

文章编号: 0258-7025(2010)10-2437-04

薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究

蔡震¹ 王小军² 蒋建锋¹ 涂波¹ 靳全伟¹ 赵娜¹ 姚震宇¹ 唐淳¹

(¹ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
² 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要 均匀抽运及均匀冷却是激光二极管抽运激光器减小热致光学畸变以实现高光束质量输出的核心技术难题。通过开展键合薄片激光均匀抽运及均匀冷却技术的研究,采用透镜压缩结合波导匀化的设计思想,实现了 95% 以上的抽运均匀性。同时通过对薄片介质冷却通道的优化设计,实现了优于 96% 的温度分布均匀性。原理验证实验结果表明薄片介质的波前畸变得到了有效控制,当平均抽运功率密度为 230 W/cm² 时,忽略离焦效应后介质的反射波前畸变均方根值约为 0.35 μm。

关键词 固体激光器;增益分布;温度分布;光学畸变

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2437

Study of Uniform Pumping and Uniform Cooling on Thin Disk Laser

Cai Zhen¹ Wang Xiaojun² Jiang Jianfeng¹ Tu Bo¹ Jin Quanwei¹

Zhao Na¹ Yao Zhenyu² Tang Chun¹

(¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
² Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract Uniform pumping and uniform cooling are key techniques to reduce thermo-optical distortion and to achieve high beam quality output for solid-state laser. Uniform pumping and uniform cooling technique researches about bonding thin disk are carried out. Pumping uniformity of 95% is achieved by using lens compress and waveguide uniform pumping coupling frame. The temperature distribution uniformity is better than 96% through optimizing cooling channels. The experimental results show that the wave-front distortion of thin disk has been controlled effectively. The mean square root (RMS) of reflect wave-front distortion is about 0.35 μm ignoring the defocusing effect when the pumping intensity is 230 W/cm².

Key words solid-state laser; gain distribution; temperature distribution; optical distortion

1 引言

均匀抽运及均匀冷却是激光二极管抽运激光器减小热致光学畸变以实现高光束质量输出的核心技术难题^[1~7]。针对薄片激光器,从理论上讲由于其纵横比大、导热距离短、可实现轴向一维传热,从而大幅度改善激光介质内部的温度分布,减小热致光学畸变,有利于激光器的高光束质量输出。但根据具体实验研究的结果,发现薄片激光器要想真正实现一维的温度分布面临着许多的实际技术难题。

技术难点之一是薄片激光介质的高效均匀抽运技术,抽运光的加载特性直接影响到激光介质内部的热力学分布,当抽运光加载不均匀时必然会造成片状激光介质的径向温度梯度,从而加剧热致光学畸变。对于片状激光介质而言,常用的抽运方式是采用二维激光二极管阵列(LDA)对片状介质的端面进行抽运激励,这要求抽运光源本身具有较高的均匀性,但激光二极管阵列的光强分布往往是超高斯分布,其均匀性很难满足使用要求,因此必须对激

收稿日期: 2009-11-30; 收到修改稿日期: 2009-12-21

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890201)资助课题。

作者简介: 蔡震(1970—),男,博士,副研究员,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术的研究。

E-mail: caizhen513@sohu.com

光二极管阵列的发射光进行整形。影响薄片激光介质温度分布的另一个重要因素是介质的高效均匀冷却,为了实现这一点常用的技术途径是将介质焊接在带冷却微通道的金属热沉上,但焊接过程需在高温状态下对介质表面施加高压,这会在介质内部形成复杂的应力分布,因此焊接完成后介质表面会产生不规则形变从而带来复杂的高阶相差,不利于薄片激光器的高光束质量激光输出。

本文对键合薄片激光器的均匀抽运和均匀冷却技术进行了优化设计,得到了较好的抽运均匀性和温度分布均匀性。

2 键合薄片悬浮式工作方式

为了改善薄片激光介质的抽运均匀性并减小焊接过程不规则形变带来的影响,提出了一种背面抽运、背面冷却的薄片支撑工作方式,如图 1 所示。薄片增益介质采用悬浮式支撑结构,其径向采用 O 型橡胶圈密封固定在沟槽支架中,介质前表面镀 1064 nm 的消反膜和 808 nm 的高反膜,背面镀 1064 nm 的全反膜和 808 nm 的消反膜,抽运光穿过冷却液从介质背面入射,在介质上表面反射后两通吸收。设计中为了防止悬浮式支撑结构造成激光介质产生较大变形,在增益介质的大面上键合了一块厚度为 4.5 mm 的同口径白 YAG 以增加弯曲强度,同时在介质的上表面施加了一定的气压,气体压力略小于水压以保证冷却水的密封。

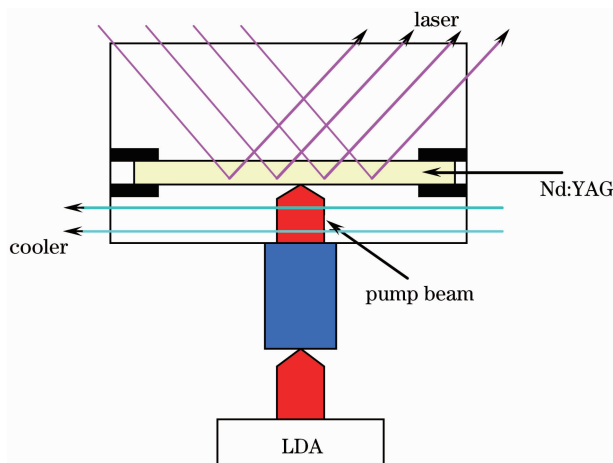


图 1 悬浮式薄片激光器

Fig. 1 Scheme of suspension disk laser

3 耦合系统优化设计

为了减少抽运不均匀对激光介质波前畸变带来

的影响,开展了抽运与耦合系统的优化设计。研究中采用光波导结构对经柱透镜压缩后的抽运光斑进行匀化,光斑在通过波导后根据反射角的不同被分割成小光斑,小光斑在波导的出口端进行强弱互补叠加,最终在波导的输出端实现空间光强的均匀分布。

采用波导匀化的耦合系统组成如图 2 所示,激光二极管阵列通过一对正交柱透镜聚焦后进入到光波导中,通过光学追迹对波导的长度及口径进行优化设计,数值模拟出的波导出口处的光斑分布如图 3 所示,其光斑空间强度分布的均匀性约为 95%。

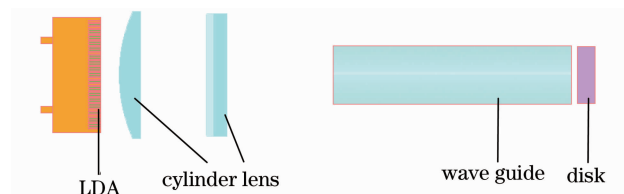


图 2 激光器匀化耦合系统

Fig. 2 Uniform coupling system

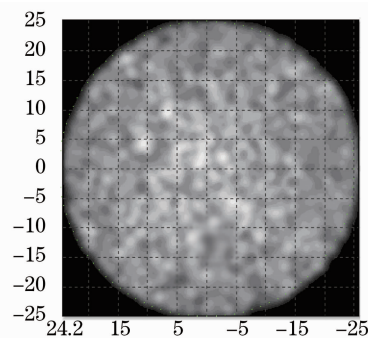


图 3 匀化光斑模拟结果图

Fig. 3 Simulation result of uniform light spot

4 键合薄片冷却条件设计

为了实现薄片增益介质高效均匀冷却,研究中对冷却装置的流场构型进行了设计,使用 CFX 软件计算了冷却流场对 Nd:YAG 键合薄片的冷却效果,模拟条件为:冷却截面为 100 mm × 100 mm,激光介质口径为 40 mm,介质下表面与冷却通道持平(如图 4 所示)。不同流速及不同流层厚度下激光介质冷却面的平均对流换热系数见表 1,可以看到,平均对流换热系数随着流层厚度的增加而减小,随着流层流速的增大而增大。当流层厚度为 2 mm,流速为 4 m/s 时,冷却面的对流换热系数分布见图 5,流场在冷却面的对流换热系数处于 2.00~2.25 W/(cm²·K)之间,均匀性达到 96%[均方根(RMS)]。

表 1 平均对流换热系数随流场参数的变化关系
Table 1 Average convection coefficient with different fluent paramters

Liquid thickness /mm	2			3			4		
V /(m/s)	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Convection coefficient /[W /(cm ² · K)]	1.20	1.68	2.15	1.10	1.55	2.0	1.07	1.52	1.94

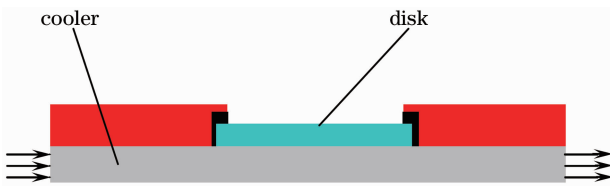


图 4 冷却模型

Fig. 4 Module of cooling

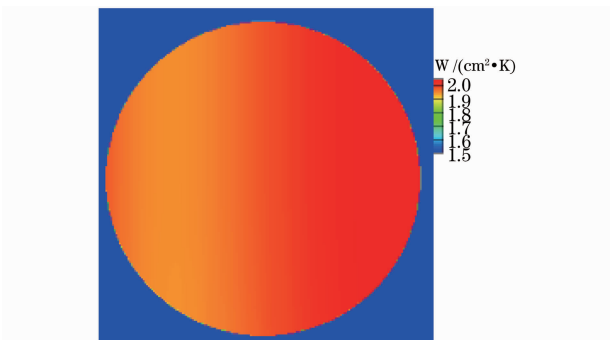


图 5 晶体冷却面对流换热系数分布

Fig. 5 Simulation result of convection coefficient

图 6 为当平均抽运功率密度为 230 W/cm² 时键合薄片表面温度分布数值模拟结果。模拟结果显示在采用上述冷却结构后介质上表面的平均温升约为 100 ℃, 上表面最大温差约为 5 ℃, 温度分布均匀性优于 95%(RMS)。

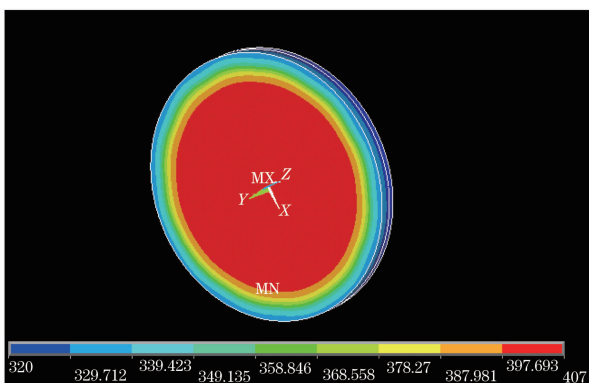


图 6 平均抽运功率密度 230 W/cm² 时, 键合薄片上下表面的温度分布

Fig. 6 Simulation result of temperature-distribution with average pumping power of 230 W/cm²

5 键合薄片原理验证实验

根据对键合薄片的理论设计结果, 研究中利用

峰值抽运功率为 20 kW 的 LDA 对直径 40 mm, 厚度 6 mm 的键合薄片进行了原理验证实验, 薄片掺杂区厚度为 1.5 mm, 白 YAG 厚度为 4.5 mm(掺杂原子数分数为 2%, 双通吸收效率约为 92%,)。图 7 为激光介质荧光分布的测试结果。实验结果表明在采用匀化系统后激光介质的荧光分布得到大幅度改善, 其均匀性优于 94%(RMS)。这一点与理论设计的结果基本相符。实验中进一步采用红外热像仪测量了介质表面的温度分布(红外热像仪的测温范围为 50~150 ℃, 精度为 ±2 ℃), 当占空比为 15% 时(重复频率为 600 Hz, 抽运脉宽为 250 μs)介质的平均抽运功率密度为 230 W/cm², 测试结果显示此时介质的上表面的平均温度为 105 ℃, 径向温差小于 5 ℃, 温度分布均匀性优于 96%(RMS), 其冷却均匀性也与理论设计的结果相符。

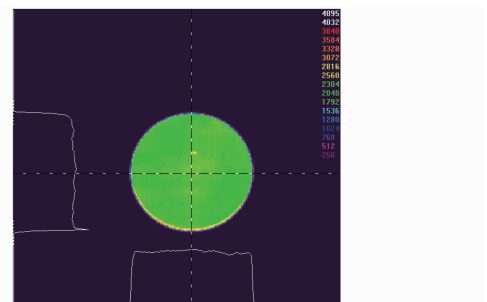


图 7 匀化光斑实验结果

Fig. 7 Experimental result of uniform light spot

在抽运均匀性、冷却均匀性得到大幅度改善的情况下, 实验中利用哈特曼检验法测试了介质的热致波前畸变情况。图 8 为 15% 占空比下, 焊接薄片与悬浮式键合薄片的热致波前畸变测量结果。在忽略倾斜和离焦效应后, 焊接薄片的热致光学畸变峰谷(PV)值约为 8.7 μm, RMS 值约为 1.7 μm, 而悬浮式薄片的热致光学畸变 PV 值约为 1.7 μm, RMS 约为 0.35 μm。对比可以看出后者在抽运均匀性、冷却均匀性得到改善后, 热致光学畸变得到了大幅度抑制, 且从光学畸变的空间分布上来看(图 9), 构成悬浮式键合薄片波前畸变的主要原因是低阶的离焦效应, 其占到了整个波前畸变的 90% 以上的权重。这也意味着悬浮式薄片只要采用常用的透镜补偿就有可能实现高光束质量的激光输出, 而焊接薄

片由于其波前畸变的高阶相差严重, 仅仅采用被动补偿的方法是很难实现高质量的激光输出的。图 10 为稳腔状态下不同占空比时单片悬浮式薄片

的功率输出情况, 当占空比为 15% 时实现了 1080 W 的激光输出, 光-光转换效率约为 33%。

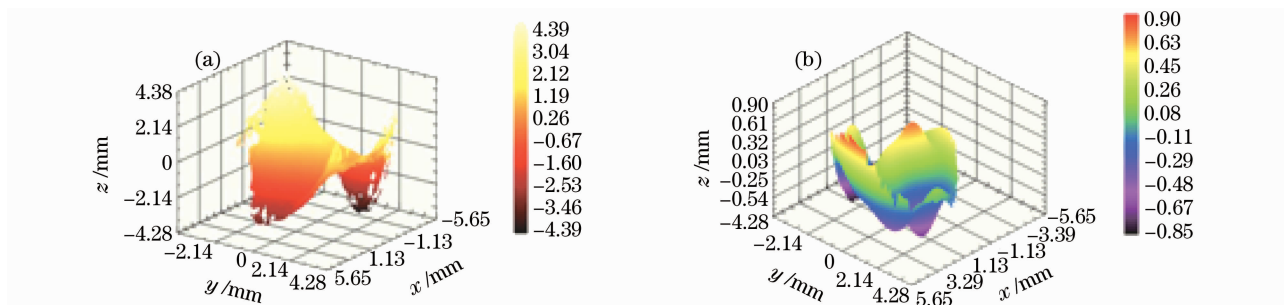


图 8 薄片热致光学畸变。(a)焊接薄片,(b)悬浮式薄片

Fig. 8 Thermal optical distortion of thin disk. (a) weld disk, (b) suspension disk

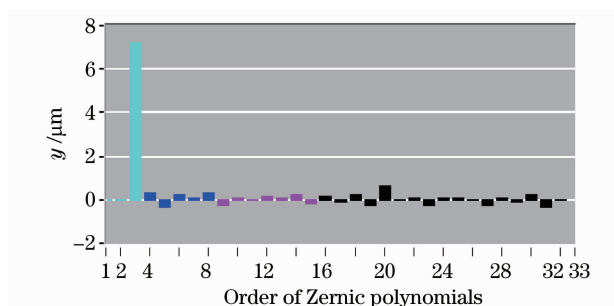


图 9 光学畸变的分布

Fig. 9 Distribution of optical distortion

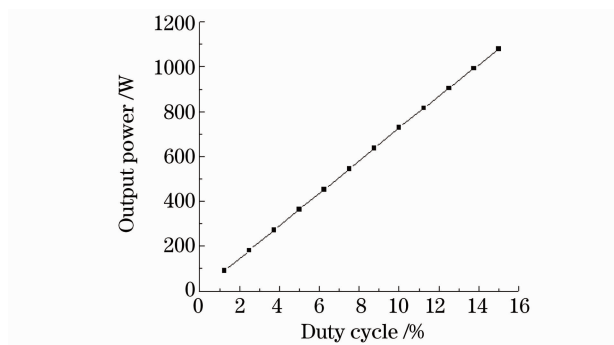


图 10 单片介质输出功率测试结果

Fig. 10 Experimental result of output power of single medium

6 结 论

为了改善薄片激光介质的抽运均匀性并减小焊接过程中不规则形变带来的影响, 提出了一种背面抽运、背面冷却的薄片支撑工作方式, 在此基础上开展了键合薄片激光均匀抽运及均匀冷却技术研究, 抽运耦合结构采用了透镜压缩结合波导匀

化的设计思想, 实现了 95% 以上的抽运均匀性, 同时通过对薄片介质冷却通道的优化设计, 实现了优于 96% 的温度分布均匀性, 进一步的实验结果表明薄片介质的热致波前畸变得到了有效控制。

参 考 文 献

- 1 Vetrovec John. Active mirror amplifier for high-average power [C]. *SPIE*, 2001, **4270**: 45~55
- 2 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser[J]. *Laser and Particle Beam*, 1998, **16**(4): 605~625
- 3 Cai Zhen, Cao Dingxiang, Jiang Jianfeng *et al.*. Dynamic optical distortion of laser medium in heat-capacity laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1610~1614
蔡 震, 曹丁象, 蒋建峰等. 热容模式下激光介质的动态光学畸变[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1610~1614
- 4 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Kilowatt class laser diodes-pumped solid state heat capacity laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 153~156
蔡 震, 胡 浩, 蒋建峰等. 千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 153~156
- 5 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Operation condition optimization of laser medial heat-capacity laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s1): 89~92
蔡 震, 胡 浩, 蒋建峰等. 热容模式下激光介质工作条件的优化[J]. *中国激光*, 2006, **33**(s1): 89~92
- 6 Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin *et al.*. 160 W diode pumped EO Q-switched master oscillator power amplifier green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1455~1458
唐 淳, 高清松, 童立新等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1455~1458
- 7 Cai Zhen, Jiang Jianfeng, Hu Hao *et al.*. Kilowatt high power heat capacity laser with 3 times diffraction limit[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2266~2271
蔡 震, 蒋建峰, 胡 浩等. 千瓦级 3 倍衍射极限的高功率热容激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2266~2271