

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0038-03

二维阵列二极管抽运的高功率 Nd:YAG 薄片激光器

唐淳, 涂波, 蒋建峰, 高松信, 高清松, 姚震宇, 武德勇

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 介绍了适合高光束质量高平均功率的薄片型 DPL 原理, 给出了设计原则并进行了实验。激光介质采用 Nd:YAG, 厚 1 mm, 增益区面积 5 mm×7 mm, Nd 掺杂浓度 1.4%。用自行研制的 CW 1 kW 铜微通道冷却二维阵列二极管激光抽运源, 在 20% 占空比 Q-CW 抽运下, 获得 397 W 输出, 光-光转换效率 39.3%。

关键词 激光技术; 二维阵列二极管激光器; 抽运; 薄片激光; 高平均功率

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

High Power Nd:YAG Thin Disk Laser Pumped by 2D-Stacks Diode Array

TANG Chun, TU Bo, JIANG Jian-feng, GAO Song-xin, GAO Qing-song,

YAO Zhen-yu, WU De-yong

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The principle of high-brightness and high-average-power thin-disk laser is introduced and the design principle is put forward. The experiment is carried out with Nd:YAG of 1 mm thickness and 1.4% Nd doping pumped by home-made CW 1 kW 2D-stacks diode array. The pump gain area is 5 mm×7 mm. The peak output power of 397 W is achieved with 39.3% optical to optical efficiency at 20% duty cycle Q-CW running mode.

Key words laser technique; 2D-stacks diode laser; pump; thin disk laser; high-average power

1 引言

近 10 年来, 激光二极管抽运固体激光(DPL)技术取得飞跃发展, 中小功率的 DPL 已在半导体加工、打印、仪器和科学研究等领域得到广泛应用并快速成为主要的激光光源。高功率 DPL 技术水平在工业加工及军事应用需求的推动下得到了大幅度提高, 平均数千瓦的 DPL 材料加工机已有系列产品。但固体激光向高功率发展时受到激光介质热效应限制, 光束质量难以做好。如千瓦级的棒状 DPL 产品, 光束质量 M^2 一般均为数十至上百。板条激光克服了棒状介质存在的径向温度梯度缺点, 光束质量得到一定改善。但高功率所需的大尺寸、大宽/深比板条介质导致了放大自发辐射及自激振荡现象, 严重限制了激光效率, 并且增加了成本和加工难度。近年快速发展的一种薄片型激光设计, 克服了传统棒状及板条构型激光的缺点, 有效解决了固体激光介质热效应问题, 在高亮度高平均功率 DPL 上有很好的发展前景^[1,2]。德国 Giesen 教授数值模拟了单个

薄片介质输出 10kW 的可行性, 美国 John Vetrovec 教授概念设计了 100kW 的薄片激光器, 分析了薄片激光向超高平均功率发展的潜力和优势^[3]。目前, 平均功率千瓦($M^2 \sim 10$)的薄片激光器已有产品, 实验室输出达到 4 kW。

本文介绍了薄片激光的基本原理, 分析讨论了薄片激光器设计原则并给出了实验研究结果。

2 薄片型激光器原理

传统的固体激光设计中激光介质热流方向是与光轴垂直的, 介质温升形成的热梯度导致热透镜及热致双折射现象, 引起激光光束质量变差, 输出功率下降, 严重时造成激光介质断裂。薄片激光将激光介质设计为 0.2 mm~2.5 mm 厚的圆盘, 薄片直径远大于厚度。薄片的一个端采用高效冷却器充分散热冷却, 另一端为抽运光和激光的输入面。当均匀抽运及抽运面积远大于薄片厚度时, 激光介质的热流方向近似为平行激光光轴的一维情况, 有效减

小了光学畸变。薄片介质的两个表面分别镀对抽运光和激光的全反膜(冷却面)及增透膜,薄片介质的全反面与输出镜构成谐振腔,如图1所示。这种设计十分适合高光束质量高平均功率 DPL 工作。

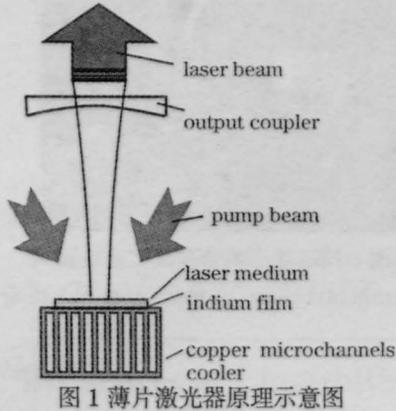


图1 薄片激光器原理示意图

Fig.1 Theoretic schematic diagram of thin disk laser

薄片激光的定标放大通过增大激光介质口径及串接多个薄片来实现,原理如图2所示。激光介质的一维热流分布特性保证了提高抽运功率时光束质量不下降。但抽运直径加大会增加介质的应力及放大自发辐射(ASE),限制了单片介质可提取的最大功率。

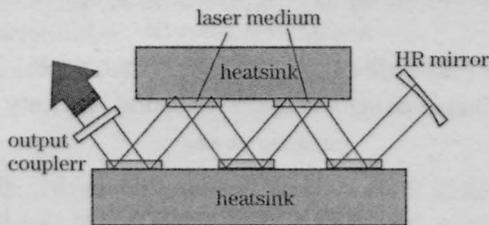


图2 薄片激光定标放大原理

Fig.2 Scalable theory of thin disk laser

3 薄片型激光器设计原则

薄片介质断裂极限及放大自发辐射是限制薄片激光输出的两个关键因素。激光介质的最大口径受限于放大自发辐射,而最大厚度由介质断裂极限决定。对单面冷却的薄片,允许的最大热功率为:

$$P_t = 3\gamma R_s \left(\frac{S}{t} \right) \quad (1)$$

式中 R_s 为激光介质的热冲击参量, S 为薄片的面积, t 为薄片的厚度, γ 为安全工作系数,一般设计为 0.25~0.5。则薄片允许的最大抽运功率为:

$$P_p = \frac{P_t}{\eta_c \eta_a \eta_n} \quad (2)$$

式中 η_c 为抽运耦合系统效率, η_a 为介质对抽运光的吸收率, η_n 为激光介质的产热比,根据抽运功率及应用的激光介质,由(1),(2)式即可合理设计薄片介质的最佳几何参量。

4 高平均功率二维叠阵抽运源

根据薄片激光实验要求,研制了基于铜微通道冷却器的高平均功率叠阵二极管激光器,其中铜微通道冷却器是实现 CW 及高占空比 Q-CW 运转的关键器件。冷却器材料为无氧铜,设计为 5 层结构,各层中的液体通道采用精密线切割加工,之后焊接成整体。冷却器尺寸为 1.5 mm(厚)×11 mm×25 mm,内部通道宽 0.15 mm,深 0.4 mm,在压力~2 atm,流量 0.5 L/m 时,热阻为 0.35 °C/W。图 3 是研制的铜微通道冷却器。

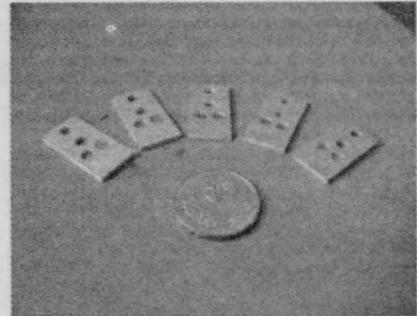


图3 铜微通道冷却器

Fig.3 Picture of copper micro-channels cooler

采用铜微通道冷却器堆叠封装了 CW 1 kW 叠阵二极管激光器。叠阵由 25 个 CW 40 W 的激光二极管条组成,条之间间距 1.7 mm,发光区面积 10 mm×41 mm,在工作电流 52 A,电压 46 V 时,输出 1004 W,电-光转换效率 42%,中心波长 808 nm (20 °C),谱线宽度 <2.2 nm。叠阵快轴方向经微透镜阵列准直后发散角 <1.5°。图 4(a)是带快轴准直透镜的 1 kW 叠阵二极管激光器。图 4(b)是 CCD 记录的远场光强分布。

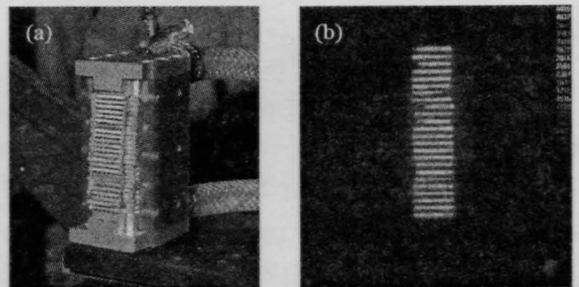


图4 CW 1kW 二维叠阵二极管激光器。(a) 快轴准直的激光器,(b) CCD 记录的激光强度分布

Fig.4 CW 1 kW 2D-stacks diode laser array. (a) With fast axis collimation; (b) Intensity distribution of output recorded by CCD

5 抽运耦合系统设计

目前薄片激光的激光介质普遍采用 Yb:YAG 晶体,厚度为 0.2~0.4 mm,抽运光通过光纤耦合及多

次通过激光介质实现均匀抽运和充分吸收,抽运耦合系统效率低且结构复杂。

本文采用 Nd:YAG 激光介质,二维叠阵二极管激光抽运源及四通抽运耦合系统设计,大幅度简化了薄片激光结构。图 5 是实验设计的 4 通抽运耦合系统。二极管激光经快轴准直后通过一对正交柱透镜整形,抽运区面积大小根据抽运功率和激光介质厚度由(1)(2)式确定。抽运光通过介质背面反射二次穿过介质,由反射镜对抽运光再次成像及介质背面的再次反射实现抽运光四次通过激光介质。抽运光在 X-Y 平面内与增益介质的法线夹角为 35° ,同时球面反射镜也与增益介质法线成 35° 。激光沿 X-Y 平面传播,传播方向与增益介质法线成 45° 。

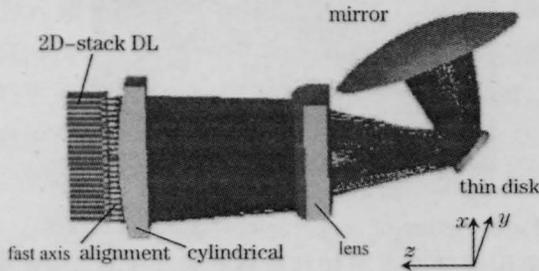


图 5 四通耦合系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of four-pass pumping optics

薄片介质对抽运光的吸收率表示为:

$$\eta_a = (1 - e^{-\alpha t})(1 + R_k e^{-\alpha t})(1 + R_p R_k e^{-2\alpha t}) \quad (3)$$

式中 R_k 为薄片背面反射率, R_p 为第二次成像系统的效率, t 为薄片厚度, α 为激光介质吸收系数。

通过合理设计激光介质厚度、掺杂浓度及抽运系统参量,抽运光利用率可 $>80\%$ 。

6 薄片激光实验结果

实验中 Nd:YAG 薄片介质厚 1 mm, 直径 13 mm, Nd 掺杂浓度 1.4%。薄片全反面对 808 nm 抽运光的反射率 $\geq 99\%$, 对 1.064 μm 激光的反射率 $\geq 99.9\%$, 消反膜对 808 nm 剩余反射率 $\leq 0.5\%$, 对 1.064 μm 剩余反射率 $\leq 0.2\%$, 整个抽运耦合系统的效率为 85%。激光增益区面积 5 mm \times 7 mm。谐振

腔采用平凹腔,腔长 500 mm,全反射镜曲率半径 $R=1200$ mm,输出镜透过率 10%。

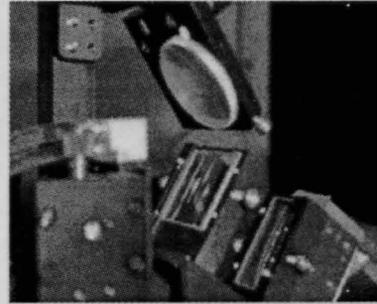


图 6 四通抽运耦合系统实验装置

Fig.6 Experimental setup of four-pass pumping optics

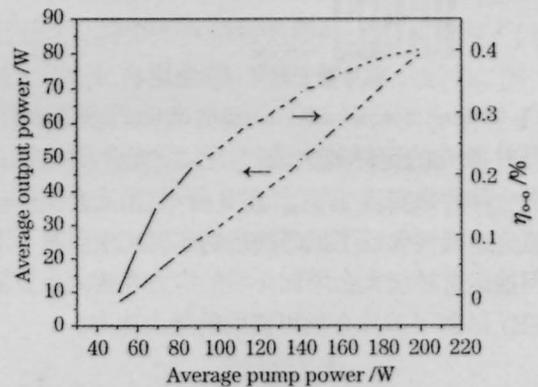


图 7 输出功率、光-光转换效率与抽运功率曲线

Fig.7 Output power and optical to optical efficiency vs pumping power

在抽运功率 1004 W (1 kHz, 200 μs) 时, 获得 395 W 的峰值功率输出, 平均功率 79 W, 光-光转换效率 39.3%。图 6 是薄片激光实验装置。图 7 是输出功率、光-光效率与抽运功率的实验曲线。

参 考 文 献

- 1 A. Giesen, H. Hugel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode pumped high power solid state lasers[J] *Appl. Phys. B*, 1994, **58**:365-372
- 2 A. Voss, U. Brauch, K. Wittig *et al.*. Efficient high-power diode-pumped thin-disk Yb:YAG laser[C]. *SPIE*, 1995, **2426**:501-508
- 3 Jone Vetrovec. Conceptual design of a 100kW-class solid-state laser [C]. *Fourteenth Annual on Solid-State and Diode Laser Technology Review*, 2001.100-103