

文章编号: 1001-3806(2009)03-0228-04

## 边缘抽运非对称 Yb:YAG 盘片激光器

马冬冬, 柳强, 巩马理\*, 王东生

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了对 Yb:YAG 固体盘片激光器进行简单高效的抽运, 采用了边缘抽运的方式, 使用 LD 阵列通过光束耦合装置对非对称 Yb:YAG/YAG 复合晶体进行抽运, 获得了 80% 以上的抽运光吸收效率和较均匀的吸收分布; 同时, 为了避免高功率工作下晶体过热导致性能下降, 对这种抽运结构的散热装置结构进行了理论分析和实验研究, 自主设计了理论散热效率超过  $12\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$  的微喷式散热系统, 并进行了实验。在抽运吸收功率 750W 时获得了 123W 的连续光输出, 斜率效率达到 34.8%。结果表明, 边缘抽运方法在 LD 抽运盘片激光器的研究中有着很好的应用前景。

**关键词:** 激光器; Yb:YAG; 边缘抽运; 复合晶体

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk lasers

MA Dong-dong, LIU Qiang, GONG Ma-li, WANG Dong-sheng

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to pump a solid disk laser effectively, edge-pumped scheme for Yb:YAG thin disk solid-state laser was adopted. More than 80% absorption efficiency and homogenous absorption distribution were obtained with an asymmetric composite crystal. The heat sink with its thermal conduction efficiency over  $12\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$  satisfied the system requirement for cooling well. In the experiment, maximum output power of over 123W was achieved with slope efficiency of 34.8%. The results show that it is prospective to adopt edge-pumped scheme for thin disk solid-state lasers.

**Key words:** lasers; Yb:YAG; edge-pumped; composite crystal

### 引言

LD 抽运固体激光器具有电光转换效率高、体积小、重量轻、输出功率高、光束质量好等特点, 在工业、国防等领域有着重要的应用前景。固体激光器的增益介质主要有棒状、板条和盘片等几何构型。其中, 盘片型激光增益介质在一定程度上解决了高功率激光器冷却和高功率抽运的矛盾, 其横向热梯度较小, 而激光传输方向基本上垂直于盘片端面, 因此受到热梯度效应的影响较小, 可以获得更高的输出功率及良好的光束质量<sup>[1]</sup>。

Yb:YAG 晶体是一种常用的激光介质, 它的量子效率高, 热效应小, 并可以高掺杂, 在国内外的激光研究领域被广泛地应用。由于激光介质 Yb:YAG 的域值功率密度高, 其晶体的热破裂极限限制了盘片的厚度<sup>[2]</sup>, 因此, 需要简单高效的抽运方案来提高介质的

吸收效率和抽运功率密度。另外, 由于盘片形激光介质散热面小、热功率密度高, 而 Yb:YAG 晶体在温度升高的情况下性能会大幅度下降<sup>[3]</sup>, 故需要优良的散热装置。

作者采用的是一种 Yb:YAG 盘片激光器的简单高效的边缘抽运方法<sup>[4]</sup>, 使用 LD 阵列通过光束耦合装置对非对称 Yb:YAG/YAG 复合晶体进行抽运, 获得了 80% 以上的抽运光吸收效率和较均匀的吸收分布; 同时还对这种抽运结构的散热装置结构进行了研究, 自主设计了理论散热效率超过  $12\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$  的微喷式散热装置, 很好地解决了晶体的散热问题。在实验中, 使用了厚度为 1.28mm 的 Yb:YAG/YAG 复合晶体, 在抽运吸收功率 750W 时获得了 123W 的连续光输出, 斜率效率达到 34.8%。

### 1 非对称 Yb:YAG/YAG 复合晶体的边缘抽运方法

盘片状激光晶体较常用抽运方式为面抽运<sup>[5]</sup>, 抽运光从激光晶体的表面直接射入晶体内部被吸收。由于盘片状晶体厚度较薄, 为了增长吸收路径以获得高吸收

作者简介: 马冬冬(1981-), 男, 博士研究生, 现主要从事高功率固体激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gongml@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-03-02; 收到修改稿日期: 2008-06-02

效率,需要采用多个反射镜将抽运光反射,使其反复穿越晶体,抽运光可以被吸收4次、8次、16次或更多次。面抽运盘片晶体的优点是吸收均匀,抽运吸收效率高,但其加工和装配都非常复杂,设计精度要求也非常高。

为了简化抽运方案,并获得较高的抽运光吸收效率和抽运功率密度,采用了边缘抽运非对称 Yb:YAG/YAG 复合晶体的方法。如图1所示,首先通过热键合

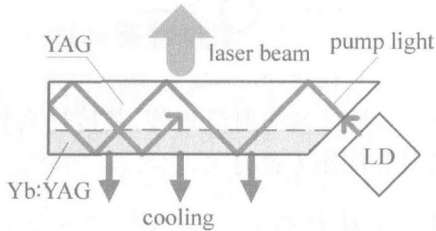


Fig. 1 Method of edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk lasers  
等工艺技术,将 Yb:YAG 晶体与 YAG 晶体制成复合晶体盘片, LD 阵列的抽运光经过耦合系统,形成 2.7mm × 0.9mm 的入射光面,以一定角度射入盘片边缘,入射光沿 Zig-Zag<sup>[6]</sup> 路径在盘片内部传导并多次被 Yb:YAG 晶体部分吸收,盘片在抽运光的传导方向上为非对称结构,增加了抽运光的吸收次数,减少了抽运光功率的损耗;同时为了提高抽运光吸收的均匀性,将 Yb:YAG/YAG 复合晶体制成六边形,将 3 个 LD 抽运源圆周排列在非对称键合晶体周围同时进行抽运,既增大了抽运光吸收功率密度,又提高了抽运功率分布的均匀性。

## 2 复合晶体参量设计

根据设计方案,使用厚度为 1mm 的 YAG 晶体作为基质,取掺杂原子数分数为 0.08 的 Yb:YAG 晶体作为激光介质,如图 2 所示,需要确定的几个参量为: Yb:YAG 晶体的厚度  $h$ , 六边形盘片外接圆半径  $R$  和抽运光入射角  $\alpha$ 。

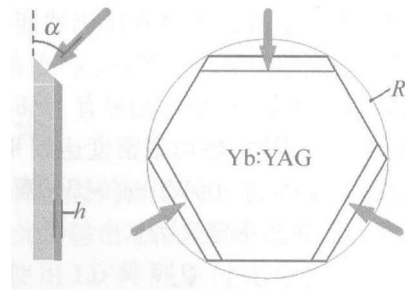


Fig. 2 Parameters of the composite crystal

受到放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 效应和盘片断裂极限的限制,盘片的厚度  $h$  需要满足<sup>[7]</sup>:  $h < (3R_m b)^{1/2} (P_{a,ASE} \psi_{d,max} f_h)^{-1/2}$  (1) 式中,  $R_m$  为 Yb:YAG 的热冲击系数,  $b$  为安全工作系数,  $P_{a,ASE}$  为允许吸收的最大热功率,  $\psi_{d,max}$  为抽运光最大脉冲占宽比,  $f_h$  为 Yb:YAG 介质的产热比。

根据仿真发现,当盘片厚度  $h$  超过 0.25mm 时,晶体对抽运光的吸收效率超过了 80%,并随着盘片厚度  $h$  的增加而增大。合并(1)式的结果得到  $0.25\text{mm} < h < 0.30\text{mm}$ 。

Yb:YAG 激光介质通过吸收抽运光而产生的热功率为:  $P_t = P_{a,ASE} f_h = P_{out} f_1 f_h$  (2) 式中,  $P_{out}$  为 LD 阵列输出的功率,  $f_1$  为耦合系统及盘片吸收的总效率。

激光介质允许吸收的最大热功率还可以表示为<sup>[7]</sup>:  $P_{a,ASE} = 3R_m b S / h$  (3)

式中,  $S$  为抽运区域面积,由(2)式、(3)式两式及  $h$  的取值,并将  $S$  折算为晶体外接圆半径  $R$ ,结合实际制备的晶体参量,得到  $4\text{mm} < R < 5.5\text{mm}$ 。

对于折射率  $n = 1.82$  的 Yb:YAG/YAG 介质,  $\alpha$  角需要满足  $33.3^\circ \leq \alpha \leq 56.7^\circ$ 。

综上所述,在各参量界定范围内,进行了一系列的仿真模拟,主要目的就是在提高抽运光吸收效率的同时获得较均匀的吸收功率分布。最后确定的复合晶体

Table 1 Parameters of the composite crystal

radius $R/\text{mm}$	Yb:YAG thickness $h/\text{mm}$	YAG thickness $h_0/\text{mm}$	angle $\alpha/(\text{^\circ})$	atom fraction	efficiency $\eta/\%$
4.9	0.28	1.00	35.5	0.08	84.53

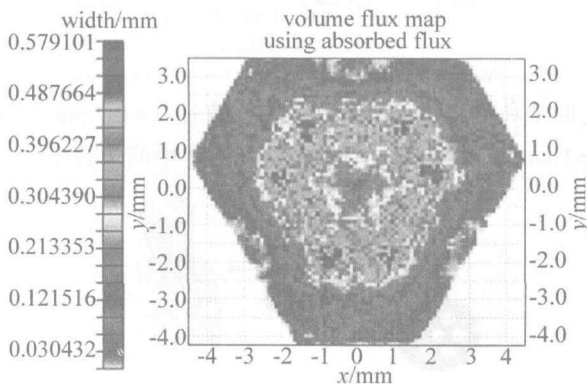


Fig. 3 Pump power distribution in the Yb:YAG crystal

参量如表 1 所示。仿真结果显示,抽运光耦合效率为 84.53%,图 3 为晶体内部抽运光功率密度分布情况,从图中可以看出抽运光分布还是比较均匀的。

## 3 微喷式散热装置设计

Yb:YAG 激光器的工作性能随着温度上升而下降,激光下能级和抽运上能级的粒子集居数随温度的升高而增加,激光上能级和抽运下能级的粒子集居数随温度的升高而减少<sup>[8-9]</sup>。虽然使用波长为 940nm 的抽运光抽运时, Yb:YAG 的产热率较低,但是对于数千

瓦的抽运功率,所产生的热功率密度仍然能达到数百瓦,因此仍然需要高效的散热装置。

在940nm波长抽运下,抽运功率有11%转化为废热,对于千瓦级系统来说,热功率密度达到8kW/cm<sup>3</sup>,晶体表面热流密度达到200W/cm<sup>2</sup>~300W/cm<sup>2</sup>。这里将散热装置的散热效率定义为:

$$h_0 = \frac{Q_a}{T_{s,max} - T_{in}} \quad (4)$$

式中,  $T_{s,max}$  为散热装置受热面最高温度,  $T_{in}$  为通道内冷却剂温度,  $Q_a$  为受热面热流密度。

要求热流密度达到  $Q_a = 300\text{W/cm}^2$ , 如果限定  $T_{s,max} - T_{in} \leq 30^\circ\text{C}$ , 则要求散热器散热效率达到  $h_0 \geq 10\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ , 散热能力越强, 晶体的温度也越低。然而, 一般的微通道散热装置只能达到  $h = 3\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}) \sim 5\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ , 因此, 需要散热能力更强的散热装置。

这里引入一种微喷系统模型。微喷系统是日本滨松光子中心与大阪大学合作研究的一种微通道散热结构, 主要用于LD制冷。如图4所示, 水流从喷孔喷出

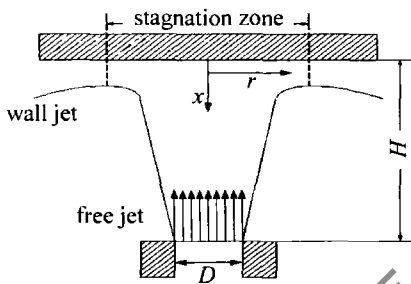


Fig. 4 The principle of jet cooling

后直接喷射到散热面形成射流, 从而使直接受到冲击的区域产生很强的换热效果。它的特点就是局部换热强度高, 适合小面积的换热, 如果面积较大可以采用一组射流阵来产生强烈的换热效果, 属于强化传热范畴<sup>[8]</sup>。射流有效地降低了受热表面的水膜厚度, 从而极大降低了热阻, 提高了散热能力。

射流冲击区域中的平均换热特性努塞尔数可以按照下面的经验公式确定<sup>[10]</sup>:

$$\overline{Nu} = f_1\left(\frac{r}{D}, \frac{H}{D}\right) f_2(Re) f_3(Pr) \quad (5)$$

式中,  $D$  为射流出口直径,  $H$  为射流出口到壁面之间的距离,  $r$  为壁面射流半径,  $10^\circ\text{C}$  时水的普朗特数  $Pr = 9.52$ , 水流量为  $0.2\text{L/s}$  时雷诺数  $Re = 7.7 \times 10^4$ ,  $f_1\left(\frac{r}{D}, \frac{H}{D}\right) = \frac{d}{r} \frac{1 - 1.1D/r}{1 + 0.1(H/D - 6)D/r}$ ,  $f_2(Re) = 2Re^{1/2} (1 + 0.005Re^{0.55})^{1/2}$ ,  $f_3(Pr) = Pr^{0.42}$ 。

由于结构的限制, 喷嘴到传热面的距离有限, 可以使用人为的方法提高湍流速度, 使用金属网格或在喷嘴和传热面之间平行放置穿有小孔的平板, 使射流在通过多

孔板后发生二次流, 湍流速度提高, 从而使传热率有很高的增长。为此, 采用了三角形排列的射流矩阵, 见图5。

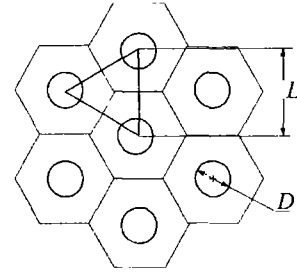


Fig. 5 Triangular jet matrix

对于三角形排列的射流矩阵, 其传热系数和圆孔直径  $D$  及其孔间距  $L$  都有关, 由经验公式给出<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0.42}} = \left[ 1 + \left( \frac{H/D}{0.6} \sqrt{f} \right)^{-0.05} \frac{\sqrt{f(1 - 2.2\sqrt{f})}}{1 + 0.2(H/D - 6)\sqrt{f}} \right] Re^{2/3} \quad (6)$$

$$\text{式中 } f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{D}{L} \right)^2$$

根据经验公式的成立条件  $H/D \geq 2$  以及结构尺寸的需要, 取  $r = 4.9\text{mm}$ ,  $H = 2D$  进行计算, 得到射流努塞尔数与孔直径的关系见图6a, 令  $H = 1\text{mm}$ ,  $D = 0.5\text{mm}$ , 得到射流努塞尔数与孔间距的关系见图6b。根据图

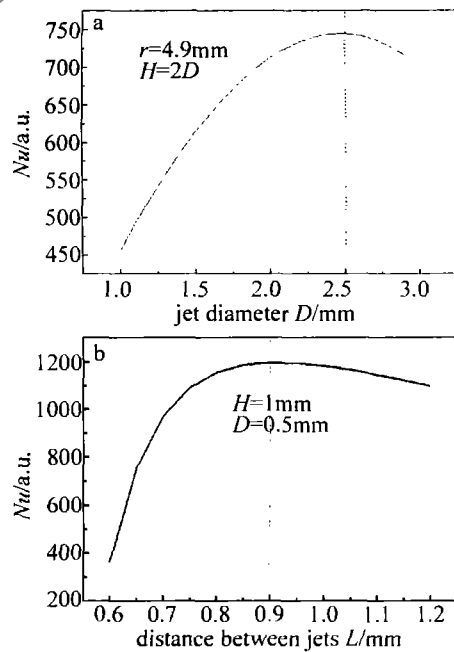


Fig. 6 a— $Nu$  versus jet diameter b— $Nu$  versus distance between jets  
像, 取单孔直径  $D_0 = 2.5\text{mm}$ , 多孔直径  $D = 0.5\text{mm}$ , 孔高  $H = 1\text{mm}$ , 多孔间距  $L = 1\text{mm}$ , 得到图7中的7孔结构。

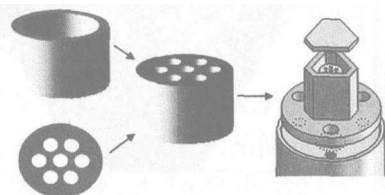


Fig. 7 The heat sink with seven microjets

装置的散热效率与射流努塞尔数换算关系如下:

$$h = \frac{\lambda}{l} Nu \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  为水的导热系数,  $l$  为有效散热直径 7.8 mm。计算得到  $h = 12.13 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}) > h_0$ , 符合设计要求。根据设计参量, 作者加工了这种微喷式热沉并投入了实验。

#### 4 实验装置与实验结果

根据前面的讨论结果, 首先采用热键合技术制备了 Yb:YAG/YAG 复合盘片晶体, 并按照设计参量进行加工和镀膜, 然后使用钢箔将晶体与微喷式热沉焊接, 以减小激光介质与热沉之间的热阻, 提高散热冷却效率, 同时有利于盘片晶体的自由膨胀, 防止盘片断裂。搭建后的实验装置工作情况如图 8 所示。



Fig. 8 Experimental setup for the edge-pump thin disk laser

采用 97% 透过率的输出耦合镜, 得到了激光输出功率与吸收的抽运功率间的关系, 如图 9 所示, 激光振荡阈值约为 100 W, 最大输出 123 W, 斜率效率  $\eta_s = 34.8\%$ , 最后用刀口法测得光束质量  $M^2 \approx 20$ 。分析光

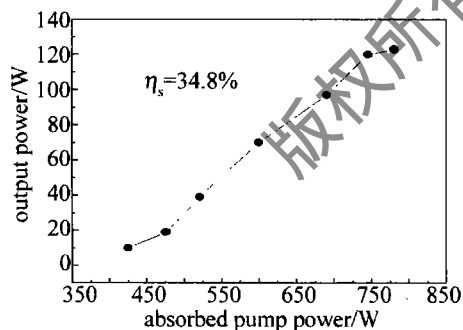


Fig. 9 Output power versus absorbed pump power

束质量较差的原因是由于晶体与热沉间的接触热阻还比较大, 造成热效应比较严重。

#### 5 结论

盘片激光器的高效抽运技术和散热冷却技术是提高盘片激光器输出功率及提高光束质量的两个关键技术, 作者使用 LD 阵列通过光束耦合装置对非对称 Yb:YAG/YAG 复合晶体进行抽运, 获得了 80% 以上的抽运光吸收效率和较均匀的吸收分布, 这是一种简单高效的抽运方法; 还对这种抽运结构的散热装置结构进行了研究, 散热效率超过  $12 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$  的微喷式散热装置, 很好地解决了晶体的散热问题。根据实验结果显示, 在抽运吸收功率 750 W 时获得了 123 W 的连续光输出, 斜率效率达到 34.8%, 光束质量  $M^2 \approx 20$ 。这种边缘抽运方法在 LD 抽运盘片激光器的研究中有着很好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] STEWEN C, GONTAG K, LARIONOV M, *et al.* A 1 kW CW thin disk laser [J]. *Quantum Electronics*, 2000, 6(4): 650-657.
- [2] VETROVEC J. Active mirror amplifier for high-average power [J]. *Proc SPIE*, 2001, 4270: 45-55.
- [3] KRUPKE W F. Ytterbium solid-state lasers—the first decade [J]. *Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1287-1295.
- [4] LIU Q, FU X, MA D, *et al.* Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(10): 719-721.
- [5] GIESEN A. Results and scaling laws of thin disk lasers [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5332: 212-227.
- [6] RUTHERFORD T S, TULLOCH W M, SINHA S, *et al.* Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(13): 986-988.
- [7] VETROVEC J. Gain media for high-average power solid-state lasers [J]. *Proc SPIE*, 2003, 5120: 517-520.
- [8] BOURDET G L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(6): 966-971.
- [9] BRUESSELBACH H W, SUMIDA D S, REEDER R A, *et al.* Low-heat highpower scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers [J]. *Quantum Electronics*, 1997, 3(1): 105-116.
- [10] GU W Z. Enhanced heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1990: 239-247 (in Chinese).