

文章编号: 100124322(2004)0921116203

100W 二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器^X

姚震宇^{1,2}, 吕百达¹, 涂波², 蒋建锋², 童立新², 武德勇², 高清松², 陈晓琳²

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 报道了一台高效率二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器, 采用高效均匀泵浦耦合技术, 在峰值功率 1.008kW, 占空比 25%, 电光效率大于 45% 的二极管激光阵列泵浦下, 用一块 1mm 厚的 Nd:YAG 薄片激光介质, 获得了峰值功率 404W, 平均功率 101W 的准连续激光输出, 光光效率达到 40%, 电光效率超过 18%。

关键词: 二极管泵浦; 高效率; 薄片激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

随着二极管激光器及其泵浦的固体激光器技术取得迅速发展, 高功率二极管泵浦固体激光器^[1,2]在工业、科研等领域显示了越来越巨大的应用前景。高平均功率固体激光器面临的巨大挑战是沉积在激光介质里的废热。废热的消除过程将导致热透镜、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。

对于固体激光介质的三种主要构型: 圆棒、板条和薄片, 圆棒最易产生径向温度梯度, 从而产生热透镜效应和由热致双折射引起的退偏效应。“之”字形板条^[3,4]很大程度上克服了圆棒的缺点, 板条中的热流近似为一维分布, “之”字形方向只存在微弱的热透镜效应, 并基本消除了热致应力双折射。但板条激光器存在两个主要缺点: 一是光束在板条宽度和厚度方向有像散, 二是其定标放大受到厚度的限制。采用薄片激光器^[5,6]设计可以允许介质具有高的泵浦功率密度而不产生显著的温度梯度, 当泵浦区尺寸远大于薄片厚度时, 热流可认为是沿厚度方向的一维分布。合理设计泵浦耦合结构, 可以使薄片径向温度分布近似均匀, 从而大大降低介质的热透镜效应和热致应力双折射。因此薄片激光器可以定标放大到很高的平均功率。

我们研制了一台高转换效率的 Nd:YAG 薄片激光器, 采用一块直径 <13mm, 厚度 1mm 的 Nd:YAG 薄片, 用输出功率 1.008kW 的连续激光二极管阵列泵浦, 在 25% 占空比下运行, 获得了高功率激光输出。

1 薄片激光器设计

目前, 国内 Nd:YAG 晶体的掺杂浓度可达到 1.4%, 选择 1mm 厚的 Nd:YAG 薄片, 使得泵浦光经 4 通后的吸收效率达到 80%, 同时可降低 8 通或 16 通耦合的工程难度, 有利于激光器的定标放大。泵浦区的面积根据平均泵浦功率和薄片的断裂极限来设计。

对单面冷却的薄片, 介质允许吸收的最大热功率为^[7]

$$P_{\max} = 3 R b S / l \quad (1)$$

式中: R 是 Nd:YAG 的热冲击参数, 为 11W/cm; b 为安全工作系数; S 为泵浦区面积; l 为薄片厚度。

介质吸收泵浦光功率所产生的热功率为

$$Q = \epsilon_0 a P \quad (2)$$

式中: P 为二极管激光器阵列输出的最大平均泵浦功率, 为 252W; ϵ_0 为泵浦耦合系统的耦合效率, 经测量约为 85%; a 为激光介质对泵浦光的吸收效率, 经计算约为 80%; $\epsilon_0 a$ 为 Nd:YAG 介质的产热比, $\epsilon_0 a = 0.32$ ^[8]。

将安全工作系数设计为 0.5, 根据公式(1)和(2)可以求出泵浦区面积约为 0.34cm²。为保证输出激光在两个方向的尺寸基本一致, 由 1.064 μ m 激光在薄片介质上的入射角(35 $^\circ$)可以确定泵浦区尺寸, 约为 6.5mm \times 5.3mm。

薄片的小信号增益系数经计算为 5cm⁻¹, 实验测得腔内损耗约为 1.0%, 由固体激光谐振腔理论可以算出采用透过率约为 10% 的输出耦合镜, 光光转换效率约为 40%。

X 收稿日期: 2004202220; 修订日期: 2004205224

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 姚震宇(1965—), 男, 博士研究生, 副研, 主要从事高功率二极管泵浦固体激光器研究; 绵阳 91921013 信箱。

研制薄片激光器最为关键的技术是均匀泵浦技术和薄片的散热冷却技术,这两个技术既是实现热流一维分布,消除热透镜效应的关键,也是减小薄片应力,防止薄片断裂的关键。

薄片的散热冷却采用铜微通道冷却器。薄片介质前表面镀泵浦光和激光的增透膜,后表面(冷却面)先镀这两种光的全反膜,再镀 Ti, Pt, Au 实现金属化,最后采用钎焊工艺将薄片焊接在铜热沉上,以减小激光介质与冷却器之间的热阻,提高散热冷却效率,同时有利于薄片的自由膨胀,防止薄片断裂。

均匀泵浦技术采用柱透镜 4 通耦合结构。面阵二极管激光器快轴方向先经微柱透镜准直,再用快轴柱透镜对近平行光进行压缩,慢轴方向采用柱透镜对泵浦光进行成像。快轴柱透镜焦距为 84mm,通光口面积为 41mm × 13mm;慢轴柱透镜焦距为 30mm,通光口面积为 28mm × 20mm。采用一个球面反射镜对薄片未吸收完的光再次反射,实现泵浦光的 4 通,以提高薄片的吸收效率。球面反射镜的设计要求是在薄片上快慢轴方向的泵浦光有一共焦面。

由于二极管阵列是沿快轴方向一维堆叠,在慢轴方向只有一个二极管单元线阵,因此泵浦光沿慢轴方向经柱透镜成像后,在薄片上形成比较均匀的分布。影响泵浦光快轴方向均匀性的因素主要有:二极管阵列输出的激光经微柱透镜准直后分布的均匀性,准直激光的发散角,以及快轴柱透镜的像差。采用质地较硬的钨铜合金微通道冷却器,保证冷却器面形,提高输出光强度分布的均匀性,并在考虑快轴柱透镜像差的条件下,通过光线追迹法对准直激光的发散角进行优化设计,在发散角约为 2.5 时,泵浦光基本上为平顶分布。图 1 是计算结果,图 2 是 CCD 记录的 Nd:YAG 薄片的荧光分布。

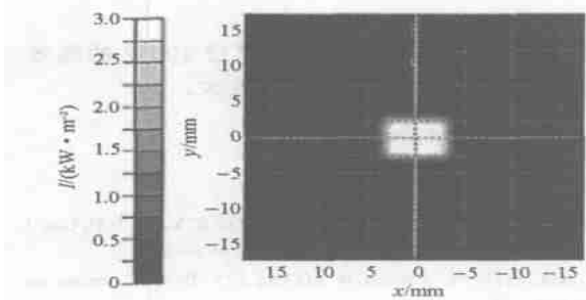


Fig. 1 Calculated intensity profile of pump laser
图 1 泵浦均匀性计算结果

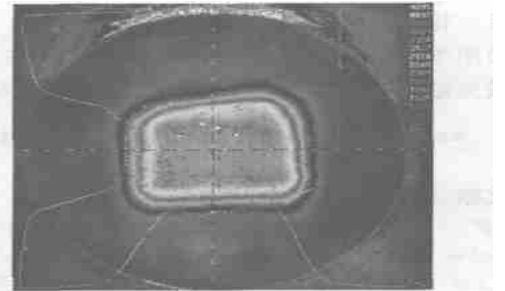


Fig. 2 Measured fluorescence profile of disk
图 2 CCD 记录的 Nd:YAG 薄片荧光分布

2 实验及结果

薄片激光器实验装置如图 3 所示。泵浦光和激光的入射角均为 35°,分别从两个相互垂直的方向入射。谐振腔采用平凹稳定腔,腔长 500mm。全反镜采用曲率半径 $R = 5m$ 的凹面镜,输出镜采用透过率 10% 的平面镜。薄片由一个激光二极管阵列模块泵浦,二极管阵列由 24 个连续二极管单元线阵组成,每个线阵的输出功率为 42W,总的输出功率为 1.008kW,电光效率超过 45%。由于薄片上所能承载的热功率密度受到薄片断裂极限的限制,而在薄片厚度一定的情况下,小信号增益系数与峰值泵浦功率密度成正比,因此激光器在准连续运行时的小信号增益系数远大于连续运行时的小信号增益系数,所以我们采用准连续运行方式,以提高光光转换效率。

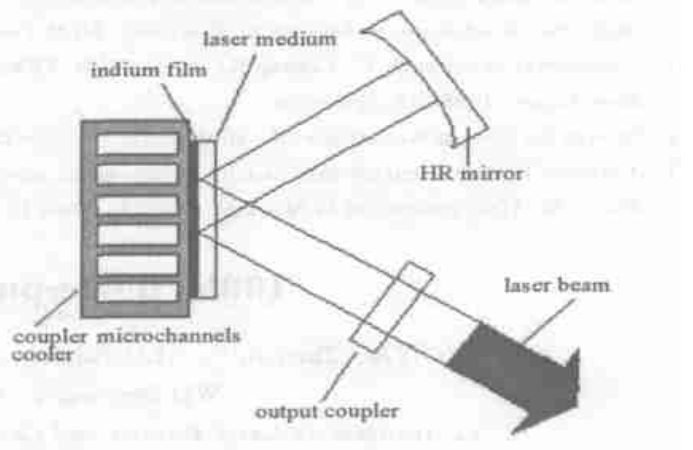


Fig. 3 Schematic of disk laser
图 3 薄片激光器实验装置示意图

激光二极管阵列在重复频率 1kHz,脉冲宽度 250μs 下工作。在不同泵浦功率下,测量了激光器的输出功率。图 4 是输出平均功率随泵浦功率的变化曲线,图 5 是光光效率随泵浦功率的变化曲线。在峰值泵浦功率 1.008kW,平均泵浦功率 252W 时,输出峰值功率 404W,平均功率 101W,光光效率达到 40%,与理论计算值相符。采用美国 Spiricon 公司的 M^2200 测试仪测得的光束质量 M^2 因子约为 $M_x^2 = 10.5, M_y^2 = 10.8, x$ 为慢

轴方向, y 为快轴方向。光束质量不高是由多模振荡造成的, 采用非稳腔可以增大基模体积从而提高光束质量。但非稳腔适合高增益激光器, 在单薄片激光器中由于增益较低, 只能采用稳定腔。多个薄片的定标放大可以采用非稳腔提高光束质量。

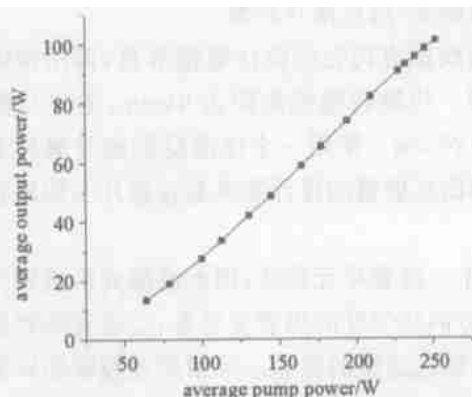


Fig. 4 Average output power vs pump power

图4 输出平均功率随泵浦功率的变化曲线

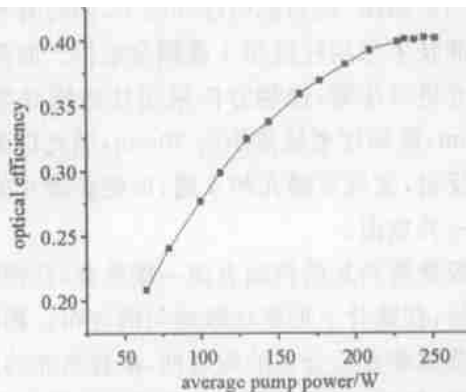


Fig. 5 Optical efficiency vs pump power

图5 光-光效率随泵浦功率的变化曲线

4 结论

采用激光二极管阵列泵浦单个 Nd:YAG 薄片, 实现了峰值功率超过 400W, 平均功率超过 100W 的高效率的激光输出, 电光效率超过 18%。该系统可以通过扩大薄片直径和增加片数来实现定标放大。

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

参考文献:

- [1] 姚震宇, 吕百达, 高剑蓉, 等. 高功率二极管泵浦腔内倍频激光器[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10):963—965. (Yao Z Y, L ü B D, Gao J R, et al. High power diode pumped intracavity doubled laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(10):963—965)
- [2] 王卫民, 姚震宇, 庞毓. 百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究[J]. 中国激光, 2004, A31(s):5—7. (Wang W M, Yao Z Y, Pang Y. Study on DPL technology of hectowatt green laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, A31(s):5—7)
- [3] 王卫民, 高青松, 尹湘宁, 等. 二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 双板条激光器[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(5):527—530. (Wang W M, Gao Q S, Yin X N, et al. Diode laser arrays side pumped double slab. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(5):527—530)
- [4] 蔡震, 杨成龙, 杨森林, 等. 板条侧面绝热技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(4):493—496. (Cai Z, Yang C L, Yang S L, et al. Study on the adiabatic technology of slab laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4):493—496)
- [5] Karszewski M, Brauch U, Contag K, et al. 100W TEM₀₀ operation of Yb:YAG thin disc laser with high efficiency[J]. *Advanced Solid State Laser*. 1998, 19:296—299.
- [6] Stewen C, Contag K, Larinov M, et al. 12kW CW thin disk laser[J]. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electr*, 2000, 6(4):650—657.
- [7] Vetrovec J. Active mirror amplifier for high average power[A]. Proc of SPIE[C]. 2001, 4270:45—55.
- [8] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG[J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1993, 29(6):1457—1459.

100W diode pumped Nd:YAG disk laser

YAO Zhenyu^{1,2}, LA Bai², TU Bo², JIANG Jianfeng², TONGLiXin²,
WU DeYong², GAO QingSong², CHEN XiaoLin²

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 91921013, Mianyang 621900, China)

Abstract: A diode pumped Nd:YAG disk laser with high efficiency is reported. A four pass optical coupling system is well design to obtain a nearly flat top pump profile. An average output power of 101 W is achieved from one single disk with a thickness of 1mm. The average pumping power of the diode laser array is 252W with an electrical to optical efficiency of more than 45%. The optical efficiency of the laser system is 40% and the electrical to optical efficiency is more than 18%.

Key words: Diode pumped; High efficiency; Disk laser