

文章编号: 0258-7025(2009)07-1793-05

激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 薄片激光器

李 强 蔡艳芳 姜梦华 雷 飏 冯 驰 晏乐仑

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 报道了激光二极管(LD)侧面抽运的 Nd:YAG 薄片激光器。对影响侧面抽运薄片激光器性能的主要因素,即圆薄片增益介质内晶体光分布和沿径向的温度分布进行了理论分析和实验。实现了光-光转换效率为 33.5%, 峰值功率为 230 W, 光束参数乘积为 21.6 mm·mrad 的激光输出。实验结果表明,侧面抽运在薄片 Nd:YAG 晶体内可实现对称均匀分布,沿径向的温度差大大减小;Nd:YAG/YAG 薄片晶体的复合可满足侧面抽运的要求。这些技术和方法可应用于更高功率的侧面抽运薄片激光器。

关键词 激光器; Nd:YAG 薄片激光器; 侧面抽运; 效率; 光束参数乘积

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1793

Laser Diode Array Side Pumped Nd:YAG Thin Disk Laser

Li Qiang Cai Yanfang Jiang Menghua Lei Hong Feng Chi Yan Lelen

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A diode array side pumped Nd:YAG thin disk laser was reported, and the light distribution of doped crystal and temperature distribution of the radial were studied theoretically and experimentally. The output laser peak power of 230 W, opt.-opt. efficiency of 33.5% and beam parameter product of 21.6 mm·mrad were obtained. The results of experiment showed that side pumped Nd:YAG thin disk laser could realize light uniform distribution, and decrease temperature difference of radial significantly. And composited Nd:YAG/YAG crystal could satisfy the requirements of side pumped thin disk laser. These techniques and methods could apply to higher power side pumped thin disk laser.

Key words lasers; Nd:YAG thin disk laser; side pumped; efficiency; beam parameter product

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的薄片激光器有两个明显的优势,一是薄片激光器增益介质的热流平行于激光腔腔轴,近一维的热流分布导致腔内的热透镜效应大大减弱,热应力诱导双折射可忽略;二是薄片激光器增益介质抽运冷却表面大的热传导,增益介质薄片的热耗散功率大大提高。使得薄片激光器在获得高功率激光输出的同时保持高效率和高光束质量,成为近 20 年来全固态激光器的重要进展之一^[1]。

薄片激光器有端面抽运与侧面抽运两种方式,端面抽运方式采用光纤耦合输出或聚焦于石英棒输出的抽运光,产生均匀分布的光束包络,从端面抽运

薄片增益介质,未被吸收的抽运光经多次反射后,可实现 90% 以上的抽运吸收^[2]。侧面抽运方式是直接将抽运光从薄片增益介质的几个侧面输入^[3]。比较两种抽运方式,侧面抽运不仅光学系统结构简化、抽运光无需光纤耦合,有利于激光器整体效率的提高,而且可通过增大介质薄片的面积,增加通光口径,避免由于口径限制而引起过大的热负荷,进而降低晶体单位面积内的热耗散功率密度,进一步发挥薄片激光器的潜力。

本文采用大尺寸圆形薄片 Nd:YAG 晶体圆周与未掺杂多边形 YAG 晶体薄片复合的结构,抽运光从薄片的侧面进入晶体,对影响薄片激光器模块输出功率和光束质量的主要因素进行理论分析和实验研究,

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(60678014)资助课题。

作者简介: 李 强(1965—)男,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光技术与加工系统等方面的研究。

E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

获得光-光转换效率为 33.5%，峰值功率为 230 W，光束参数乘积为 21.6 mm·mrad 的激光输出。

2 侧面抽运薄片激光器的结构

侧面抽运薄片激光器的结构如图 1 所示。激光二极管对称地排列在增益介质的周围，从侧面对增益介质进行抽运，激光增益介质薄片固定在一个带有射流冷却的热沉上，复合薄片的后端面 and 输出耦合镜构成激光谐振腔。

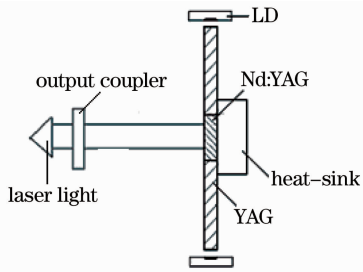


图 1 侧面抽运薄片激光器结构图

Fig. 1 Configuration of side pumped thin disk laser

3 理论分析

侧面抽运薄片激光器的潜力在于增益介质薄片的面积可根据设计激光器功率需要增大，热负荷大大降低，激光器的功率可定标放大，利于在高输出功率时保持高光束质量。增益介质薄片内抽运光的分布、径向温度的分布直接影响激光器性能的实现，有赖于对复合圆薄片晶体侧面抽运激光光学特性的分析，包括不同的侧面抽运单元数、不同掺杂浓度晶体吸收的关系，不同尺寸复合圆薄片晶体沿径向的温度分布，确定侧面抽运圆形薄片晶体激光介质结构和参数。

3.1 圆薄片增益介质内晶体光分布

侧面抽运采用激光二极管阵列的快轴垂直于薄片晶体表面的排布方式，如图 2 所示。以薄片晶体中心为坐标原点， y, z 轴为薄片晶体面方向，单个激光二极管阵列抽运光强分布可表示为^[4,5]

$$I(x, y, z) = I_0 \exp \left\{ -2 \left[\frac{x^2}{\omega_x^2(z)} + \frac{y^2}{\omega_y^2(z)} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 I_0 表示光束中心沿薄片轴向方向单位长度上的光强； $\omega_x(z)$ 和 $\omega_y(z)$ 分别是厄米-高斯光束在 z 处（光束沿 z 轴传播）沿 x 轴和 y 轴的半宽度。

为简化计算，假设：1) 由于薄片的厚度很小，可将薄片轴向方向上的抽运光吸收看成是均匀的，因此只需计算薄片轴向方向上的某一截面内的抽运光

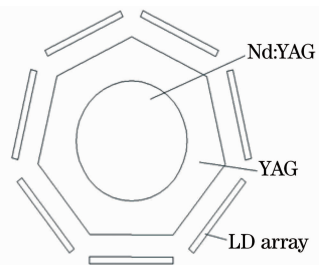


图 2 二极管侧面抽运薄片示意图

Fig. 2 Configuration of diode array side pumped thin disk crystal

吸收分布情况就可知道整个薄片内抽运光的吸收分布情况。2) 沿薄片晶体周围均匀分布的激光二极管阵列产生的抽运光是一致的，并且近似看成是由远处点光源发射的光。考虑到薄片对抽运光的吸收，抽运光在薄片内的光强可表示为

$$I(y, z) = \frac{2I_0}{\sqrt{\pi}w} \exp \left(-\frac{2y^2}{w^2} - \alpha L \right), \quad (2)$$

其中 α 为薄片的吸收系数， w 为光斑在任意一点 (y, z) 处的直径， L 为抽运光在薄片内的吸收距离。因此只要知道 w 和 L ，就可以算出抽运光在薄片内的分布^[4]。利用 Mathematica 编程对 Nd:YAG 薄片的抽运光强分布模拟，包括吸收系数不同时的抽运光强分布、激光二极管数量不同时的抽运光强分布、激光二极管与薄片距离不同时的抽运光强分布、发散角不同时的抽运光强分布等，可得到优化参数（吸收系数为 0.12 mm^{-1} ，激光二极管数量为 7，激光二极管与薄片距离 35 mm，激光二极管慢轴发散角为 12° ）条件下的抽运光强分布结果^[6]，如图 3 所示。

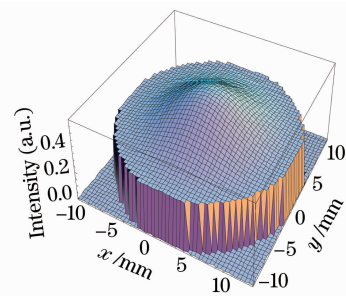


图 3 抽运光强分布

Fig. 3 Simulation pump light distribution in crystal

通过上述分析，可以看到：对一定直径的薄片增益晶体，保证侧面抽运吸收率在 $90\% \sim 95\%$ 的条件下，通过优化晶体的掺杂浓度、抽运激光二极管个数等参数，抽运光能够得到对称均匀、近高斯的光强分布；且改变抽运光强度，抽运光强分布基本不变。但与端面抽运相比，获得相同的光强分布，侧面抽运晶体的掺杂浓度低。

3.2 复合圆薄片晶体沿径向的温度分布

同样以薄片晶体中心为坐标原点, y, z 轴为薄片晶体面方向, x 轴为薄片晶体面法向。稳态工作的情况下, 热传导方程为

$$\nabla^2 T(x, y, z) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{Q}{k}, \quad (3)$$

式中 Q 为单位体积的均匀发热量, k 为热导率。

在实际情况下, x 轴方向上温度的非均匀性, 不会引起薄片热透镜效应; 影响激光器光束质量的主要是薄片晶体面沿径向的温度分布, 即 y, z 轴对应的薄片晶体面方向。若抽运光均匀对称, 可等效为二维热传导方程

$$\nabla^2 T(x, y) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{Q}{k}, \quad (4)$$

由边界条件 $-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm r} = \lambda_s (T_c \pm T|_{x=\pm r})$, 上表面绝热, λ_s 为薄片侧面热传导系数, T_c 为冷却液温度, r 为圆薄片晶体介质的半径。设 λ_b 为薄片底面热传导系数, l 为薄片厚度, 求解方程(4)可得

$$T(x) = T_c + \frac{Qr}{12\lambda_s} + \frac{Q}{24k}(r^2 - x^2), \quad (5)$$

将相关参数代入(5)式计算可得到如图 4 所示的温度分布。从图中可以看出, 薄片中心和侧面边缘的温度梯度为 13°C 。实际中, 单位体积发热量 Q 为近高斯分布, 薄片晶体中心的温度比计算值高 $2\sim 5$ 倍。

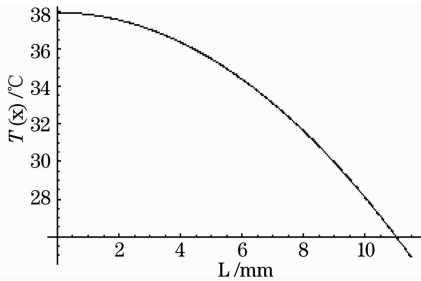


图 4 薄片内 x 轴方向上的温度分布

Fig. 4 Simulation temperature distribution of x axial in crystal

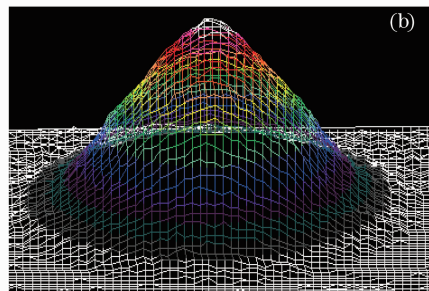
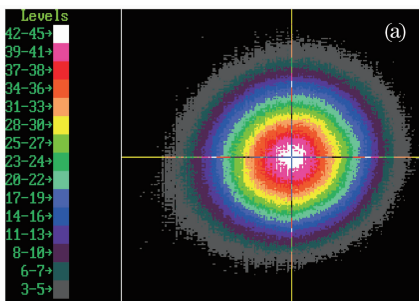


图 6 占空比为 1% 时晶体内二维荧光分布(a)和三维荧光分布(b)

Fig. 6 Fluorescence distribution in crystal for two-dimension(a) and three dimension(b) duty cycle 1%

由分析可以看到, 薄片晶体沿径向存在不均匀的温度分布; 在抽运功率一定的条件下, 增大薄片晶体尺寸, 薄片中心和侧面边缘的温度梯度减小, 引起薄片热透镜效应减小, 有利于激光器光束质量的提高。

4 实验与结果分析

实验采用复合晶体薄片为外接圆直径 60 mm 的七边形, 厚度为 1.2 mm, 其中心是一直径为 22 mm, 掺杂原子数分数为 0.6% 的 Nd:YAG 晶体, 外部为未掺杂的 YAG 晶体, Nd:YAG 圆薄片晶体与未掺杂 YAG 晶体薄片曲面复合。复合晶体 Nd:YAG 圆薄片部分的两端面分别镀 1064 nm 高反膜和增透膜, 镀高反膜的端面经金属化处理, 铜焊于带有射流冷却的铜热沉上, 图 5 所示为实物照片。

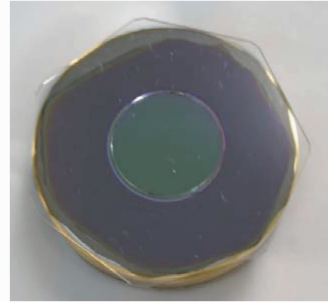


图 5 复合晶体薄片烧结在热沉上的实物照片

Fig. 5 Photograph of compounded Nd:YAG/YAG crystal sintering to the heat sink

7 个 CS 封装的激光二极管阵列, 发光宽度为 $10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 通过微柱透镜对其快轴进行准直, 快轴准直后发散角为 0.5 mrad , 慢轴发散角为 $7^\circ \sim 8^\circ$, 均匀对称安装在复合晶体薄片对应的七边形外, 激光二极管阵列抽运光经过复合的 YAG 晶体, 进入增益介质 Nd:YAG 晶体, 结构如图 2 所示。

4.1 增益介质晶体薄片内的荧光分布

采用透镜成像的方法将晶体内荧光分布情况成

像于 CCD^[7], 测量了频率为 100 Hz, 脉宽为 100 μs (占空比最小为 1%), 电流为 150 A, 以及频率为 150 Hz, 脉宽为 1000 μs (占空比最大为 15%), 最大

电流为 150 A 时晶体内的荧光分布, 如图 6, 图 7 所示。

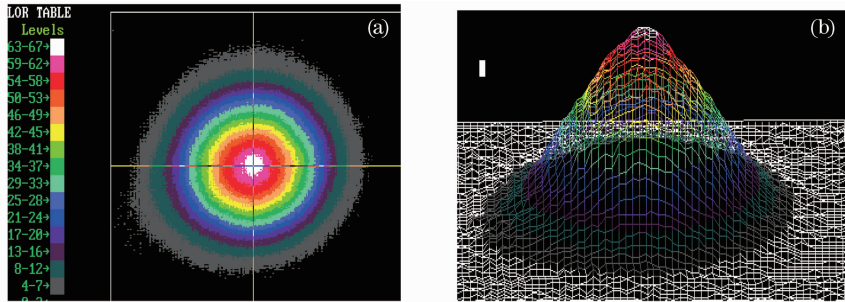


图 7 占空比为 15% 时晶体内二维荧光分布 (a) 和三维荧光分布 (b)

Fig. 7 Fluorescence distribution in crystal for two-dimension (a) and three dimension (b) duty cycle 15%

从图 6 和图 7 可以看出, 晶体内荧光呈类高斯分布, 且荧光强度基本对称均匀。这证明通过优化增益介质晶体薄片吸收系数、激光二极管发散角、抽运激光二极管数量、安放激光二极管位置等参数, 侧面抽运实验上可以实现对称均匀抽运光分布, 与理论分析一致; 当占空比增大时, 晶体内中心荧光更加凸出, 且分布均匀, 说明在高功率时, 抽运光功率向晶体薄片中央集中, 有利于抽运光与振荡激光匹配, 提高光-光转换效率; 当占空比最大时, 掺杂晶体边缘明暗分明, 掺杂晶体边缘没有明显的吸收和散射光, 说明晶体侧面复合能满足侧面抽运的要求。

4.2 薄片晶体沿径向的温度分布

采用红外测温仪, 测量晶体薄片增益介质表面的温度, 在频率为 150 Hz, 脉宽为 1000 μs , 电流为 150 A 时, 沿圆晶体薄片径向测量温度曲线如图 8 所示。

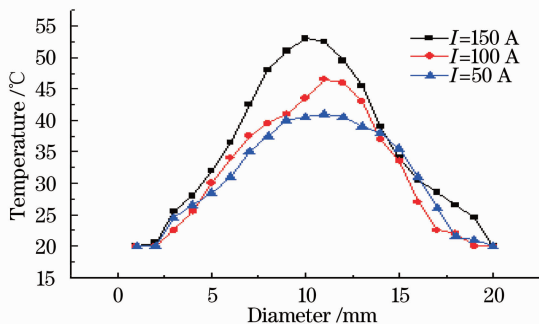


图 8 不同电流下薄片晶体径向方向温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of radial in different current

虽然晶体表面的温度与内部温度有差异, 但由于晶体的厚度较薄, 且沿晶体薄片轴向耗散热流, 晶体表面的温度分布与晶体内部温度分布相似。从图中可以看出, 晶体薄片沿径向的温度分布是一中间

高、边缘低的草帽状分布, 与理论分析的趋势一致; 薄片晶体沿径向的温度差与棒状增益介质相比显著减小, 这证明侧面抽运、端面冷却晶体薄片, 在减小热透镜效应和热致应力双折射方面有利。

4.3 输出功率的测量

经过腔型的计算^[8], 实验中使用了曲率半径为 8 m, 透过率为 3% 的输出腔镜进行实验, 水冷温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 激光二极管输入频率为 150 Hz, 脉宽为 1000 μs 。分别测量了腔长为 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm 时激光输出的平均功率, 计算得到了其对应的峰值功率和光-光转换效率, 输出最大峰值功率为 230 W, 此时每一激光二极管阵列的峰值功率为 100 W, 并考虑到入射薄片晶体的损耗 (抽运光入射端面未镀增透膜, 损耗也达 4%), 光-光转换效率可达到 33.5%。图 9 为不同腔长下输出峰值功率及光-光转换效率与输入电流的关系。

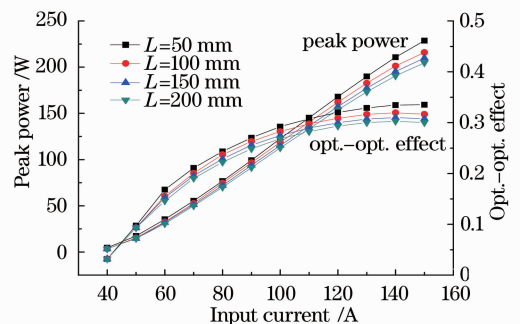


图 9 不同腔长时的输出峰值功率及光-光转换效率

Fig. 9 Output peak power and efficiency of different resonator length

4.4 光束质量的测量

实验中使用了输出腔镜曲率半径为 8 m, 透过率为 3%, 水冷温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 激光二极管输入频率为 150 Hz, 脉宽为 1000 μs , 电流为 150 A, 腔长为

100 mm。先将输出的激光聚焦,然后在 5 个不同的位置测量其光斑直径^[9],经过计算,其光束乘积为 $K_f = 21.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,图 10 是实验中所测量的距输出镜 50 mm 位置的光斑。

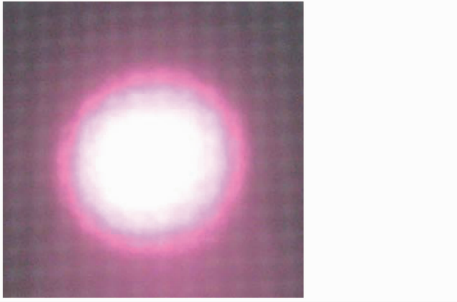


图 10 输出的激光光斑

Fig. 10 Output laser beam

5 结 论

采用大尺寸圆形薄片 Nd:YAG 晶体圆周与未掺杂多边形 YAG 晶体薄片复合的结构,实现光-光转换效率为 33.5%,峰值功率为 230 W,光束参数乘积为 $21.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的激光输出。理论分析和实验结果表明,侧面抽运在薄片 Nd:YAG 晶体内抽运光可实现对称均匀的分布,沿径向的温度差大大减小;Nd:YAG/YAG 薄片晶体的复合可满足侧面抽运的要求。这些技术和方法可应用于更高功率的侧面抽运薄片激光器。

致谢 感谢中国科学院半导体所马骁宇老师在薄片晶体金属化处理和热沉焊接工作中给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 A. Giesen, J. Speiser. Fifteen years of work on thin disk lasers: results and scaling laws [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**: 598~609
- 2 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1 kW CW thin disk laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**: 650C657
- 3 T. Dascalu, T. Taira, N. Pavel. 100 W quasi-continuous-wave diode radially pumped microchip composite Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**: 1791
- 4 Pang Kai, Han Junting, Li Qiang *et al.*. Pump distribution in LD side-pumped disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8): 1243~1248
庞 恺,韩军婷,李 强等. 管侧面泵浦薄片激光器泵浦均匀性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(8): 1243~1248
- 5 Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 390~394
宁继平,蔡志强,陈志强等. LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 390~394
- 6 Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Lü Bichang *et al.*. Laser-diode arrays symmetrically side-pumped thin disk laser [J] *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 168~172
张申金,周寿桓,吕毕昌等. 激光二极管阵列侧面对称抽运薄片激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 168~172
- 7 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 185~206
姚建铨,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 185~206
- 8 Lü Baida. Laser beam's transmission and transformation and control of beam quality [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 234~253
吕百达. 激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 234~253
- 9 Lei Hong, Li Qiang, Zuo Tiechuan *et al.*. Measurement method of high-power laser beam parameters [J] *J. Optoelectronics Laser*, 2000, **11**(4): 372~374
雷 甸,李 强,左铁钊等. 大功率激光光束参数的测量方法[J]. *光电子激光*, 2000, **11**(4): 372~374