

激光二极管双端直接抽运混合腔板条激光器

毛叶飞 张恒利 徐浏 邓波 桑思晗 何京良 邢冀川 辛建国 江毅

Laser diode double-end-direct-pumped slab laser with hybrid resonator

Mao Ye-Fei Zhang Heng-Li Xu Liu Deng Bo Sang Si-Han He Jing-Liang Xing Ji-Chuan
Xin Jian-Guo Jiang Yi

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 014203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.014203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

部分相干双曲余弦厄米高斯光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的传输特性

[Propagation properties of partially coherent Hermite-cosh-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulence](#)

物理学报.2015, 64(3): 034208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034208>

激光二极管抽运的高重频高平均功率 Nd:YAG 激光器

[Laser diode pumped Nd:YAG laser with high repetition and high average power](#)

物理学报.2014, 63(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224204>

激光脉冲前后沿相干叠加对多程放大的影响

[Effect of laser coherent superposition in multi-pass amplification process](#)

物理学报.2014, 63(18): 184205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184205>

纳米硅上的弯曲表面效应及其特征发光

[Curved surface effect and characteristic emission of silicon nanostructures](#)

物理学报.2014, 63(3): 034201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034201>

像散椭圆高斯光束的 M^2 因子矩阵的理论与实验研究

[Theoretical and experimental study on \$M^2\$ factor matrix for astigmatic elliptical Gaussian beam](#)

物理学报.2013, 62(19): 194202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194202>

激光二极管双端直接抽运混合腔板条激光器

毛叶飞¹⁾ 张恒利^{1)†} 徐浏¹⁾ 邓波¹⁾ 桑思晗¹⁾ 何京良²⁾ 邢冀川¹⁾
辛建国¹⁾ 江毅¹⁾

1)(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2)(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

(2014年6月9日收到; 2014年7月23日收到修改稿)

为减少热透镜效应的影响, 获得高光束质量的激光, 本文利用激光二极管阵列双端直接抽运 Nd:YVO₄, 采用负支共焦折叠混合腔结构, 获得最大功率为 416 W 1064 nm 的激光输出, 光—光转换效率为 54.3%, 斜效率为 61.6%. 在输出功率为 370 W 时, 光束质量因子 M^2 在非稳腔和稳腔方向上分别为 3.9 和 4.7.

关键词: 双端抽运, 直接抽运, Nd:YVO₄, 负支共焦折叠混合腔

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.-v, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.64.014203

1 引言

LD 端面抽运结构的固态激光器, 具有性能稳定、效率高、寿命长、结构紧凑和使用简单等优点, 在材料加工、通信、遥感和医疗等领域有着广泛的应用^[1-3]. 然而, 由于热效应导致晶体形变, 从而严重影响了激光器的输出性能^[4], 限制了激光器在高光束质量下功率的提升. 为此, 一方面, 人们提出了双端抽运的方式使抽运光从晶体的两端注入; 另一方面, 人们采用键合晶体来缓解抽运端面变形引起的热透镜效应, 二种方法均使获得的激光增益分布和热分布在晶体中更加均匀, 从而提高激光器的输出性能. 其次, 为进一步降低晶体中产生的热量, 采用激光直接抽运的方式来降低激光发射量子亏损发热. 直接抽运方式^[5]可以避免激光离子从抽运带到激光上能级之间的无辐射跃迁, 从根本上降低量子亏损发热, 从而改善晶体的热效应. 2010 年, 侯军燕等用 808 nm 双端抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 获得最高输出功率为 21.3 W 的激光输出, 光—光效率为 34.9%, 光束质量因子 $M^2 < 1.41$ ^[6]. 2011 年, 赵智刚等报道利用 808 nm 双端抽运 Nd:YVO₄

晶体, 获得 50 W 的基模激光输出, 光—光效率达 49.2%^[7]. 2012 年, 贾建勋等用 880 nm 双端抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 获得 12 W 1342 nm 的激光输出, 光—光效率为 24.3%, 光束质量在水平和垂直方向上分别为 1.12 和 1.2^[8].

1998 年, Du 等^[9]发明了部分端面抽运的板条激光器, 其主要特点是抽运光抽运板条晶体的中央而不充满整个晶体和谐振腔采用稳腔-非稳腔的混合腔结构. 这种混合腔结构, 在稳腔方向, 利用抽运体积和激光的基模体积良好的匹配, 从而实现高效, 高光束质量的光束输出; 在非稳腔方向, 利用激光的基模尺寸几乎充满整个晶体宽度方向, 从而获得大的基模体积, 同时非稳腔能有效抑制高阶模, 从而获得接近衍射极限的高功率激光光束输出. 2004 年, Peng 等用 808 nm 抽运 Nd:YVO₄ 晶体获得 110 W 的激光输出, M^2 因子在水平方向和垂直方向分别为 1.3 和 1.5^[10]. 2008 年, Zhu 等用 880 nm 抽运 Nd:YVO₄ 晶体获得 165 W 的激光输出, M^2 因子在非稳和稳定方向分别是 1.4 和 1.7^[11]. 2012 年, Xu 等报道, 利用 808 nm 双端抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 采用正支共焦折叠混合腔, 获得 220 W 的激光输出, 光—光效率为 44.9%, 光束质量在水平方向

† 通信作者. E-mail: zhl040325@bit.edu.cn

和垂直方向分别为1.7和2.3^[12].

本文, 综合直接抽运、双端抽运和稳腔-非稳腔的混合腔结构各自的优点, 采用880 nm 双端抽运负支共焦折叠混合腔Nd:YVO₄晶体, 获得最大功率为416 W 1064 nm 的激光输出, 光—光转换效率为54.3%, 斜效率为61.6%. 在输出功率为370 W 时, 光束质量因子 M^2 在非稳腔和稳腔方向上分别为3.9和4.7.

2 实验装置

实验结构如图1所示. 抽运源为激光二极管阵列, 由6个bar条组成, 每个bar条前都装有微柱透镜对输出激光的快方向进行准直, 使其在快方向上基本为平行光, 并通过循环水进行控温, 在水温为23 °C时, 中心发射波长为880 nm. 耦合系统是由两组柱面透镜, 一个矩形波导和一个聚焦透镜构成, 其中波导起到混束的作用, 使抽运光均匀. 抽运光通过耦合系统被整形成一条横截面近似为长方

形(大小约为0.4 mm × 22 mm)的抽运线并耦合到Nd:YVO₄晶体上. 经实际测量, 耦合系统的效率为85%. 实验所用的Nd:YVO₄晶体掺杂浓度为0.3%, 尺寸大小为22 mm × 12 mm × 1 mm, 沿a轴切割, 通光方向为12 mm方向. 其中在两个22 mm × 12 mm的大面上安装水冷紫铜热沉以获得最佳的散热效果^[13]; 对两个22 mm × 1 mm的小面上抛光, 并镀有对880 nm及1064 nm的增透膜. 谐振腔是由球面镜M₁和M₂, 及平面镜M₃组成. 在M₃的a面镀有对880 nm的高透和b面镀有对1064 nm 45°高反的介质膜. 球面镜M₁的曲率半径R₁ = 200 mm, 并镀有对880 nm高透和1064 nm高反的介质膜; 球面镜M₂的曲率半径R₂ = 120 mm, 并镀有对1064 nm高反的介质膜. M₁和M₂构成的谐振腔长度为160 mm, 与M₃构成折叠腔. 折叠腔在水平方向为离轴负支共焦非稳腔, 其等效透过率为 $T = 1 - R_2/R_1 = 40%$; 在垂直方向由凹凹面镜构成稳腔.

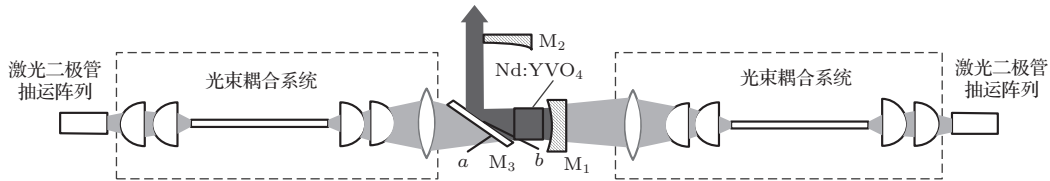


图1 LD端面抽运负支共焦折叠混合腔Nd:YVO₄板条激光器实验装置示意图

3 结果与讨论

实验结果如图2所示, 在抽运功率为1000 W 时, 获得最高输出功率为416 W, 考虑实验中实际测量晶体吸收的值大约为90%, 则光—光效率为54.3%, 斜效率为61.6%.

利用 $f = 350$ mm 的聚焦透镜对输出光束聚焦, 并用CCD测量光束在束腰附近不同位置的光斑直径的大小, 代入下式^[14], 拟合得出光束质量因子

$$d^2(z) = d_0^2 \left\{ 1 + \left[\frac{4M^2\lambda(z - z_0)}{\pi d_0^2} \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

式中, d_0 为束腰处的光斑直径, z_0 为束腰位置, $z - z_0$ 为距束腰处的距离, $d(z)$ 为 z 位置处的光斑直径, λ 为输出激光的波长. 在输出功率为370 W 时, 测量光束质量的结果如图3所示. 光

束质量 M^2 因子在非稳腔方向和稳腔方向分别为3.9和4.7.

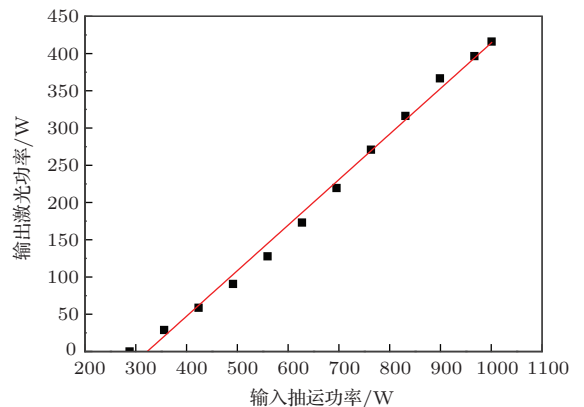


图2 激光输入-输出功率关系图

由于板条晶体中抽运光沿水平方向分布均匀, 在水平方向热透镜效应可以忽略^[9]; 对于激光二极管

管端面抽运结构, 利用热传导方程, 可以给出激光晶体沿光轴方向的热透镜焦距计算公式^[15]

$$f_{th} = \frac{K_c S}{P_{th} dn/dT} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha_p L)} \right), \quad (2)$$

式中, K_c 为晶体的热导率, S 为抽运光斑面积大小, P_{th} 为转化为热量的抽运功率, dn/dT 为晶体的热光系数, α_p 为激光晶体对抽运光的吸收系数, L 为晶体长度. 针对本实验, $K_c = 0.054 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$, $dn/dT = 4.7 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\alpha_p = 14.8 \text{ cm}^{-1}$, $S = 22 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$, $L = 12 \text{ mm}$. 由(2)式, 可得图4.

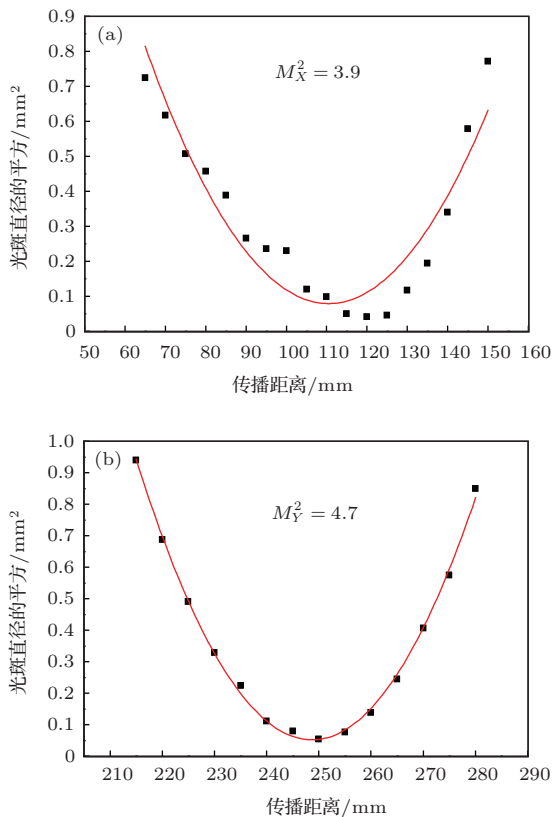


图3 输出功率370 W时光束质量 M^2 因子 (a)非稳腔方向; (b)稳腔方向

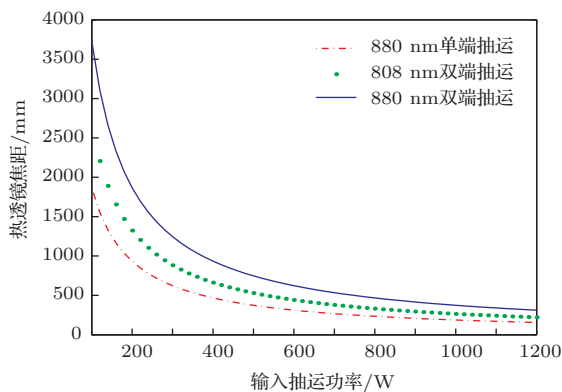


图4 热透镜焦距随抽运激光功率的变化曲线

分析图4的曲线, 可以得出相对于单端抽运结构, 双端抽运结构能大大减轻热透镜效应. 主要由于双端抽运时, 相对于单端抽运, 相同功率的抽运光被平均分成两部分分别从晶体的两个端面注入, 有效地减小抽运注入端面的抽运密度, 吸收密度, 降低单位体积内的吸收的热量, 所以晶体由吸收抽运光而温度升高的温度要比单端抽运时小得多; 其次, 晶体对抽运光的吸收也要均匀, 从而有效降低晶体中的温度梯度, 使晶体内的温度分布也比较均匀. 同时, 可以看出与采用传统的808 nm抽运源相比, 采用880 nm的抽运源直接抽运可以缓解热透镜效应. 这是由于直接抽运方式, 将激光离子直接从基态能级激发到激光上能级, 大大减少了抽运上能级向激光上能级无辐射跃迁产生的热, 量子亏损小, 降低了激光晶体的热效应.

4 结 论

综上所述, 我们综合利用直接抽运技术, 双端抽运及混合腔结构各自的优点, 获得416 W 1064 nm的激光输出, 光-光效率为54.3%, 斜效率为61.6%. 在输出功率为370 W时, 光束质量在非稳腔方向和稳腔方向上分别是3.9和4.7. 此结果是目目前单块Nd:YVO₄晶体振荡器已知获得的最好的结果.

参考文献

- [1] Zhang T L, Yao J Q, Wang P, Zhu X Y, Cai Z Q, Zhang B G 2007 *Chinese Journal of Laser* **34** 1194 (in Chinese) [张铁犁, 姚建铨, 王鹏, 朱雪玉, 蔡志强, 张百钢 2007 中国激光 **34** 1194]
- [2] Zhou S H, Zhao H, Tang X J 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 1605 (in Chinese) [周寿恒, 赵鸿, 唐小军 2009 中国激光 **36** 1605]
- [3] Zhang Z L, Liu Q, Yan P, Xia P, Gong M L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054206
- [4] Zou J, Zhao S Z, Yang K J, Li G Q 2006 *Laser Technology* **30** 422 (in Chinese) [邹晶, 赵圣之, 杨克建, 李桂秋 2006 激光技术 **30** 422]
- [5] Lupeia V, Pavela N, Tairab T 2002 *Opt. Commu.* **201** 431
- [6] Hou J Y, Shu S J, Wang Y F, Huang F, Jia W W 2010 *Optoelectronic Technology* **30** 45 (in Chinese) [侯军燕, 舒仕江, 汪岳峰, 黄峰, 贾文武 2010 光电子技术 **30** 45]
- [7] Zhao Z G, Dong Y T, Pan S Q, Liu C, Xiang Z, Chen J 2011 *Chinese Journal of Lasers* **38** 0902001 (in Chinese) [赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 刘崇, 项震, 陈军 2011 中国激光 **38** 0902001]

- [8] Jia J X, Wang C X, Feng J X, Zhang K S 2012 *Acta Sinica Quantum Optica* **18** 97 (in Chinese) [贾建勋, 王春香, 冯晋霞, 张宽收 2012 量子光学学报 **18** 97]
- [9] Du K M, Wu N L, Xu J D, Gieseckus J, Loosen P, Poprawe R 1998 *Opt. Lett.* **23** 370
- [10] Peng S, Li D J, Zhang H L, Wang Y D, Du K M 2004 *Opt. Commu.* **229** 349
- [11] Zhu P, Li D J, Hu P X, Schell A, Shi P, Haas C R, Wu N L, Du K M 2008 *Optics Letter* **33** 1930
- [12] Xu L, Zhang H L, He J L, Yu X L, Cui L, Mao Y F, Sun X, Lin X, Xing J C, Xin J G 2012 *Applied Optics* **51** 2012
- [13] Liu H Q, Guo Z, Wang S Y, Lin L, Guo L C, Li B B, Cai D F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014212 (in Chinese) [刘海强, 过振, 王石语, 林林, 郭龙成, 李兵斌, 蔡德芳 2011 物理学报 **60** 014212]
- [14] Siegman A E 1990 *SPIE* **1224** 2
- [15] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, Fields R A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1831

Laser diode double-end-direct-pumped slab laser with hybrid resonator

Mao Ye-Fei¹⁾ Zhang Heng-Li^{1)†} Xu Liu¹⁾ Deng Bo¹⁾ Sang Si-Han¹⁾ He Jing-Liang²⁾
Xing Ji-Chuan¹⁾ Xin Jian-Guo¹⁾ Jiang Yi¹⁾

1) (School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

(Received 9 June 2014; revised manuscript received 23 July 2014)

Abstract

To reduce the influence of thermal lensing and attain the high power laser with high beam quality, a laser diode stack dual-end-direct-pumped Nd:YVO₄ slab laser with negative branch confocal folded hybrid cavity has been developed. Its maximum output power is 416 W, optical conversion efficiency is 54.3%, and slope efficiency is 61.6%. When the output laser power is 370 W, M^2 values in the unstable resonator direction and stable resonator direction are 3.9 and 4.7, respectively.

Keywords: dual-end-pumped, direct-pumped, Nd:YVO₄, negative branch confocal folded hybrid cavity

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.-v, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.64.014203

† Corresponding author. E-mail: zh1040325@bit.edu.cn