



·激光器件·

一种具有大通光孔的碟片多程泵浦结构*

陈涵天^{1,2}, 董 静^{1,2}, 王海林^{1,2}, 朱广志^{1,2}, 朱 晓^{1,2}

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘 要: 提出了一种基于 4-f 成像的新型碟片多程泵浦方案。该方案由一片大抛物镜和两组转折棱镜组成多程泵浦的基本传输结构。这种方案拥有 0~90° 的理论通光孔径角, 比目前常见的泵浦结构方案的通光孔径角范围都更宽。在该方案中, 碟片上的泵浦光斑具有良好的重合性和锐利的边缘。该泵浦结构在注入 344 W、18 次泵浦的条件下实现了 141 W 的多模激光输出, 光-光转换效率达到 41%, 斜率效率接近 50%。

关键词: 碟片激光器; 多程泵浦; 4-f 成像系统; 光斑均匀性; 抛物面

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210278

A thin-disk multi-pass pump scheme with large laser aperture

Chen Hantian^{1,2}, Dong Jing^{1,2}, Wang Hailin^{1,2}, Zhu Guangzhi^{1,2}, Zhu Xiao^{1,2}

(1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. National Engineering Research Center for Laser Processing, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, a novel multi-pass pump scheme based on 4-f imaging is proposed. The scheme consists of a large parabolic mirror and two groups of folding prisms, which are the basic propagation structure of the scheme. The pump scheme has a theoretical aperture of 0–90° for laser transmission, which is wider than that of the commonly used pump schemes. The pump spot on the disk in the pump scheme has a good coincidence with sharp edges. With 344 W power injection and 18 times pumping, an average output of 141 W multi-mode laser is achieved. The optical to optical efficiency reaches 41%, and the slope efficiency is close to 50%.

Key words: thin-disk laser, multi-pass pump, 4-f imaging system, spot uniformity, parabolic mirror

因为碟片的背向散热特性, 碟片激光器能在高平均功率和大脉冲能量运转时仍保持稳定的基模输出^[1-2]。常见的小于 200 μm 的厚度使得半导体输出的泵浦光单次通过碟片时不能被完全吸收, 影响了碟片激光器的光-光转换效率, 所以人们研究了一种中继成像的方案, 能使光多次聚焦到碟片晶体上^[3]。这种泵浦方案通过演化, 已经形成了标准的模块化产品, 泵浦次数从 20 次增加到了 44 次^[4-6]。2015 年, K. Schuhmann 等人在这种模块的基础上进行优化, 设计出了多种变体, 有效提高了抛物面镜的填充率, 最多能够实现 54 次泵浦^[7]。2015 年, Y. Huang 等人提出了一种基于共轭双抛物面镜的泵浦模块方案, 这种方案也是一种变形的中继成像, 但是拥有更好的抗失调稳定性^[8], 基于这种泵浦结构的低生热碟片激光器^[9]和多程放大器^[10]也有报道。

但是这两种方案都有其缺点。第一种单抛物面上光斑环形排列(ADSP)方案中, 由于泵浦光在抛物面镜上的光斑排列成一个圆环, 所以允许的激光通行口径只能小于此圆环, 使得光路不能大角度入射碟片, 减小了谐振腔或放大器的自由度。另外, 由于模块内转折棱镜的轴线与 X 轴和 Y 轴存在夹角, 所以泵浦光斑每次打到碟片上都旋转了一个角度, 如果光斑是圆形则没有影响, 但如果光斑是多边形, 则所有光斑叠加之后就会变成一个边缘不规则的形状, 影响输出激光的模式。第二种双抛物面上光斑横向排列(RDDP)方案中, 泵浦光斑在抛物面镜上是沿 x 和 y 方向并列分布的, 所以激光出入的孔是一个腰形孔。理论上这个腰孔的宽度是不受限制的, 但是由于矫正镜的存在, 激光在该模块中不能小角度入射。另外, 模块的成本主要集中在抛物面镜的加工上, 该模块使用两片

* 收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2020-11-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0202500); 国家自然科学基金项目(61975060)

联系方式: 陈涵天, D201880624@hust.edu.cn。

通信作者: 朱 晓, zx@hust.edu.cn。

抛物面镜,大大增加了成本。

基于以上两种方案存在的缺点,我们提出了一种新型的泵浦模块方案。该方案由一片大抛物镜和两组转折棱镜组成多程泵浦的基本传输结构,其传输泵浦光的原理与前述的大抛物面镜+直角棱镜的技术方案类似。通过使光斑沿 x 方向平移而不是沿角向旋转,这种方案拥有 $0\sim 90^\circ$ 的理论通光孔径角,这一点很好地结合了前述两种泵浦结构的优点。但是这种设计也同时继承了二者的缺点:抗失调稳定性差和抛物面镜利用效率低。我们对该模块进行了测试,实验结果显示这种方案拥有均匀的泵浦光斑,其效率也可以与传统模块相比拟。根据其所具有的特点,该方案被称为单抛物面上光斑横向排列(RDSP)方案。

1 单抛物镜横向排列方案的结构设计

RDSP 方案泵浦模块的结构由图 1 可见,本结构的一个典型方案为 36 次泵浦,其中每 2 次泵浦代表在碟片上反射了一次。为了清晰明了地展示本设计的结构,图 1(a)省略了泵浦光传输的次数,完整的泵浦次数由图 1(b) 可以看出来。本结构包含有 1 个抛物面镜、1 个碟片、4 片大的 45° 反射镜和 2 片小的 45° 反射镜。碟片置于抛物面镜的焦点处,平行于抛物面镜光轴的光束都会聚焦到碟片上。上面的两片 45° 反射镜(蓝色)和下面的两片 45° 反射镜(绿色)构成两组转折棱镜,作用是使光束沿着 x 方向转折。小的 45° 反射镜(橙色)构成一组使光束沿 y 方向转折的棱镜。

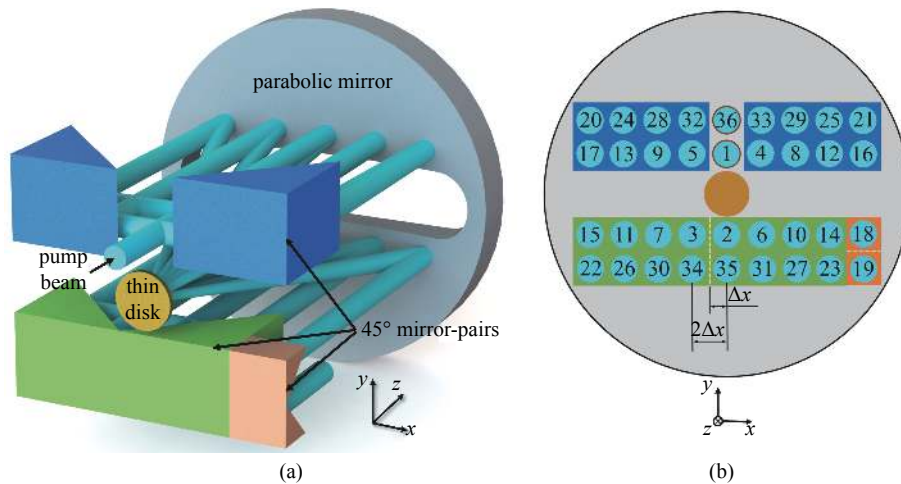


Fig. 1 (a) 3D structure and (b) front view of the RDSP pump scheme with 18 times pumping

图 1 经过 18 次泵浦的 RDSP 泵浦模块的 3D 示意图(a)和正视图(b)

由光纤耦合半导体输出的泵浦光束经过一个准直透镜组之后平行出射,并由“1”位置进入多程泵浦结构。光束平行于光轴入射到抛物面镜上,再通过抛物面镜聚焦在碟片上面。光束经由碟片反射后,再次打到抛物面镜上,最终沿着入射光束的反方向打到棱镜上。由于下面棱镜的棱线与碟片中轴线在 x 方向有 Δx 的偏离,于是光束经由直角棱镜之后会产生 $2\Delta x$ 的平移并平行出射。每次 $2\Delta x$ 的平移使得泵浦光束能够多次周期性地打到碟片上。 Δx 的偏移量使得该结构的对称性缺失,若没有 Δx ,泵浦光在循环一次之后就会由入射孔原路返回,而不是形成多程泵浦的结构。沿着 x 方向平移的光斑在到达棱镜边缘时,会被小直角棱镜转折到下一排。通过合理设计小直角棱镜的位置,可以得到更多的泵浦次数。

2 三种泵浦方案的对比

前文所述的 3 种泵浦模块的光路传输原理都是 4-f 成像原理,都能在碟片上得到高重合度的泵浦光斑。基于抛物面镜上不同的光斑排布模式,3 种泵浦方案在泵浦光斑边缘的锐利性、多边形光斑的重合度以及其他方面存在差异。

对高阈值的准三能级激光增益介质而言,边界清晰且分布均匀的泵浦区域是非常重要的^[7]。4-f 成像保证了光束每次入射到碟片上都有相同的尺寸,但大角度的倾斜入射使得碟片上的光斑边缘不能完全重合。这使得碟片上的光斑尺寸大于理论值,且光斑的强度分布不均匀,边缘变得模糊。RDDP 和 RDSP 两种方案中,由于抛物面镜上光斑平行排布,入射到碟片上的光束与 z 轴的夹角随光斑编号的变化而变化,于是碟片上的泵浦光斑边缘向 x 和 y 方向散开。对于 ADSP 方案,抛物镜上圆对称的光斑排布使得碟片上的泵浦光斑边缘沿径向散开。

在某些应用场景时,成像到碟片上的泵浦光斑呈正多边形的横向分布。例如,经过纤芯为正多边形的光纤匀化的泵浦光束,其成像到碟片上的光斑具有很好的平顶性,适用于高功率泵浦。这种情况下,要求光束在碟片上多次叠加之后依然能够保持正多边形的形状。对于此类应用场景,RDSP和RDDP的泵浦方案比ADSP的方案更具有优势。图2显示的是ADSP结构中多边形泵浦光斑经过12次叠加之后在碟片上呈现的光斑形状。可见,经过叠加后的光斑重合度较低,光斑形状发生变化,分布变得不均匀。为表述清晰,图中选用了正三角形的光斑。在实际应用中,正方形、正六边形和正八边形的泵浦光斑是常用的光斑形状。

除泵浦光斑的锐利程度和重合度以外,泵浦模块的抗失调性能、激光通行角度以及光束在每次泵浦中所经过的反射面次数等,都是衡量一个泵浦模块性能的重要指标。表1列出了3种不同泵浦方案的各个性能指标。可以看出,3种泵浦方案各有优缺点。相比于另外两种方案,RDSP的泵浦结构更加适用于需要激光通行角度范围较宽的情况。相比于RDDP方案,RDSP只需要1片大口径抛物面镜,成本也大大降低。

表1 3种泵浦方案的对比

Table 1 Comparison of the three pump schemes

evaluating indicator	ADSP	RDDP	RDSP
sharpness of pump spot	radially diffusion	diffusion in x and y direction	diffusion in x and y direction
pump spot shape that coincides perfectly	circle or regular polygon with appropriate angle	symmetric about x axis and y axis	symmetric about x axis and y axis
laser transmission angle	small angle only	small angle blocked	$0^\circ \sim 90^\circ$ in theory
anti-disturbance ability ^[8]	low	high	low
number of reflections on mirrors in a cycle	4	5	4
cost	low (one parabolic mirror)	high (two parabolic mirrors)	low (one parabolic mirror)
adjusting difficulty	high	low	medium

3 实验结果

我们对RDSP的泵浦模块的输出效率进行了测试。实验中使用的Yb:YAG碟片晶体掺杂浓度为7.5%,厚度为220 μm ,有效口径8 mm。泵浦源是光纤耦合输出的半导体激光器,输出波长为940 nm,最大输出功率为1000 W。碟片上的泵浦光斑为圆形,直径约为3.4 mm。实验采用平凹型谐振腔进行高阶模连续光的输出测试,测试结果如图3所示。结果显示,当注入泵浦功率达到344 W时,输出激光功率可达141 W,光-光转换效率达41%,斜率效率接近50%。

考虑到泵浦次数的限制,在实验中并未进一步增加泵浦功率。理论上,该泵浦结构与通用的ADSP泵浦结构相比,在输出激光的效率上没有区别。所以,通过增加泵浦次数和降低反射镜的损耗,可以进一步提升激光的输出效率。

4 结论

本文提出了一种基于单抛物面镜和两对直角棱镜的碟片多程泵浦方案(RDSP)。与国际上常用的泵浦方案(ADSP)相比,该方案具有碟片上多边形泵浦光斑重合度高、激光通行角度大的优点;与双抛物面镜的泵浦方案

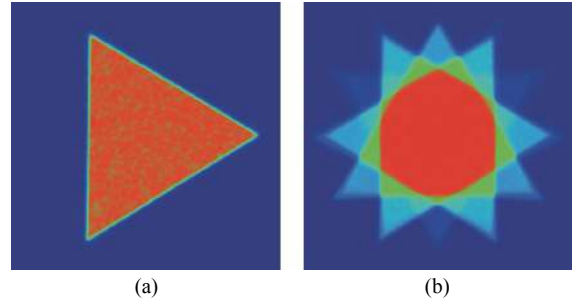


Fig. 2 Appearance of the spot of propagating (a) once (b) 12 times through the thin-disk for a triangle shaped pump spot

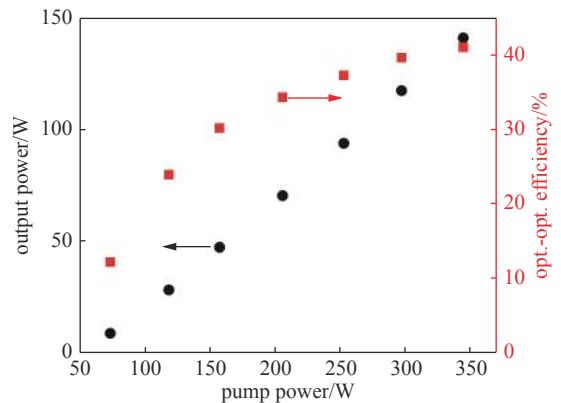
图2 三角形的泵浦光斑经过碟片(a)1次(b)12次之后所形成的光斑形状^[11]

Fig. 3 Experimental results of the output power and the optical to optical efficiency of the pump scheme

图3 泵浦模块输出功率与光-光转换效率测试结果

(RDDP)相比,该方案没有使用额外的球面反射镜来矫正光束的传输,具有更低的系统损耗和理论上 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的激光通行角度。然而,该结构方案同时也继承了ADSP方案抗失调稳定性差和RDDP方案抛物面镜利用率低的缺点。在效率方面,该模块在注入344 W、18次泵浦的条件下实现了141 W的多模激光输出,光-光转换效率达到41%。总而言之,本文所提出的碟片多程泵浦方案,是对现有的科研和商用碟片多程泵浦模块的补充,以满足碟片激光器以及放大器对更宽的激光通行角度和更高的泵浦光斑均匀性的要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 崔文达, 韩凯, 王红岩, 等. 半导体泵浦盘片激光器的技术发展[J]. *激光与红外*, 2016, 46(4): 387-393. (Cui Wenda, Han Kai, Wang Hongyan, et al. Recent advances of diode-pumped thin disk laser[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(4): 387-393)
- [3] Erhard S, Giesen A, Karszewski M, et al. Novel pump design of Yb: YAG thin disc laser for operation at room temperature with improved efficiency[C]//Proceedings of the Advanced Solid State Lasers. 1999.
- [4] Killi A, Zawischa I, Sutter D, et al. Current status and development trends of disk laser technology[C]//Proceedings of the SPIE 6871 Solid State Lasers XVII: Technology and Devices. 2008: 68710L.
- [5] Gottwald T, Stolzenburg C, Bauer D, et al. Recent disk laser development at Trumpf[C]//Proceedings of the SPIE 8547 High-Power Lasers 2012: Technology and Systems. 2012: 85470C.
- [6] Sven-Silvius S, Tina G, Vincent K, et al. Recent development of disk lasers at TRUMPF[C]//Proceedings of the SPIE 9726 Solid State Lasers XXV: Technology and Devices. 2016: 972615.
- [7] Schuhmann K, Hänsch T W, Kirch K, et al. Thin-disk laser pump schemes for large number of passes and moderate pump source quality[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9400-9408.
- [8] Huang Yan, Zhu Xiao, Zhu Guangzhi, et al. A multi-pass pumping scheme for thin disk lasers with good anti-disturbance ability[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4605-4613.
- [9] Song Enmao, Zhu Guangzhi, Wang Hailin, et al. Minimizing thermal load and stabilizing mode in Yb: YAG thin disk laser by 1030 nm multi-pass pumping[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(16): 1011-1014.
- [10] Chen Hantian, Song Enmao, Dong Jing, et al. Compact thin-disk multipass amplifier tolerant of strong disk thermal distortions[C]//Proceedings of CLEO: Science and Innovations 2020. 2020.
- [11] 黄彦. 碟片激光器泵浦均匀性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 90-93. (Huang Yan. The study of pumping uniformity in thin disk lasers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 90-93)