influences of the resonator parameters on the laser output performance and optimizing the laser resonator, 35 W polarized TEM₀₀-mode output power is obtained.

Key words lasers; TEM₀₀-mode; thermal birefringence; depolarization compensation; two-rod

1 引 言

激光器的大功率线偏振基模输出特性是固体激光领域的研究热点之一。近年来随着激光技术的发展,线偏振激光在医学成像、海洋探测和大气激光雷达等领域得到了越来越多的应用^[1~3]。在固体激光倍频技术中,基频激光的偏振特性会严重影响倍频效率^[4~7]。激光二极管(LD)侧面抽运激光器具有

运行重复频率高、结构简单、稳定性好以及能够实现高功率激光输出等显著优点^[8~11],已得到广泛的应用。在 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器中加入偏振元件可实现线偏振输出。然而在大功率抽运下, Nd:YAG 晶体会产生严重的热致双折射效应,成为限制输出功率的主要因素。当偏振光通过具有热致双折射效应的晶体时,会产生严重的退偏效应,通过

收稿日期: 2010-04-12; 收到修改稿日期: 2010-05-06

基金项目: 浙江省重大专项项目(2009C14036)资助课题。

作者简介: 董延涛(1984—),男,博士研究生,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。

E-mail: dongyantao84@163.com

导师简介: 陈军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chongliu78@hotmail.com

偏振元件时会产生较大损耗,不利于线偏振激光输出。由于热致双折射效应会使腔内沿径向偏振的光和沿切向偏振的光具有不同的热焦距,同时也具有不同的稳定区范围。又因为只有在径向偏振和切向偏振稳定区重合部分才能获得基模输出^[12],这样使得基模体积变小,限制了基模输出功率的提高。所以为了获得大功率的线偏振基模输出,必须对热致双折射效应进行补偿。

本文通过研究 LD 侧面抽运双棒串接 Nd:YAG 激光的输出特性,利用在腔内加入偏振元件,实现线偏振输出。由于使用相同的激光棒串接,并在其中加入 $4f$ 成像系统和 90° 石英旋光器,使得热致双折射效应得到了有效的补偿。通过对谐振腔的优化,得到了 35 W 的线偏振基模输出。

2 热致双折射效应补偿原理

Nd:YAG 晶体在光抽运和光激励过程中产生的热梯度造成了热应变,通过晶体中的弹光效应改变了晶体的折射率。与晶体固有的双折射现象不同的是,热致双折射效应由于应力分布的不均匀性,一方面造成晶体内部径向和切向的折射率改变量不同,另一方面造成不同位置的折射率改变量不同,使得双折射特性也各不相同,也就是说,这是一种非均匀分布的双折射特性。文献^[13]对热致双折射效应及其对激光器的影响进行了详细的分析。常用的热

致双折射补偿方法如图 1 所示。将两个热致双折射效应相近的 Nd:YAG 棒串联,并在中间放入 90° 石英旋光器,使第一支棒中的径向偏振光转过 90° 成为第二支棒中的切向分量,而切向分量则旋转成为径向分量。同时加入 $4f$ 系统,使第一个激光棒的光束在第二个激光棒中成像,以便使光线尽量在两棒中传播区域相同。当两棒中热致双折射效应相同时,可使两个分量在两个晶体棒中产生的相位差相互抵消,从而消除退偏效应。

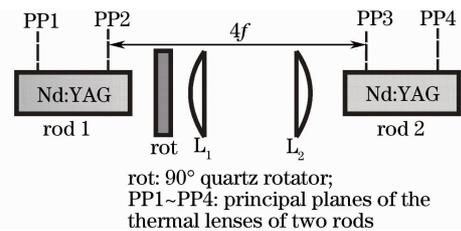


图 1 热致双折射效应补偿原理图

Fig. 1 Schematic of birefringence compensation with two rods

3 谐振腔的优化设计

为了获得稳定的大功率基模输出,需要对谐振腔进行设计,优化谐振腔参数。实验中采取非对称腔结构,如图 2 所示。其中 d_1 为输出镜(OC)到晶体棒 rod 1 热透镜前主平面 PP1 的距离, d_2 为全反射镜(HR)到棒 rod 2 热透镜后主平面 PP4 的距离。且 $d_1 \gg d_2$ 。

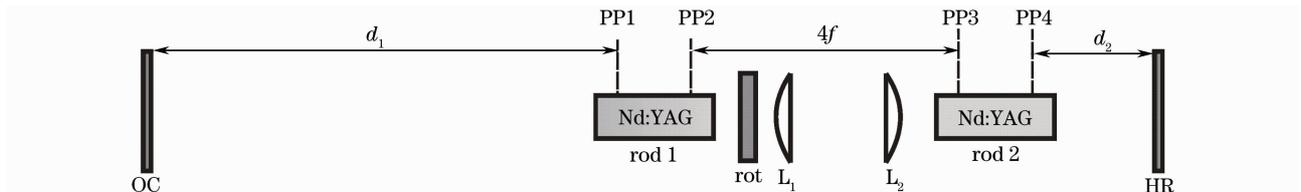


图 2 双棒串接谐振腔示意图

Fig. 2 Schematic of resonator with two rods

理论研究表明^[14],当两个晶体棒的热焦距相同时,可以将两个晶体棒的热透镜和 $4f$ 系统等效为一个薄透镜,等效透镜焦距为热透镜焦距的一半。则图 2 可以等效为如图 3 所示的谐振腔,其中 L' 为等效透镜。

基模光束半径和谐振腔的工作点是影响谐振腔性能的两个主要参数。等效腔的热透镜处基模光束半径 ω_0 可以表示为^[15]

$$\omega_0 = (2\lambda/\pi) \max(|u'_1|, |u'_2|), \quad (1)$$

在等效腔中有

$$u'_1 = d_1, u'_2 = d_2. \quad (2)$$

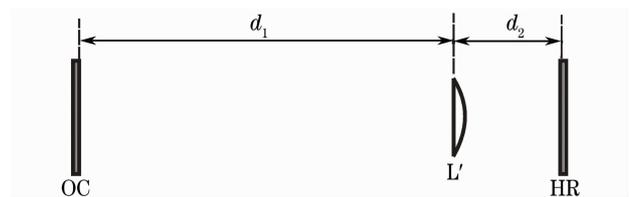


图 3 等效谐振腔示意图

Fig. 3 Schematic of equivalent resonator

由(1),(2)式可知,基模光束半径 ω_0 与长臂 d_1 有关。改变 d_1 大小,可以改变腔内的基模体积,并通过晶体的自孔径选模或者加入小孔选模得到基模激光输出。

为了保证谐振腔的机械稳定度,需要两腔镜在工作点上由热透镜相互成像^[15],条件为

$$1/f_{\min} = 1/d_1 + 1/d_2, \quad (3)$$

式中 f_{\min} 是在工作点上等效热透镜的焦距。在 $d_1 \gg d_2$ 的条件下, f_{\min} 的取值主要受 d_2 的影响。也就是 d_2 决定了激光器的工作点。通过改变 d_2 的大小,可以使激光器稳定工作在较高的抽运功率下,从而得到较大的激光输出。

4 实验研究

实验中采用两个 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 棒状晶体模块作为激光介质。晶体尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$, 掺杂原子数分数为 0.6%。用谐振腔稳定性法^[16]分别测量两个晶体棒在不同抽运下的热焦距,如图 4 所示。两棒在相同抽运电流下,热焦距几乎相同。两棒的热效应非常相近,这对热致双折射的补偿十分有利。

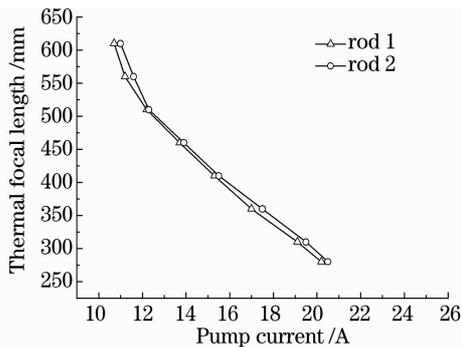


图 4 热焦距与抽运电流的关系

Fig. 4 Thermal focal length versus pump current

单个晶体棒的输出功率如图 5 所示,测量条件是谐振腔为短平-平腔,腔长 170 mm,输出镜反射率 80%。在相同抽运电流情况下,两棒的输出功率几乎相同。当抽运电流为 20 A 时,单个晶体棒可以输出 68 W 的多模激光。

两棒串接后加入与未加入 4f 系统及旋光片的

输出功率也在图 5 中给出。测量时谐振腔与图 2 装置类似,采用短平-平腔,腔长 350 mm。输出镜反射率为 60%。由图可见 4f 系统和石英旋光片的插入损耗对输出功率影响很小。

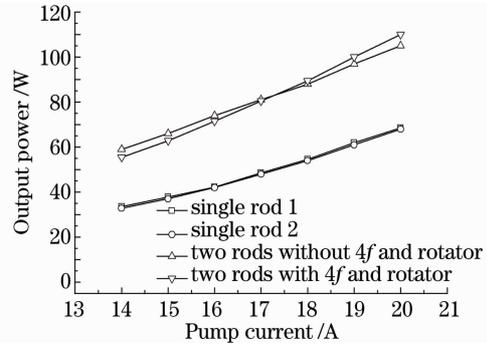


图 5 输出功率与抽运电流的关系

Fig. 5 Output power versus pump current

激光器整体实验装置如图 6 所示,谐振腔采用双棒串接,平-平非对称腔结构。输出镜反射率为 60%。两个焦距均为 50 mm 的透镜组成 4f 系统,并在其中加入了一个 90° 石英旋光器。谐振腔两臂 $d_1 = 860 \text{ mm}$, $d_2 = 250 \text{ mm}$ 。腔内加入了布儒斯特角放置的偏振片,以得到线偏振输出,同时又可以检验补偿退偏效果。腔内光束的退偏率 η_{dep} 可以表示为^[17]

$$\eta_{\text{dep}} = \frac{P_{\text{dep}}}{P_i} = \frac{P_{\text{dep}}}{P_{\text{out}}/T_{\text{oc}} + P_{\text{dep}}}, \quad (4)$$

式中 P_{dep} 表示被偏振片反射至腔外的退偏振光的功率, P_{out} 为输出功率, P_i 表示偏振片处的功率, T_{oc} 是输出镜透射率。利用矩阵光学的方法计算得到的腔内基模光束半径如图 6 下半部分所示。可见在激光晶体处有较大的基模光束半径,易于实现大功率基模输出。为了稳定输出模式,在腔内靠近全反镜的一端加入了小孔光阑。小孔直径 1.2 mm, 距离全反镜 92 mm。

在连续输出状态下,激光器线偏振基模输出功率、退偏功率和退偏率如图 7 所示。

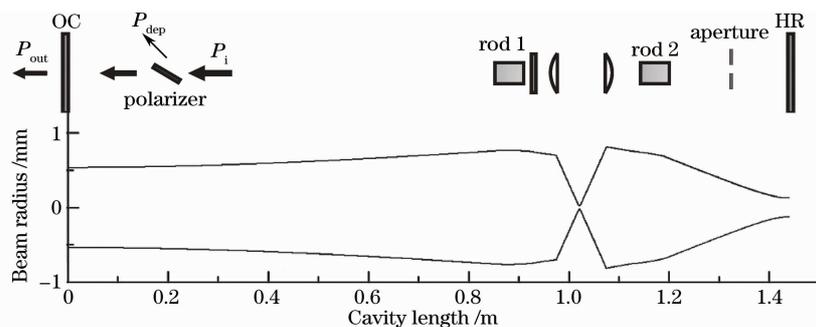


图 6 线偏振基模输出激光器示意图

Fig. 6 Schematic of polarized TEM₀₀-mode laser

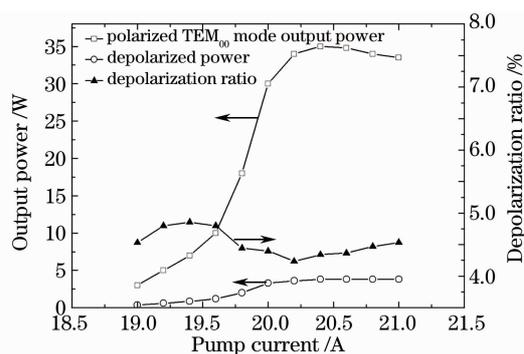


图7 激光器输出功率、腔内退偏光功率和光束退偏率随抽运电流的变化

Fig. 7 Output power, depolarized power and depolarization ratio versus pump current

由图7可以看出,激光器可以在较大抽运范围内保持稳定工作。同时激光器退偏率保持在5%以下,对热致双折射效应的补偿效果十分理想。通过补偿热效应和优化谐振腔参数,在LD输出的抽运光总功率为398 W时,得到了35 W的线偏振基模连续激光输出,光-光转换效率为8.8%,偏振度大于100:1,此时的输出光斑如图8所示。用刀口法测得光束质量 $M^2=1.2$,远场发散角 $\theta=0.378$ mrad。

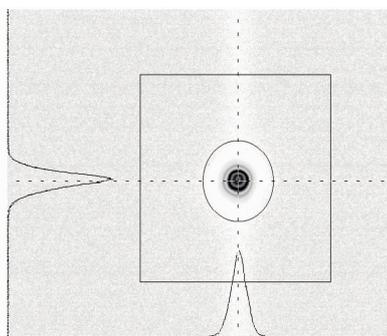


图8 输出光束光强分布图

Fig. 8 Intensity pattern of output laser beam

在腔内加入声光调Q开关。声光Q开关为GOOCH & HOUSEGO公司生产的熔石英Q开关,通光方向长度为10 mm。在脉冲输出状态下,平均输出功率和脉冲宽度随脉冲频率变化如图9所示。

5 结 论

热致双折射不仅使谐振腔损耗增加,而且使基模体积变小,导致增益介质中的大部分能量都被浪费,是固体激光器中影响最严重的热效应。设计了一种LD侧面抽运双棒串接高功率线偏振基模激光器。利用LD侧面抽运2根特性几乎相同的Nd:YAG晶体棒,通过4f成像系统和石英旋光器,对热致双折射效应进行了有效补偿,退偏率保持在

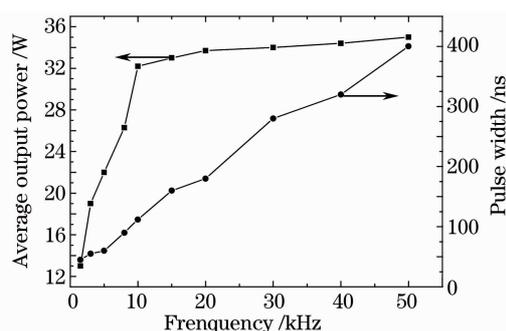


图9 平均输出功率和脉冲宽度随脉冲频率的变化

Fig. 9 Average output power and pulse width versus frequency

5%以下。实验中通过谐振腔的优化设计,得到了35 W线偏振基模激光输出。

参 考 文 献

- 1 M. P. Rowe, E. N. Pugh, J. S. Tyo *et al.*. Polarization-difference imaging[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 608~610
- 2 S. R. Pal, A. Carswell. Polarization anisotropy in lidar multiple scattering from atmospheric clouds [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(21): 3464~3471
- 3 Wang Haiyan, Yang Yanwu, An Yuying. The usage of polarity character of underwater laser beam in target image detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 11~13
王海晏, 杨延梧, 安毓英. 激光水下偏振特性用于目标图像探测[J]. *光子学报*, 2003, **32**(1): 11~13
- 4 Jeffrey W. Pierce, Raymond G. Beausoleil. High efficiency fourth harmonic generation[C]. *SPIE*, 1995, **2379**: 265~281
- 5 Li Fengqin, Yu Lin, Shen Yumei *et al.*. All-solid-state CW 12.9 W TEM₀₀ mode green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1332~1336
李凤琴, 于琳, 申玉梅等. 输出功率12.9 W的全固态连续TEM₀₀模绿光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1332~1336
- 6 Yao Yi, Qu Dapeng, Zheng Quan. Laser diode-pumped Nd:YVO₄/LBO 543 nm all-solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1740~1743
姚奕, 曲大鹏, 郑权. LD抽运Nd:YVO₄/LBO 543 nm全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1740~1743
- 7 Hu Ailan, Guo Qiang, Wu Bian *et al.*. LD pumped 355-nm quasi-CW ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1810~1814
胡爱兰, 郭强, 吴边等. LD抽运355 nm准连续紫外激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1810~1814
- 8 Liu Yuan, Fang Gaozhan, Wang Xiaowei. Laser diode side-pumped CW Nd:YAG laser [J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(4): 240~242
刘媛, 方高瞻, 王小薇. 侧面泵浦Nd:YAG连续激光器[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(4): 240~242
- 9 Li Qiang, Cai Yanfang, Jiang Menghua *et al.*. Laser diode array side pumped Nd:YAG thin disk laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1793~1797
李强, 蔡艳芳, 姜梦华等. 激光二极管侧面抽运的Nd:YAG薄片激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1793~1797
- 10 He Jingliang, Wang Ruihua, Huang Haitao *et al.*. Efficiency and high power all-solid-state 1.5 μm intracavity optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1789~1792
何京良, 王瑞华, 黄海涛等. 高效大功率全固态1.5 μm 腔内光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1789~1792
- 11 Tang Hao, Zhu Xiaolei, Jiang Benxue *et al.*. Laser-diode-array

- side pumped Nd:YAG ceramic laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2001~2004
- 唐 昊, 朱小磊, 姜本学 等. 侧面抽运国产 Nd:YAG 陶瓷棒的激光特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2001~2004
- 12 H. J. Eichler, R. M. Haase, Ralf Menzel *et al.*. Thermal lensing and depolarization in a highly pumped Nd:YAG laser amplifier[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**(11): 1884~1891
- 13 Dong Yantao, Zhao Zhigang, Liu Chong *et al.*. Influence of thermal effects on polarizability and output character of TEM₀₀-mode of solid state laser[J]. *Chinese J. lasers*, 2009, **36**(7): 1759~1765
- 董延涛, 赵智刚, 刘 崇 等. 热效应对固体激光器偏振特性和基模输出特性的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1759~1765
- 14 Q. Lü, N. Kugler, H. Weber *et al.*. A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1996, **28**(1): 57~69
- 15 R. Hua, S. Wada, H. Tashiro. Versatile, compact, TEM₀₀-mode resonator for side-pumped single-rod solid-state lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(15): 2468~2474
- 16 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 225~226
- 姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率转换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 225~226
- 17 Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd:YAG rods [J]. *Chinese J. lasers*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- 刘 崇, 葛剑虹, 项 震 等. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1483~1487