

文章编号: 0258-7025(2005)01-0013-03

# 连续波 500 W 全固态 Nd:YAG 激光器研究

胡春华<sup>1,3</sup>, 毕 勇<sup>1</sup>, 孙志培<sup>1</sup>, 李瑞宁<sup>1</sup>, 许祖彦<sup>1</sup>, 方高瞻<sup>2</sup>, 马晓宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院物理研究所, 北京 100080;  
<sup>2</sup> 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; <sup>3</sup> 北京交通大学理学院物理系, 北京 100044

**摘要** 研制了全国产化全固态半导体激光器(LD)抽运模块, Nd:YAG 激光输出功率达 500 W。介绍了优化抽运模块结构参数的程度。从增益分布特性等方面, 介绍了研究其输入-输出功率特性的实验装置, 随着抽运功率的增加, Nd:YAG 激光输出以斜率效率 47% 线性增加, 最大输出功率达到 575 W, 光-光转换效率达 26.1%。采用 He-Ne 激光探测法实验测量了该抽运模块中的热透镜效应。通过测量热焦距, 分析了其热透镜效应: 热透镜焦距与抽运功率成反比, 抽运功率很小时, 热焦距大, 热透镜效应很小, 被 Nd:YAG 棒的修凹面补偿, 所以此时热焦距较大, 热效应不显著。随着抽运功率的增大, 热焦距减小, 热透镜效应越来越显著。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器抽运; 输入-输出功率; 增益分布; 热透镜效应

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Laser-Diode Pumped 500 W Continuous-Wave Nd:YAG Laser

HU Chun-hua<sup>1,3</sup>, BI Yong<sup>1</sup>, SUN Zhi-pei<sup>1</sup>, LI Rui-ning<sup>1</sup>,  
XU Zu-yan<sup>1</sup>, FANG Gao-zhan<sup>2</sup>, MA Xiao-yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
<sup>2</sup> Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China  
<sup>3</sup> School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** The output power of homemade all-solid-state laser-diode (LD) pumped Nd:YAG laser above 500 W has been demonstrated in this paper. Experimental setup and the properties of its input-output power were introduced. From the point of gain distribution, the configuration of the LD-pumped laser was optimized. The maximum output power of the Nd:YAG laser was about 575 W. The output power was increased linearly with the pump power at the slope efficiency of 47% above the threshold. The optical-to-optical efficiency of 26.1% was obtained. Through He-Ne laser probe method, the thermal lens effects of the LD-pumped laser were measured. The focal length of thermal lens was measured and compared with the theory. When the pump power was increased, the focal length was decreased, and a kind of means to effectively compensate the thermal lens effects was used in the experiment.

**Key words** laser technique; LD-pumped laser; input-output power; gain distribution; thermal lens effects

## 1 引 言

高平均功率(>1 kW)固体激光器在工业加工及军事领域有着广阔的应用前景。特别是半导体激光器(LD)抽运的固体激光器, 由于效率高, 热效应小, 寿命长, 无污染及与传统灯抽运相比具有小型

化、牢固、稳定、快速反应等优点, 已成为高能固体激光器发展的主要方向<sup>[1~6]</sup>。

目前国际上半导体激光器抽运模块已商品化, 在部分行业已逐渐取代传统灯抽运激光器。德国、美国汽车焊接已用到千瓦级二极管激光器抽运全固态激光焊接机。美国 CEO 公司已有 750 W 的 1064

收稿日期: 2003-09-03; 收到修改稿日期: 2003-12-23

基金项目: 中国科学院创新工程二期先期启动方向性项目(KGCX2-SWJG-02)资助课题。

作者简介: 胡春华(1978—), 女, 山东人, 硕士研究生, 目前主要研究大功率高光束质量全固态激光的产生技术。E-mail: huchunhua1978@163.com

nm 激光头模块面市。而国内起步较晚,产品级抽运模块仅达百瓦级。

本文报道了用国产半导体激光器抽运实现 500 W 级全固态激光器,最大输出功率 575 W,以此为基础,有望使全固态激光输出功率达到千瓦级。

## 2 实验装置

半导体激光器抽运模块是指将多个半导体激光器或半导体激光器阵列做成组件模块与激光晶体配合,装成套件。它既可以在腔内作为激光器增益模块,也可以放在高功率主振荡器-功率放大器(MOPA)系统中作为放大增益模块,是半导体激光抽运激光器(DPL)的核心部件。抽运模块结构设计中,为达到 LD 抽运 Nd:YAG 高功率激光输出的目标,首先要解决的重要问题之一是优化抽运模块结构参数,以获得实验所需的抽运功率密度和增益分布。

实验中优化抽运模块结构参数的程度是:1) 优化国产化全固态半导体激光器抽运模块,使 Nd:YAG 激光输出功率达 500 W,即达到大抽运功率;2) 实现了高效散热;3) 能量提取效率高。

增益分布的不均匀性,将使激光光束在谐振过程中产生严重的畸变,导致输出激光光束质量下降<sup>[7]</sup>。为了在激光介质内得到更好的增益分布特性,使激光介质中心区域增益高,增益分布沿激光介质径向变化的趋势更明显,更好地与激光谐振腔低阶模匹配,采用了如图 1 所示的 10 围抽运。

图 1 采用侧面抽运结构,用 110 个 20 W 半导体激光器,每只半导体激光二极管快、慢轴发散角分别为  $40^\circ$  和  $10^\circ$ ,中心波长为 808 nm,综合谱线宽度大约 5 nm,组成 10 个阵列,构成 10 围结构,每围间隔  $36^\circ$ ,均匀对称地排列在圆柱形的增益介质 Nd:YAG 周围。激光二极管通过水冷热沉散热,发光面精密对准排列,发射面离 YAG 水冷石英管距离小于 1 mm。110 只半导体激光二极管输出直接耦合到直径为 7 mm 的 Nd:YAG 激光晶体内,最大抽运功率密度约为  $110 \text{ W/cm}^2$ ,对应稳态贮能  $0.16 \text{ J/cm}^3$ 。

实验进行了连续波 Nd:YAG 激光输出测试,以研究半导体激光器抽运模块的输入-输出功率特性。实验测试装置如图 2 所示。

Nd:YAG 晶体棒直径 7 mm,长 180 mm,掺杂原子数分数  $x(\text{Nd}^{3+}) = 0.66\%$ 。采用平平腔,腔长

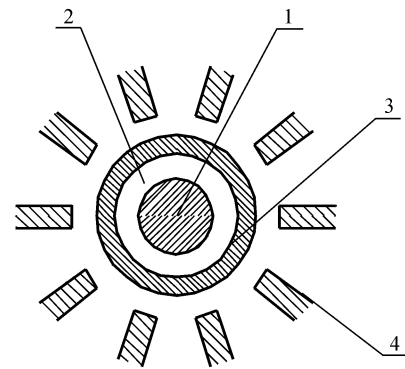


图 1 半导体激光器抽运模块示意图

1: Nd:YAG 棒; 2: 冷却水; 3: 石英管; 4: 激光二极管阵列

Fig. 1 Schematic of pumping configuration

1: Nd:YAG rod; 2: cooling water; 3: quartz tube; 4: diode laser array

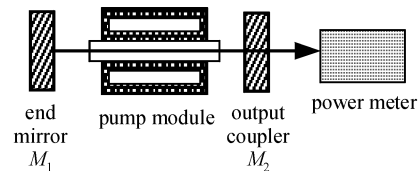


图 2 实验测试装置

Fig. 2 The schematic of experimental setup

300 mm。为了减小热透镜效应, Nd:YAG 棒两端面采用修凹面, 曲面半径 0.5 m, 从而补偿部分热透镜效应。后腔镜  $M_1$  镀 1064 nm 波段的高反膜, 反射率大于 99.8%, 耦合输出镜  $M_2$  镀 1064 nm 波段部分反射膜, 反射率为 70%。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 功率输入-输出关系及光-光转换效率

通过调节激光二极管驱动电流大小, 改变抽运功率, 从而获得了最大连续波输出功率为 575 W。图 3 给出了 Nd:YAG 1064 nm 激光输出功率与半导体激光器抽运功率的关系。当抽运功率达到阈值功率 990 W 时, Nd:YAG 晶体的热透镜效应补偿了晶体端面的影响, 激光振荡形成, 输出功率 69 W。随着抽运功率的增加, Nd:YAG 激光输出以斜率效率 47% 线性增加, 最大输出功率达到 575 W, 光-光转换效率 26.1%。图 3 中曲线是其拟合结果, 光-光转换效率拟合曲线上端由于存在激光阈值  $P_{th}$ , 根据公式  $P_{out}/(P_{th} + P_{out}/k)$ , 出现了平缓下降趋势。

最大输出功率情况下, 采用移动刀口法<sup>[8]</sup>与双曲线拟合法测量了 575 W 输出的光束质量,  $M^2 = 25$ 。

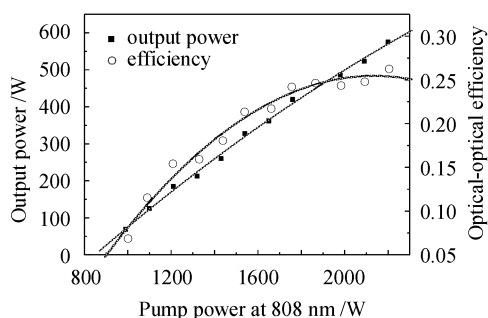


图 3 输出功率、光-光转换效率与抽运功率的关系曲线

Fig. 3 Output power and optical-to-optical efficiency versus pump power of diode pumped laser

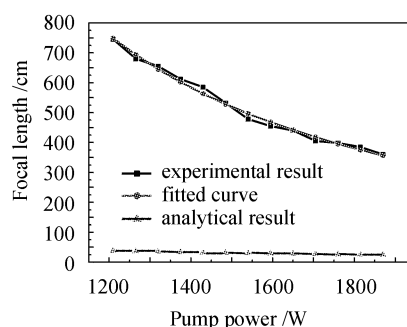


图 4 热透镜焦距与抽运功率的关系曲线

Fig. 4 Focal length versus the input pump power of diode pumped laser

### 3.2 热透镜和热焦距

对于二极管激光器抽运的固体激光器来说,高效率的抽运过程极大地减少了激光介质吸收的热量。然而随着抽运功率的增加,激光介质内热积累效应依然严重,热效应仍是制约其发展的重要因素。激光晶体因吸收了抽运辐射而发热,而散热又要求对其表面进行冷却,从而使激光晶体内部产生不均匀的温度分布。由于温度和应力的改变使折射率发生变化,而导致激光束的畸变,因此热会使晶体产生热像差、热透镜效应,以及热致双折射,严重影响激光输出效率和激光光束质量。为此,采用 He-Ne 激光探测法实验测量了该抽运模块中的热透镜效应。

图 4 为实验测得热透镜焦距与抽运功率的关系曲线,实线是其拟合曲线。根据文献[9]可知,热焦距的计算式为

$$f = \frac{KA}{P_a} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,s} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1},$$

式中  $A$  为棒的截面,  $P_a$  为棒耗散的总热量。由于与温度有关的折射率变化是形成热透镜效应的主要因素,所以可将公式右边两项忽略。取相应参数,最后得到理论曲线。由图 4 可明显看到,理论计算曲线与实验所测得的数据曲线相比,实验所测得热透镜效应比理论计算的热透镜效应显著减小,这主要是由于激光晶体棒端面修成凹面,所以降低了热透镜效应,体现了抽运结构的优化。热透镜焦距与抽运功率成反比,由图看出,抽运功率很小时,热焦距大,热透镜效应很小,由于 Nd:YAG 棒修凹面补偿,所以此时热焦距较大,热效应不显著。随着抽运功率的增大,热焦距减小,热透镜效应越来越显著,修凹面不足以抵消热透镜效应。当抽运功率增到 1870 W 时,热焦距降为 320 mm,热效应已很显著。

## 4 结 论

介绍了输出功率达 500 W 的全国产化固态激光器,分析了实验测得的功率输入-输出特性及其热透镜效应。目前这样的半导体激光器模块抽运的固态激光器已研制出 2 台,进一步提高输出功率,有望达到千瓦级。目前其光-光转换效率最大为 26.1% 左右,原因可能在于抽运光线宽大于 Nd:YAG 主吸收峰带宽。鉴于高功率半导体激光器抽运源谱线展宽特性与全固态激光光束质量对大功率全固态激光系统性能影响的重要性,下一步工作将对抽运光线宽对输出功率的影响和光束质量的改善进行研究。

### 参 考 文 献

- 1 D. L. Yu, D. Y. Tang. Experimental study of a high-power CW side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(1):37~42
- 2 D. Golla, M. Bode, S. Knoke *et al.*. 62-W CW TEM<sub>00</sub> Nd:YAG laser side-pumped by fiber-coupled diode lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3):210~212
- 3 H. Zhang, X. Meng, P. Wang *et al.*. Slope efficiency of up to 73% for Yb:Ca<sub>4</sub>YO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> crystal laser pumped by a laser diode [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(6):1147~1149
- 4 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2):65~67
- 5 T. M. Baer, D. F. Head, P. Gooding *et al.*. Performance of diode-pumped Nd:YAG and Nd:YAF lasers in a tightly folded resonator configuration [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1131~1138
- 6 A. J. Alcock, J. E. Bernard. Diode-pumped grazing incidence slab lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1):3~8
- 7 Zhao Hong, Gao Fulai, Liang Feng *et al.*. The effects of gain distribution in working medium on character of laser [J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(4):250~252
- 8 赵 鸿,高福来,梁 峰等. 工作物质内增益分布特性对激光器性能的影响[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(4):250~252
- 9 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers [M]. Beijing, National Defence Industry Press, 1999. 74~75
- 10 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1999. 74~75
- 11 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 363~366
- 12 W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. 363~366