

文章编号: 1001-3806(2011)01-0082-04

## 16 通抽运微通道冷却 Yb:YAG 薄片激光器

马毅, 王春华, 王卫民, 涂波, 李奇峰, 石勇

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究 Yb:YAG 薄片激光器的性能, 采用 16 通抽运耦合、微通道冷却的方法, 对薄片的优化厚度、热力学特性和激光性能等进行了理论分析, 利用直径 10mm、厚度为 250 $\mu\text{m}$ 、掺杂原子数分数为 0.1 的 Yb:YAG 薄片进行了实验验证, 抽运耦合系统实现了对薄片的 16 通抽运, 在抽运功率为 81.9W 时, 获得了平均功率为 24.4W 的激光输出, 光光转换效率达到了 29.8%。结果表明, 多通抽运微通道冷却 Yb:YAG 激光器可以获得较高的光光转换效率。

**关键词:** 激光器; 薄片参量优化; 微通道冷却器; 性能估算

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.023

## 16-pass pumped micro-channel cooled Yb:YAG thin disk lasers

MA Yi, WANG Chun-hua, WANG Wei-min, TU Bo, LI Qi-feng, SHI Yong

(Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to study the performance of an Yb:YAG thin disk laser, a 16-pass pumped micro-channel cooled scheme was adopted. The optimum thickness of the Yb:YAG disk, the thermo-mechanical effect in the disk and the laser performance are analyzed. The 16-pass pumping coupling is achieved in preliminary experiment using an Yb:YAG disk (250 $\mu\text{m}$  in thickness and 10mm in diameter) with atomic fractional 0.1 doping concentration. The output power of 24.4W was obtained from the laser oscillator when the total pump power was 81.9W. The optical-to-optical conversion efficiency was up to 29.8%. The result shows that the higher conversion efficiency can be achieved in the 16-pass pumped micro-channel cooled Yb:YAG thin disk laser.

**Key words:** lasers; thin disk parameter optimization; micro-channel cooler; performance evaluation

### 引言

Yb:YAG 激光晶体具有量子效率高、吸收带宽宽、荧光寿命长、掺杂浓度高、热生成率低等优点。不过, Yb:YAG 的准 3 能级结构决定了它需要较高的抽运强度, 传统抽运方法产生的热透镜效应、热致双折射效应、机械应力等问题将限制激光器向更高功率水平发展<sup>[1]</sup>。采用单面抽运和单面冷却的薄片激光器设计, 可使激光介质的热管理得到较大改善, 激光器易于实现较高功率输出, 同时保持较高的转换效率和较高的光束质量<sup>[2,3]</sup>。近年来, 随着 InGaAs 二极管激光器性能的提高和成本的降低, 在激光加工等应用需求的牵引下, 基于二极管激光器抽运的 Yb:YAG 薄片激光技术得到了广泛的研究。目前, 德国在 Yb:YAG 薄片激光器的研究方面处于领先地位, 德国的 STEWEN 等人利用单个 Yb:YAG 薄片在 2000 年已获得 650W 的连续激光输出<sup>[4]</sup>, 最近单个薄片最大输出功率已经大于

5kW, 而且市场上已经出现了可用于材料加工的输出功率达 8kW 的商用薄片激光器<sup>[5]</sup>。近年来, 国内也相继开展了 Yb:YAG 薄片激光技术的研究<sup>[6-7]</sup>, 但核心技术未完全掌握, 研究水平同国外相比还有较大差距。

本文中设计了由特殊棱镜和抛物面镜组合而成的 16 通抽运耦合系统和高效铜微通道冷却器, 对 16 通抽运下薄片的参量进行了优化, 对薄片的热力学特性进行了分析, 并对激光器的性能进行了估算, 开展了初步的实验研究。

### 1 激光器实验装置

采用单面 16 通抽运单面冷却的薄片激光器设计, 实验装置结构示意图如图 1a 所示。增益介质采用直径为 10mm、厚度为 250 $\mu\text{m}$ 、掺杂 Yb 原子数分数为 0.1 的 Yb:YAG 薄片, 其抽运面镀有抽运光(938nm)和振荡光(1030nm)的增透膜, 冷却面镀有抽运光和振荡光的高反膜, 薄片冷却面与曲率半径为 800mm 的凹面镜组成平凹直线谐振腔, 腔长 102mm。抽运光源为 JENOPTIK Laserdiode 公司的 938nm 光纤耦合半导体激光器, 最大输出功率 210W, 光纤芯径 600 $\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22。抽运过程中产生的废热主要通过焊接到

作者简介: 马毅 (1977-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事二极管抽运固体激光技术的研究。

E-mail: rufinecn@163.com

收稿日期: 2010-03-23; 收到修改稿日期: 2010-04-14

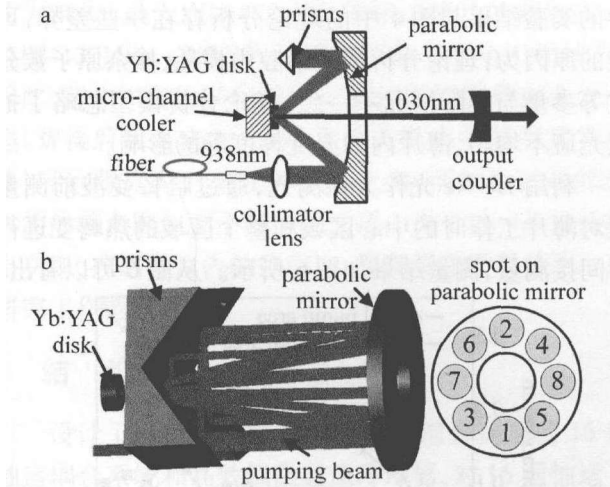


Fig. 1 a—schematic of thin disk laser b—16-pass-pump coupling system  
薄片冷却面的铜微通道冷却器带走。参考 GIESEN 的 16 通抽运耦合系统<sup>[5]</sup>,设计了图 1b 所示的抽运耦合系统,该耦合系统利用两块特殊设计的 90° 直角反射棱镜完成 GIESEN 的 16 通抽运耦合系统中的折叠镜功能,抛物面反射镜的焦距设计为 45mm。光纤输出的抽运光先经过一个双凸透镜(凸面曲率半径为 19.4mm)将发散角压缩到 30mrad 左右,然后再通过 16 通抽运耦合系统对薄片进行多通抽运,耦合光斑直径可压缩到 2mm 左右,从而实现准 3 能级系统运转需要的几个 kW/cm<sup>2</sup> 的抽运强度。

## 2 激光器设计

### 2.1 薄片参量优化

假定抽运光呈平顶分布,激光模式与抽运模式完全重叠,并且认为薄片内的温度不随薄片厚度变化,则可以获得基于多通抽运耦合薄片的最佳吸收效率和最佳厚度参量<sup>[8]</sup>:

$$\eta_{opt,abs} = 1 - \frac{hc}{\lambda_p \tau} \cdot \frac{n_{trans,u}}{E_p N_p \sigma_{abs}(\lambda_p) f_b} \quad (1)$$

$$t_{opt,c} = \frac{\ln \left[ \frac{E_p N_p \sigma_{abs}(\lambda_p) f_b}{\frac{hc}{\lambda_p \tau} n_{trans,u}} \right]}{N_{ion} N_p \sigma_{abs}(\lambda_p) f_b} \quad (2)$$

式中,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $\lambda_p$  为抽运波长,  $\tau$  为上能级寿命,  $n_{trans,u}$  为材料对激光波长透明所需抽运的粒子数在总粒子数中的比例,  $E_p$  为抽运功率密度,  $N_p$  为抽运通数,  $\sigma_{abs}(\lambda_p)$  为抽运光的有效吸收截面,  $f_b$  为漂白因子,  $N_{ion}$  为单位体积内的总粒子数。

根据(1)式、(2)式计算获得的薄片优化吸收效率和优化厚度结果如表 1 所示,计算中主要参量取值为:  $N_p = 16$ ,  $n_{trans,u} = 0.0455$ ,  $\lambda_p = 938 \times 10^{-9} \text{m}$ ,  $\sigma_{abs}(\lambda_p) = 0.76 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ,  $E_p = 6.4 \text{kW/cm}^2$ ,  $\tau = 951 \mu\text{s}$ 。可以看出,随着掺杂原子数分数的增加,可以采用更薄

Table 1 Calculated value of optimum absorption efficiency and thickness of thin disk

doping concentration(atomicity fraction)	$f_b$	$\eta_{opt,abs}/\%$	$t_{opt,c}/\mu\text{m}$
0.05	0.87	98.5	586
0.08	0.86	98.5	372
0.1	0.86	98.5	300

的薄片而保持较高的吸收效率。综合考虑薄片加工难度和高掺杂原子数分数带来的浓度猝灭问题,选择了厚度为 250 $\mu\text{m}$ 、Yb 掺杂原子数分数为 0.1 的 Yb:YAG 薄片。

### 2.2 微通道冷却器设计

为了提高散热效率,设计了图 2 所示的微通道冷

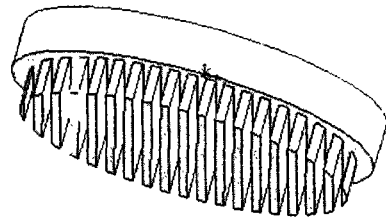


Fig. 2 Schematic of micro-channel cooler

却器,材料采用与 Yb:YAG 热膨胀系数相当的铜钨合金(W20Cu),以减小薄片工作时的热应力。

根据理论推导结合实验,优化设计出微通道截面尺寸为 0.5mm × 2mm,设计流量为 3L/min,冷却介质在管道中的流速为 3m/s。通道内流体的雷诺数为 3000,流体状态是处于层流和湍流之间的过渡流,其努塞尔数为<sup>[9]</sup>:

$$Nu_d = \frac{(f/8)(Re_d - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (3)$$

式中,  $f$  为与通道粗糙度相关的摩擦因子,  $Re_d$  为流体雷诺数,  $Pr$  为流体介质的普朗特数,取  $f = 0.046$ ,  $Re_d = 3000$ ,  $Pr = 7$ ,计算得到  $Nu_d = 22.61$ 。相应的通道表面对流传热系数  $\alpha = Nu_d \lambda / d = 22.61 \times 0.6 / 0.001 = 13566 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ( $\lambda$  为水的导热系数,  $d$  为当量直径)。微通道的壁面将换热面积提高了 4.5 倍,有效系数约为 0.8,故得到冷却器以热流表面为基准的对流传热系数为  $13566 \times 4.5 \times 0.8 = 48838 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 2.3 激光性能估算

将 Yb:YAG 系统看作两能级系统,并假定薄片被均匀抽运,且薄片内温度为常数,则通过下式可以估算输出功率密度<sup>[10]</sup>:

$$E_{out} = \frac{T_{oc}}{-\ln(1 - T_{oc}) - \ln(1 - L)} \times \eta_{abs} \eta_{st} (E_p - E_{th}) \quad (4)$$

式中,  $T_{oc}$  为输出镜透过率,  $L$  为谐振腔往返损耗,  $\eta_{abs}$  为吸收效率,  $\eta_{st}$  为斯托克斯效率,  $E_p$  为抽运功率密度,  $E_{th}$  为阈值抽运功率密度。根据上式计算获得的输出功率密度、光光转换效率随抽运功率密度变化的关系

曲线如图3所示,计算过程中主要参量取值为:抽运光

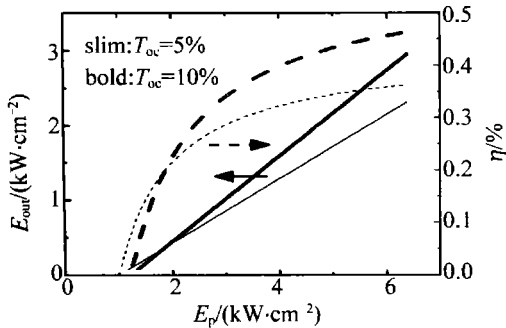


Fig. 3 Output power density and conversion efficiency versus pump power density

斑直径2mm,掺杂原子数分数为0.1,抽运通数为16通,  $L=5\%$ ,  $\lambda_1=1030 \times 10^{-9}m$ ,  $\sigma_{abs}(\lambda_1)=2.1 \times 10^{-20}cm^2$ 。

### 3 初步实验结果与分析

实验中首先测得了薄片上的抽运光斑分布,如图4所示,抽运光斑直径约2.0mm。实验中,利用红外激

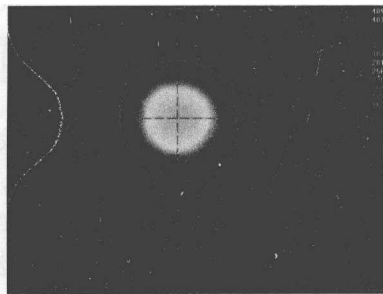


Fig. 4 Pump beam profile of Yb:YAG thin disk

光观察仪(美国 FJW Optical Systems 公司提供的 85100A-5 型红外激光观察仪)在主反射镜上观察到了 8 个抽运光斑。根据观察结果,抽运系统实现了对薄片的 16 通抽运,抽运光斑分布较为均匀,多通抽运光斑重合性良好。

图5中给出了实验测得的采用透过率为5%和

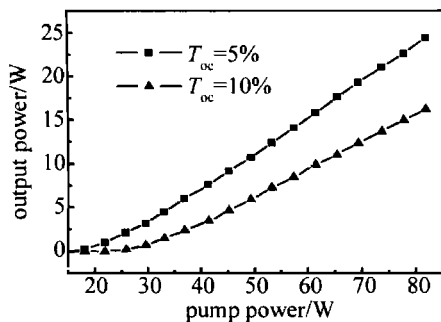


Fig. 5 Output power versus pump power

10%输出镜时激光输出功率随抽运功率的变化曲线,当抽运功率为81.9W时,采用两种透过率的输出镜分别获得了24.4W和16.2W的激光输出,光光转换效率分别为29.8%和19.8%。从图5的趋势看,采用更低透过率的输出镜可能获得更高的转换效率,但目前受实验条件的限制未获得相应实验数据。另外,图5

中的实验结果与图4中的理论分析存在一些差异,可能的原因:理论分析模型中腔内损耗、掺杂原子数分数等参量与实际情况不一致;理论分析模型忽略了抽运光斑不均匀、薄片内的温度梯度等的影响。

利用 He-Ne 光作为探测光,通过哈特曼波前测量仪对薄片工作时的中心区域和整个区域的热畸变进行了间接测量,测量结果如图6所示。从图6可以看出,

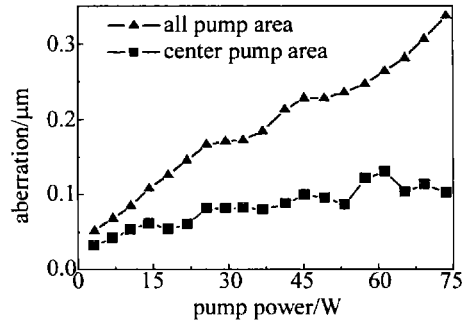


Fig. 6 Thermal aberration versus pump power

随着抽运功率的增加,薄片中心区域的热畸变不明显,而整个区域的热畸变则明显随着抽运功率的增加而增加,这主要是因为:薄片中心区域的抽运光分布较为均匀而平滑,该区域内的介质热膨胀较为均匀,故无明显的热应力;而在抽运区域的边缘,由于抽运区和非抽运区介质热膨胀的不一致将产生较大的热应力。

在输出功率为21W时,利用 Spiricon 公司的 M<sup>2</sup>-200 测试仪测量了激光输出的光束质量, M<sup>2</sup> 在 x 和 y 方向的光束质量分别为 5.14 和 4.86。光束质量不理想的主要原因是腔长较短,谐振腔的基模尺寸比抽运区域尺寸小,高阶横模未得到有效抑制。

当抽运功率继续增大并超过 81.9W 时,薄片出现炸裂现象。根据实验获得的抽运光斑分布数据,利用 ANSYS 分析软件对抽运功率为 81.9W、冷却水温度为 25℃ 时薄片的温度分布和应力分布进行了模拟计算,结果如图7所示。计算表明,薄片前后表面最大温差

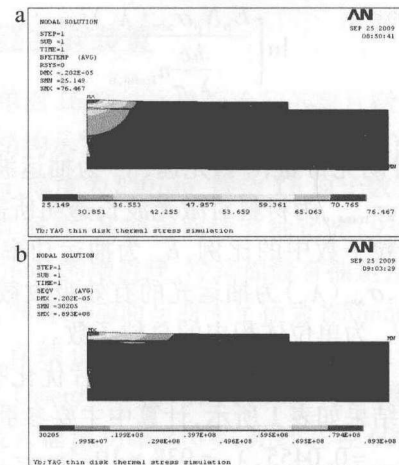


Fig. 7 a—temperature of disk under non-uniform pump b—stress profile of disk under non-uniform pump

约为 40℃,最大应力约为 89.3MPa(薄片的断裂极限范围:130MPa~260MPa),薄片应处于安全工作状态。因此,薄片炸裂的主要原因可能是焊接质量存在的缺陷(焊接后残余应力、焊接界面有微小空洞等其它缺陷)导致薄片内出现较大的热应力,而抽运区边缘较大的热畸变则加剧了薄片的炸裂。为了进一步提高输出功率,控制薄片内的热应力、提高焊接质量是下一步研究工作的重点。

#### 4 结论

设计了由特殊棱镜和抛物面镜组合而成的 16 通抽运耦合系统和高效铜微通道冷却器,对 16 通抽运下不同掺杂原子数分数薄片的厚度进行了优化,对薄片的热力学特性进行了分析,并对激光器的性能进行了估算。利用直径 10mm、厚度为 250 $\mu\text{m}$ 、掺杂原子数分数为 0.1 的 Yb:YAG 薄片开展了初步的实验研究,抽运耦合系统实现了对薄片的 16 通抽运,抽运光斑分布较为均匀,在抽运功率为 81.9W 时,激光器获得了平均功率为 24.4W 的激光输出,光光转换效率达到了 29.8%。控制薄片内的热应力、提高焊接质量是下一步研究工作的重点。

感谢胡浩助理研究员、唐淳研究员、蒋建峰助理研究员等同志在设计过程中给予的指导和帮助,感谢雷军同志在薄片焊接方面给予的支持,感谢高剑蓉等同志在实验过程中给予的帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] KEMP A J, VALENTINE G J, BURNS D. Progress towards high-power, high-brightness neodymium-based thin-disk lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 28(6):305-344.
  - [2] GIESEN A, HÜGEL H, VOSS A, *et al.* Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. *Applied Physics*, 1994, B58(5):365-372.
  - [3] GIESEN A. Thin-disk solid-state lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5620:112-114.
  - [4] STEWEN C, CONTAG K, LARIONOV M, *et al.* A 1kW CW thin disc laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(4):650-657.
  - [5] GIESEN A, SPEISER J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling Laws [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3):598-609.
  - [6] LI C, XU Z, LI J L, *et al.* Diode pumped Yb:YAG thin disk laser achieves 16W CW output [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, 19(2):104-108 (in Chinese).
  - [7] YE Y C, LIN W X, WANG G F, *et al.* Study on LD-pumped Nd:KGW thin disk laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5):536-538 (in Chinese).
  - [8] CONTAG K, ERHARD S, GIESEN A. Calculations of optimum design parameters for Yb:YAG thin disk lasers [J]. *Advanced Solid State Lasers*, 2000, 34:124-130.
  - [9] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T P, *et al.* Fundamentals of heat and mass transfer engineering [M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:319.
  - [10] CONTAG K, KARSZEWSKI M, STEWEN C, *et al.* Theoretical modelling and experimental investigations of the diode-pumped thin-disk Yb:YAG laser [J]. *Quantum Electronics*, 1999, 2(8):697-703.
- 
- (上接第 38 页)
- [5] YE Zh H, LOU Q H, LI H X, *et al.* Beam homogenizing technology for UV excimer laser [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2):207-209 (in Chinese).
  - [6] WANG J Zh, SHI T L, XIONG L C. A shortened procedure of micro-electromechanical systems fabrication by means of femtosecond laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):88-91 (in Chinese).
  - [7] ENDERT H, KAUF M, MAYER E, *et al.* Microstructuring with 157nm laser light [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3618:413-417.
  - [8] LI W L, LI Y, LI W. Mechanism study of silica ablating on photonic crystal fiber by 157nm laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6):601-604 (in Chinese).
  - [9] DAI Y T, XU G, LI W L. Laser micromachining of wide bandgap materials [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 69/70:118-122.
  - [10] DAI Y T, XU G, CUI J L, *et al.* Micro etching of GaN-based semiconductor materials using 157nm laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12):3138-3142 (in Chinese).