

文章编号: 0258-7025(2005)04-0457-04

## 激光二极管抽运 Nd:YAG 双薄片激光器

姚震宇<sup>1,2</sup>, 吕百达<sup>1</sup>, 蒋建锋<sup>2</sup>, 涂波<sup>2</sup>, 唐淳<sup>2</sup>, 武德勇<sup>2</sup>, 童立新<sup>2</sup>, 周唐建<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 激光介质的热效应是高平均功率固体激光器面临的巨大挑战, 采用薄片激光介质是解决热效应的有效手段之一。当在抽运区尺寸远大于薄片厚度并且抽运光均匀分布的条件下, 热流近似为沿厚度方向的一维分布, 从而大大降低介质的热透镜效应和热致应力双折射。设计了四通光学耦合系统, 通过提高二极管激光器阵列输出激光强度分布的均匀性, 并优化经微柱透镜准直后光束的发散角, 实现了抽运光的近平顶分布。采用两片 1 mm 厚的 Nd:YAG 薄片激光介质, 在两个峰值功率 2000 W, 占空比为 15% 的二极管激光器阵列抽运下, 获得了峰值功率 1440 W, 平均功率 216 W 的准连续激光输出, 光-光转换效率达到 36%, 电-光转换效率超过 16%, 在稳腔下测得的光束质量  $M^2$  因子约为  $12 \times 13$ 。

**关键词** 激光技术; 薄片激光器; 激光二极管抽运; 抽运光近平顶分布

**中图分类号** TN248.1      **文献标识码** A

## Laser Diode-Pumped Nd:YAG Double-Disk Laser

YAO Zhen-yu<sup>1,2</sup>, LÜ Bai-da<sup>1</sup>, JIANG Jian-feng<sup>2</sup>, TU Bo<sup>2</sup>, TANG Chun<sup>2</sup>,  
WU De-yong<sup>2</sup>, TONG Li-xin<sup>2</sup>, ZHOU Tang-jian<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China  
<sup>2</sup> Institute of Applied Electronics, China Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The key challenge for developing high-average power solid-state lasers is thermomechanical distortions caused by waste heat deposited in the gain medium by optical pumping. If a thin laser crystal disk is used with a nearly flat-top pump profile, the heat flux can be considered to be one-dimensional. Thermal lensing and stress-induced birefringence are dramatically reduced. A nearly flat top pump profile is achieved with a good design for the four-pass optical coupling system. An average output power of 216 W is obtained from two disks with a thickness of 1 mm. The peak power of each diode array is 2000 W with 15% duty cycle. The optical-to-optical conversion efficiency of the laser system is about 36% and the electrical-to-optical conversion efficiency is more than 16%. The beam quality factor is measured to be  $12 \times 13$  in a stable resonator.

**Key words** laser technique; disk laser; laser diode-pumped; nearly flat top pump profile

### 1 引 言

激光二极管抽运的固体激光器, 特别是高平均功率激光器<sup>[1,2]</sup> 具有效率高, 寿命长, 结构紧凑, 稳定可靠等优点, 在工业、科研和军事等领域显示出越来越巨大的应用前景。高平均功率固体激光器存在的最大问题是沉积在激光介质里的废热。废热的消除将导致热透镜、机械应力和退偏等效应, 并由此造

成光束质量的退化, 激光功率的降低, 甚至可能造成介质的断裂。采用板条<sup>[3]</sup> 或薄片<sup>[4~6]</sup> 激光介质是解决这一问题的有效途径。但板条激光器在宽度和厚度方向有像散, 而且其定标放大(按比例放大)受到厚度的限制。薄片激光器当抽运区尺寸远大于薄片厚度时, 只要合理设计耦合系统, 使抽运光为近平顶分布, 热流就可以认为是沿薄片厚度方向的一维分

收稿日期: 2004-04-14; 收到修改稿日期: 2004-06-07

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题。

作者简介: 姚震宇(1965—), 男, 江苏宜兴人, 副研究员, 博士, 主要从事高功率激光二极管抽运固体激光器技术研究。

E-mail: yaozhenyu88@yahoo.com.cn

布,而在抽运区内沿径向的温度分布是均匀的。因此薄片激光器大大降低了介质的热透镜效应和热致应力双折射,可以定标放大到很高的平均功率。

我们设计了实现抽运光近平顶分布的四通光学耦合系统,研制了一台激光二极管抽运的高功率Nd:YAG双薄片激光器,采用两块直径13 mm,厚度1 mm的Nd:YAG薄片,用两个峰值功率为2000 W,占空比为15%的准连续激光二极管阵列抽运,获得了峰值功率1440 W,平均功率216 W的准连续激光输出。

## 2 薄片激光器设计

薄片激光器的设计,要在薄片断裂极限的限制下,优化设计薄片厚度和抽运区尺寸,使激光器获得预期的输出功率,并达到较高的转换效率。薄片介质越薄,所能承受的热功率密度就越高,单位面积的输出功率也就越高。但对较薄的薄片,需要采用多通耦合结构才能使抽运光被薄片充分吸收。过于复杂的耦合系统不利于激光器的定标放大,因此我们采用四通结构,降低耦合系统的难度。选择1 mm厚、掺杂原子数分数为1.4%的Nd:YAG薄片,使抽运光经四通后的吸收效率达到80%以上。

实验中采用的薄片激光介质的结构形式是一个面抽运,另一个面冷却。对单面冷却的薄片介质,允许吸收的最大热功率为<sup>[7]</sup>

$$Q_{\max} = 3RbS/l, \quad (1)$$

式中 $R$ 为Nd:YAG的热冲击参量,约为11 W/cm, $b$ 为安全工作系数, $S$ 为抽运区面积, $l$ 为薄片厚度。

介质吸收抽运光功率所产生的热功率为

$$Q = \eta_{\text{co}} \eta_a \eta P D, \quad (2)$$

式中 $P$ 为激光二极管阵列的输出峰值功率, $D$ 为占空比, $\eta_{\text{co}}$ 为耦合系统的效率,经测量约为80%, $\eta_a$ 为激光介质对抽运光的吸收效率,经计算约为80%, $\eta$ 为Nd:YAG介质的产热比, $\eta=0.32$ <sup>[8]</sup>。抽运源采用自己研制的输出峰值功率为2000 W,占空比为15%的面阵二极管激光器模块。将安全工作系数设计为0.4,根据(1)式和(2)式可以求出抽运区面积约为0.47 cm<sup>2</sup>。为保证输出激光在两个方向的尺寸基本一致,由1.064 μm激光在薄片介质上的入射角(35°)可以确定抽运区尺寸约为7.5 mm×6.2 mm。

薄片的小信号增益系数为:

$$g_0 = \eta_{\text{co}} \eta_a \eta_q \eta_s P / (VI_s), \quad (3)$$

式中 $\eta_q$ 为Nd:YAG的量子效率,为0.95; $\eta_s$ 为斯

托克斯因子,即抽运波长与激光波长之比,为0.76; $I_s$ 为Nd:YAG的饱和强度,约为3000 W/cm<sup>2</sup>。

由(3)式算出薄片的小信号增益系数为6.5 cm<sup>-1</sup>,实验测得两个薄片的腔内往返损耗约为3.2%,由固体激光谐振腔理论可以算出采用透过率为25%的输出耦合镜,最大输出功率可以达到228 W,光-光转换效率约为38%。

## 3 四通均匀耦合技术

由于薄片激光介质只有在抽运区尺寸远大于薄片厚度,同时抽运光均匀分布的条件下,热流才可以认为是沿厚度方向的一维分布,才能基本消除热透镜效应和热致应力双折射,因此实现抽运光近平顶分布是薄片激光器的关键技术之一。

二极管激光器阵列由25个二极管线阵组成,沿快轴方向一维堆叠,发光区面积为42 mm×10 mm。每个线阵先经微柱透镜准直,再用快慢轴柱透镜进行汇聚。采用一个球面反射镜对薄片未吸收完的光再次反射,使抽运光四次通过激光介质,以提高薄片对抽运光的吸收效率。合理设计快慢轴柱透镜的焦距、球面反射镜的曲率半径以及它们与薄片的相对距离,使薄片上经球面镜反射回来的光斑与原光斑大小基本一致。慢轴方向由于只有一个线阵,因此抽运光在薄片上形成比较均匀的分布。快轴方向的抽运光根据条件的不同,差异很大。影响快轴方向均匀分布的因素主要有三个:一是面阵二极管激光器输出激光的均匀性;二是经微柱透镜准直后光束的发散角;三是快轴柱透镜的像差。激光二极管阵列采用钨铜合金微通道冷却器冷却,与铜微通道冷却器相比,钨铜合金质地较硬,有效保证了冷却器面

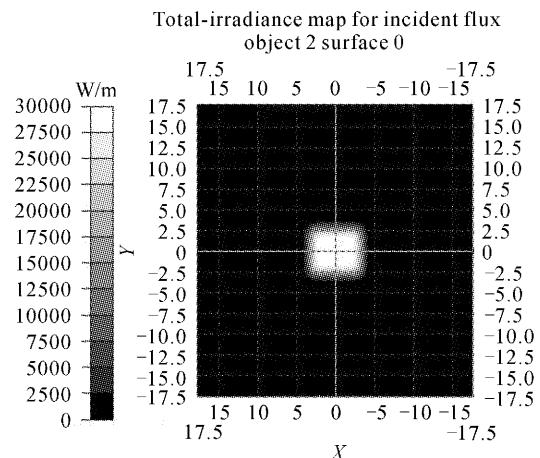


图1 抽运光束分布均匀性计算结果

Fig. 1 Calculated intensity profile of pumping laser

形精度要求,大大增加了输出激光强度分布的均匀性。在假设面阵二极管激光器输出光束均匀分布的前提下,采用光线追迹法对不同发散角的抽运光束进行了计算,计算中考虑了快轴柱透镜像差的影响。在发散角约为  $2.5^\circ$  时,抽运光为近平顶分布。图 1 是计算结果,图 2 是用 CCD 记录的 Nd:YAG 薄片上的荧光分布。

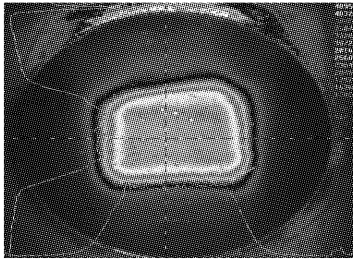


图 2 CCD 记录的 Nd:YAG 薄片荧光分布  
Fig. 2 Measured fluorescence profile of disk

#### 4 薄片激光器实验

双薄片激光器的光路如图 3 所示,抽运光和激光的入射角均为  $35^\circ$ ,分别从两个相互垂直的方向入射,抽运光在与纸面垂直的方向。

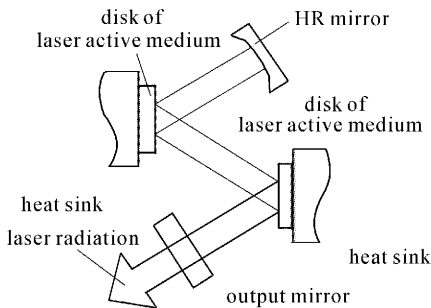


图 3 薄片激光器原理图  
Fig. 3 Principle setup of the thin disk laser

图 4 是单薄片激光器的实验装置,谐振腔采用

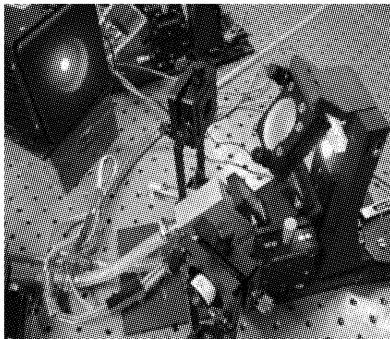


图 4 单薄片激光器实验装置  
Fig. 4 The schematic of one disk laser

平凹稳定腔,腔长 50 cm,全反镜曲率半径 5 m,输出镜透过率 12%。在激光二极管占空比为 15% 时,最大输出平均功率 114 W,光-光转换效率为 38%。图 5(a)是单薄片激光器平均输出功率与激光二极管驱动电流的关系曲线。

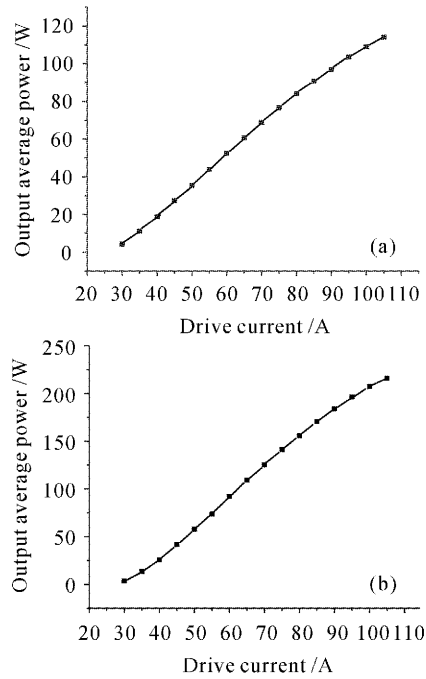


图 5 (a)单薄片激光器,(b)双薄片激光器  
输出平均功率与驱动电流的关系曲线

Fig. 5 Average output power versus pumping driver current for single disk laser (a), double-disk laser (b)

采用两个参量相同的薄片进行了串接定标放大实验,腔长 80 cm,输出镜透过率 25%。在 15% 占空比下获得 216 W 的最大平均输出功率,光-光转换效率达到 36%,实现了定标放大,与理论计算值也比较接近。与单薄片输出相比效率稍低的原因主要是两个薄片的抽运区和激光模很难调得完全匹配。

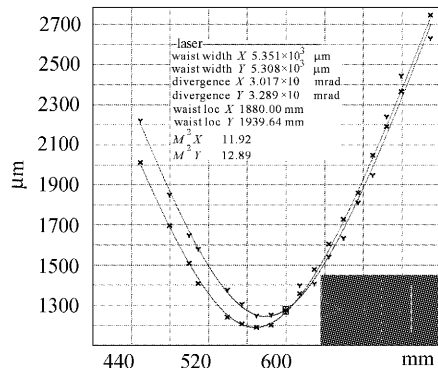


图 6 光束质量测试结果  
Fig. 6 Measured beam quality

图 5(b)是双薄片激光器输出的平均功率与激光二极管驱动电流的关系曲线。在输出功率 210 W 时,采用美国 Spiricon 公司的  $M^2$ -200 测试仪测量了光束质量,经多次测量平均, $M^2$  因子约为  $12 \times 13$ ,图 7 是其中一次的测量结果。图 8 是双薄片激光器实验装置。

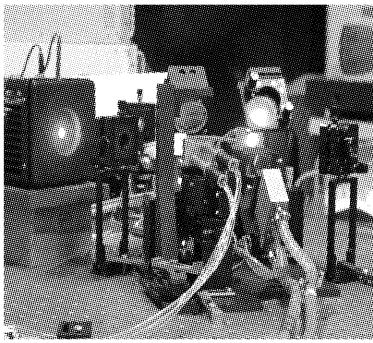


图 7 双薄片激光器实验装置

Fig. 7 Schematic of two disks laser

## 5 结 论

设计了四通耦合光学系统,实现了抽运光的近平顶分布;采用钢焊工艺大幅度提高了薄片激光介质的散热冷却效率。在单薄片激光实验中,最大输出平均功率达到 114 W,光-光转换效率 38%;在两个薄片的串接定标放大实验中,获得峰值功率 1440 W,平均功率 216 W 的准连续激光输出,光-光转换效率达到到 36%。在该激光器的进一步定标放大实验中,将采

用非稳腔提高光束质量。

**致谢** 本研究工作得到了杨成龙研究员、张凯研究员的指导、支持和帮助,在此深表感谢。

## 参 考 文 献

- 1 YAO Zhenyu, Lü Baida, Gao Jianrong *et al.*. High power diode-pumped intracavity-doubled laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(10): 963~965  
姚震宇,吕百达,高剑蓉等. 高功率二极管抽运腔内倍频激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(10): 963~965
- 2 Wang Weiming, YAO Zhenyu, Pang Yu *et al.*. Study on DPL technology of hectowatt green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl.): 5~7  
王卫民,姚震宇,庞毓等. 百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(Suppl.): 5~7
- 3 Jason P. Machan, William H. Long, Jr. *et al.*. 5 kW diode-pumped solid state laser [J]. *Solid State and Diode Laser Technology Review*, 2002, **15**:16~19
- 4 YAO Zhenyu, Lü Baida, TU Bo *et al.*. 100 W diode-pumped Nd:YAG disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9): 1116~1118  
姚震宇,吕百达,涂波等. 100 W 二极管抽运薄片激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(9): 1116~1118
- 5 M. Karszewski, U. Brauch, K. Contag *et al.*. 100 W TEM<sub>00</sub> operation of Yb:YAG thin disc laser with high efficiency [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics, Advanced Solid State Laser*, 1998, **19**: 296~299
- 6 Christian Stewen, Karsten Contag, Mikhail Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disk laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 7 John Vetrovec. Active mirror amplifier for high-average power [C]. *SPIE*, 2001, **4270**: 45~55
- 8 Fan T. Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6): 1457~1459