

文章编号: 1001-3806(2005)02-0135-03

高功率二极管激光器面阵四通抽运耦合系统

高清松, 童立新, 蒋建峰, 唐 淳

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 高功率二极管激光器面阵连续抽运 1 mm Nd:YAG 薄片, 采用非球面柱透镜来准直二极管激光器线阵的快轴方向, 然后用两个正交的柱透镜分别对快慢轴光进行成像, 在薄片上形成 10mm × 7mm 的抽运光斑。用球面反射镜将薄片未吸收的抽运光再一次通过 Nd:YAG 薄片, 从而达到高的吸收效率, 抽运光束在薄片上快慢轴方向上的束参数积分分别为 640mm·mrad 和 540mm·mrad。用 CCD 测得抽运光在薄片上的光强分布较均匀, 面阵经非球面柱透镜和两个柱透镜后在 10mm × 7mm 内的耦合效率为 80.5%。

关键词: 激光器; 高功率二极管激光器; 耦合; Nd:YAG

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

The four-pass pumped coupling system of the high power diode lasers stack

GAO Qing-song, TONG Li-xin, JIANG Jian-feng, TANG Chun

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

Abstract The 1 mm thin disk is pumped by CW 800W high power diode lasers stack. The fast axis of each diode laser is collimated with an aspheric micro lens. Two macroscopic lenses are used to focus the light by transforming the fast axis and the slow axis and a 10mm × 7mm spot is achieved in the surface of the thin disk. The pumping light that is not absorbed by the thin disk passes the thin disk again when reflected by the spherical reflector, and high absorbing efficiency is obtained. Up to 800W can be focused on a 10mm × 7mm spot with the beam parameter product of 640mm·mrad and 540mm·mrad in the fast and slow axis. The pumping light tested by the CCD camera is nearly the symmetric beam. Its coupling efficiency is up to 80.5% in the 10mm × 7mm spot with the aspheric micro lens and two cylinder lenses.

Key words laser; high power diode lasers; coupling; Nd:YAG

引 言

二极管激光器抽运的固体激光器有着比闪光灯抽运的固体激光器工作稳定、光束质量好、光-光效率高、重复频率高和结构紧凑等特点, 目前, 二极管激光器已成为固体激光器的主要抽运源。随着二极管激光器在固体激光器中的广泛应用, 二极管激光器的耦合技术研究也得到了长足的发展。抽运结构通常分为端面抽运和侧面抽运两种。端面抽运结构其抽运光与谐振腔的轴线同轴, 能获得高的吸收效率同时也能减少热透镜效应, 但要实现高功率输出并满足抽运光束与谐振腔的 TEM₀₀ 模匹配, 需采用特殊光学器件来满足要求。例如, 美国利弗莫尔实验室 (LLNL) 的 BEACH 将 36 个“bar”组成的二极管激光器面阵用光锥波导将抽运光耦合到直径为 2mm 的圆棒, 获得耦合效率超过

90%, 用此耦合在谐振腔里获得连续 430W 激光功率输出^[1]。侧面抽运结构即抽运光与谐振腔的轴线垂直, 抽运结构简单, 如采用二极管激光器圆周抽运激光棒, 调整二极管激光器与圆棒的距离以及圆周方向二极管激光器的个数, 在圆棒截面上就能获得均匀的抽运吸收和较高的吸收效率^[2]; 采用二极管激光器面阵抽运“之”字形板条, 用低压缩比的光锥波导也能实现良好的抽运^[3,4]。高功率二极管激光器面阵经光学器件耦合到光纤也取得了很大的进展, 采用复杂的光束成形技术, 将 25 个“bar”组成的二极管激光器面阵耦合到直径为 1.5mm 的光纤^[5], 获得束参数积为 240mm·mrad 耦合效率达 50%。

文中介绍了由 23 个“bar”组成的二极管激光器面阵抽运四通耦合设计, 二极管激光器面阵的发光面积为 40mm × 10mm, 增益介质抽运面积为 10mm × 7mm, 因此在抽运过程中, 需要将其光束进行准直并有效地耦合到增益介质中。美国 LLNL 实验室采用的光锥波导输出的抽运光发散角大, 这就要求光锥波导的出口紧贴增益介质, 不适合笔者目前所设计的抽运结构。采用两个正交的柱透镜耦合方法, 能满足抽运结构要

基金项目: 国家高技术八六三计划资助项目

作者简介: 高清松 (1972-), 男, 助研, 主要从事二极管抽运固体激光技术研究工作。

E-mail: luckga@sohu.com

收稿日期: 2004-02-16 收到修改稿日期: 2004-05-12

求。通过柱透镜参数设计可以实现四通抽运,这样可以适当减少增益介质厚度,能较好地处理好吸收效率和热透镜效应。另一方面,抽运光的均匀性对激光器的性能也很重要,均匀的抽运光能减少局部热效应和在增益介质内获得均匀的小信号增益系数。

1 高功率二极管激光器面阵

高功率二极管激光器面阵一般由多个二极管激光器线阵根据抽运结构、抽运功率和封装工艺等要求采用一定的堆叠方式而成,实现高平均功率输出。每个二极管激光器线阵的发光面积为 $1\mu\text{m} \times 10\text{mm}$,在快轴方向发散角为 40° ,慢轴方向发散角为 10° ,未经光学器件耦合的二极管激光器线阵输出为很强的椭圆高斯光束^[6]。在快慢轴上的束参数积分别为 $0.3\text{mm} \cdot \text{mrad}$, $500\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ^[7]。高功率二极管激光器面阵由 23 个二极管激光器线阵组成,二极管激光器线阵连续功率接近 40W,其每个线阵之间间距为 1.75mm,即二极管激光器面阵发光面积 $40\text{mm} \times 10\text{mm}$,输出连续功率 800W。

2 四通抽运耦合结构

2.1 二极管激光器线阵耦合

高功率二极管激光器面阵里的每一个线阵分别经非球面柱透镜将快轴准直,在快轴方向获得 $6\text{mrad} \sim 10\text{mrad}$ 的发散角,快轴方向宽度为 1mm,其耦合效率接近 99%。由于慢轴方向由多个发光条组成,采用简单的方法很难实现慢轴准直,通常采用对每个发光条进行光束变换后进行慢轴准直,关键光学器件设计复杂,加工工艺要求高。另一方面,慢轴方向的发散角相对于快轴小,所以通常只对快轴准直。图 1 为用 CCD 相机测得二极管激光器面阵经非球面柱透镜耦合后的

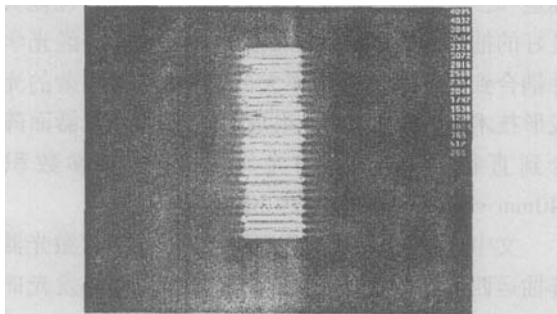


Fig 1 Intensity distribution of the high power diode lasers stack

光强分布。由于不同的二极管激光器线阵的阈值电流不同,所以,测试时右图的一些二极管激光器线阵的局部还未达到阈值。从图 1 可清楚看出,二极管激光器面阵的堆叠方式和各二极管激光器线阵的强度分布。且发光面积为 $40\text{mm} \times 10\text{mm}$,与增益介质要求的抽运截面 $10\text{mm} \times 7\text{mm}$ 相比还需要缩小近 6 倍。

2.2 正交柱透镜设计

由于二极管激光器线阵慢轴方向有 10° 的发散角,然而薄片在谐振腔中设计的光斑为 $10\text{mm} \times 7\text{mm}$,即将慢轴方向成像到薄片上的压缩比为 1:1 时就能满足。设计两个柱透镜时应结合以下方面均衡选择参数:(1)在增益介质上光斑分布均匀;(2)耦合后光束发散角小;(3)在两个方向上能用同一个球面反射镜实现四通。基于这几点了设计了快慢轴柱透镜及相对位置。从图 2 可看出二极管激光器面阵快慢轴耦合过程,图的上方为慢轴方向耦合示意图,下方为快轴方向

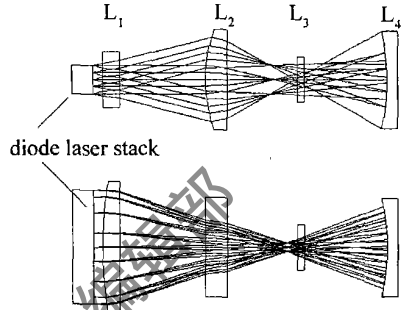


Fig 2 Two macroscopic lenses used to set up ray trace

耦合示意图。 L_1 为快轴柱透镜,曲率半径为 105mm; L_2 为慢轴柱透镜,曲率半径为 37mm。柱透镜材料选用折射率为 2.254 的铌酸锂晶体,对抽运光的吸收系数为 $0.001/\text{m}$,且易于生长成大尺寸。在柱透镜的两通光面镀 808nm 的消反膜,以提高抽运光的传输效率。 L_3 为增益介质,在 L_3 的前端面镀 808nm 的消反膜,后表面镀 808nm 的高反膜(注:图 2 光线仅为示意)。从图上可看出,抽运光经 L_1, L_2 后快慢轴方向的光焦面在光束传输方向很接近,这就能设计一球面反射镜 L_4 ,通过计算选择 L_4 的曲率半径和与 L_3 的距离,就能实现抽运光 4 次通过 L_3 。球面反射镜的曲率半径为 30mm,与增益介质的距离为 50mm。通过光线模拟可计算出快慢轴在光束传输方向上的光斑大小,以增益介质为中心计算了前后的光斑半径变化图(见图 3)。快慢轴两个方向的束参

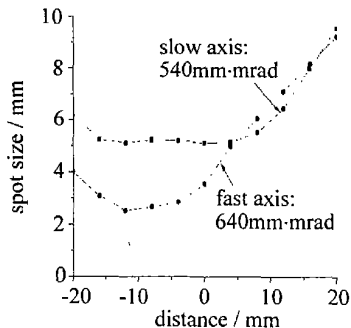


Fig 3 The spot size in the fast and slow axes

数积很接近,也有利于用一个球面镜将增益介质未吸收的抽运光再次反射到增益介质。

2.3 面阵四通耦合系统组成

高功率二极管激光器面阵四通抽运耦合结构如图

4所示,抽运光与增益介质的法线成 35° ,同样球面反射镜也与增益介质法线成 35° 。另一方面,其振荡光束与增益介质法线成 45° ,光路垂直于纸面,从结构上布局合理,减少了端抽运结构振荡光束与抽运光束同轴给结构和光学器件镀膜等带来的麻烦。这样也可以实现多级抽运结构串联,以实现高功率输出。二极管激光器面阵非均匀辐射光经非球面柱透镜、快轴柱透镜、慢轴柱透镜传输后在增益介质上获得高功率密度和较均匀的抽运光束。

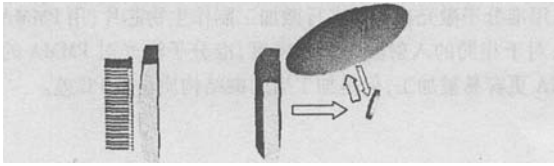


Fig 4 Schematic of the coupling system with the high power diode lasers stack

3 实验结果及讨论

按照耦合系统要求,将各光学元件和机械结构进行组装,通过微调两个柱透镜相对距离,在屏上(代替增益介质)能观察到光斑大小的变化,当光斑在两个方向同时满足设计要求光斑大小时,用 CCD 相机测得该位置处的光强二维分布(见图 5)。从图 5 可看出测

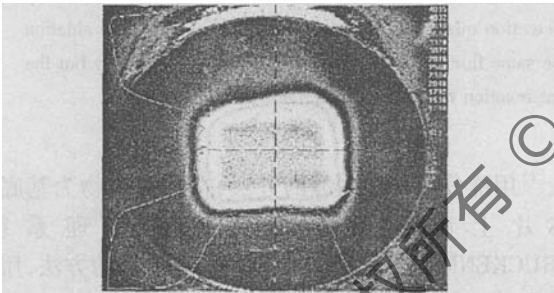


Fig 5 Intensity distribution in the thin disk

试的光强分布从总体上是较均匀的,另一方面,采用球面反射镜抽运结构可以补偿抽运光局部的不均匀性。实验中用功率计测得无耦合器件时二极管激光器面阵

在 25A 时的功率为 180W,装上耦合光学器件后在增益介质处放一屏,在屏上开 $10\text{mm} \times 7\text{mm}$ 的孔,用功率计在孔后测得功率为 145W,即耦合效率为 80.5%。采用此抽运耦合结构,进行了薄片介质 DPL 实验,用平均功率 400W 抽运 1.1mm 厚的 Nd:YAG 薄片,谐振腔输出 120W, $M^2 = 10$

4 结 论

通过对高功率二极管激光器面阵侧抽运四通耦合结构的设计和实验研究表明:非球面柱透镜将二极管激光器快轴方向的发散角变为 $6\text{mrad} \sim 10\text{mrad}$ 有效地将抽运光进行了准直;两个交叉的柱透镜在提高抽运功率密度和传输效率方面有好的结果。并采用抽运光多次通过增益介质的抽运方式,可以适当地降低增益介质的厚度和断裂强度,以减少热透镜效应。同时为高功率二极管激光器面阵耦合提供了一种方法。

感谢武德勇副研究员提供高功率二极管面阵激光器,以及对面阵耦合系统设计提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] BEACH R J, HONEA E C, SUTTON S B *et al*. High-average-power diode-pumped Yb:YAG lasers [J]. *SPIE*, 2000, 3889: 246~260
- [2] ABAZADZE A J, KOLBATSKOV J M, PAVLOV I I, CH V L *et al*. Investigations of pulsed Nd:YAG laser with diode-laser bars side-pumped rod geometry [J]. *SPIE*, 2001, 4350: 25~31
- [3] 秦兴武, 陈良明, 李明中 *et al*. LD 端面泵浦 Nd:YLF 激光放大器研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(2): 181~184
- [4] 高清松, 王卫民, 庞 毓. 二极管激光器侧泵浦波导耦合系统设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(2): 169~172
- [5] FRIEDHELM D, VEIT B, MATTHIAS S *et al*. Fiber coupled diode laser systems up to 2kW output power [J]. *SPIE*, 2000, 3945: 42~49
- [6] PETER A, HANS J, ECKHARD L *et al*. Focusing of diode lasers for high beam quality in high power applications [J]. *SPIE*, 1992, 1780: 533~538
- [7] STEFAN H, LARS L. Fiber coupled diode lasers and beam-shaped high-power stacks [J]. *SPIE*, 1999, 3267: 116~124
- [8] 何秀丽, 王华明, 郑启光 *et al*. TiAl 金属间化合物碳元素激光表面合金化 [J]. *金属学报*, 1998, 34(9): 983~986
- [9] JACKSON K A. Materials science engineering [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984: 65
- [10] LIR J M. Metallic-ceramic composite [M]. Beijing: Metallurgy Industrial Press, 1995: 58~60
- [11] PORTER D A, EASTERLING K E. Phase transformations in metals and alloys [M]. New York: van Nostrand Reinhold, 1981: 199~203
- [12] 胡汉启. 金属凝固 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 111~113
- [13] FLEMING S M. Solidification processing [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972: 126~127
- [14] LU R P, WANG W K, LI D *et al*. Transition from continuous to lateral growth for Ge crystal in undercooled $G_{74}N_{26}$ alloy melts [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 41(8): 855~860
- [15] FU Y, BATCHELOR A W. Laser nitriding of pure titanium with N_2 for improved wear performance [J]. *Wear*, 1998, 214(1): 83~90
- [16] JIANG P, HE X L, LI X X *et al*. Wear resistance of a laser surface alloyed Ti-6Al-4V alloy [J]. *Surf Coat Technol*, 2000, 130(1): 24~28
- [17] 刘秀波, 于利根, 王华明. α -TiAl 金属间化合物合金激光表面合金化改性 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2001, 30(3): 224~227
- [18] 蒋 平, 张继娟. Ti-6Al-4V 合金激光表面合金化制备 Ti_3Si_3/Ti 耐磨复合材料涂层研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(4): 269~272
- [19] 陈 瑶, 王华明. TiAl 合金激光表面合金层中 Ti 凝固生长形态及机制 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(5): 863~868

(上接第 115 页)

参 考 文 献