

对称多通泵浦双包层 Yb:YAG 平面波导放大器

曲波^{1**}, 刘奇¹, 王思博¹, 朱占达^{1,2,3,4}, 雷旬^{1,2,3,4}, 惠勇凌^{1,2,3,4}, 李强^{1,2,3,4*}

¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;

²北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;

³激光先进制造北京市高等学校工程研究中心, 北京 100124;

⁴跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 设计了一种高功率多通泵浦 Yb:YAG 平面波导激光放大器。所设计的放大器采用对称泵浦方案, 泵浦源对称分置于平面波导两侧, 泵浦光在平面波导中经反射多次通过芯层以实现多通泵浦。分析了泵浦吸收特性的影响因素, 推导了平面波导几何参数间的约束关系, 并对平面波导结构进行了优化。使用激光放大模型分析了所设计平面波导放大器的泵浦吸收特性、温度特性及放大输出特性。结果显示: 所设计多通泵浦平面波导放大器具有高泵浦吸收率, 以及高的光-光转换效率, 当注入种子光功率为 200 W, 泵浦功率为 10 kW 时, 对称多通泵浦平面波导的泵浦吸收率最大值为 96.8%, 对应的放大输出功率为 7483 W, 光-光转换效率为 72.8%; 同时, 良好的吸收均匀性使其受热效应的影响更小, 有利于获得高质量的光束。

关键词 激光光学; Yb:YAG; 平面波导; 激光放大; 高功率; 多通泵浦

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2314001

Symmetrical Multi-Pass-Pump Double-Clad Yb:YAG Planar Waveguide Amplifier

Qu Bo^{1**}, Liu Qi¹, Wang Sibol¹, Zhu Zhanda^{1,2,3,4}, Lei Hong^{1,2,3,4},
Hui Yongling^{1,2,3,4}, Li Qiang^{1,2,3,4*}

¹Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing 100124, China;

³Beijing Colleges and Universities Engineering Research Center of Advanced Laser Manufacturing, Beijing 100124, China;

⁴Key Laboratory of Trans-scale Laser Manufacturing Technology Ministry of Education, Beijing 100124, China

Abstract A high-power multi-pass-pump Yb:YAG planar waveguide laser amplifier was designed. The new amplifier adopted symmetrical pumping scheme, in which the pump sources were symmetrically placed on both sides of the planar waveguide. The pump light, reflected in the planar waveguide, passed through the core multiple times. Multi-pass pump was thereby achieved. The factors affecting the pump absorption characteristics were analyzed, and the relationships between the geometric parameters of the planar waveguide were determined. The planar waveguide structure was optimized. The pump absorption, temperature, and output amplification characteristics of the planar waveguide amplifier were analyzed by a laser amplification model. The results show that the designed multi-pass-pump planar waveguide amplifier has high pump absorption and optical-to-optical

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-06-11; 录用日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(62075003)、北京市自然科学基金(4202007, KZ202110005010)

通信作者: *ncltlq@bjut.edu.cn; **liningqb@qq.com

efficiencies. When the power of the injected seed light is 200 W and the pumping power is 10 kW, its maximum pump absorption efficiency is 96.8%, with a corresponding amplified output power of 7483 W and an optical-to-optical efficiency of 72.8%. Meanwhile, a good absorption uniformity makes the amplifier less affected by the heating effect, which is beneficial to obtaining high-quality beams.

Key words laser optics; Yb:YAG; planar waveguide; laser amplification; high power; multi-pass pump

OCIS codes 140.3615; 140.3480; 140.3580; 140.3540

1 引言

高平均功率固体激光器在科研和工业等领域有着重要的应用,可以实现千瓦级以上连续输出的激光器主要有棒状激光器^[1]、碟片激光器^[2-3]、板条激光器^[4-5]、光纤激光器^[6]及平面波导激光器^[7-8]。平面波导激光器是板条激光器与光纤激光器的过渡形式,结合了二者的优点^[9-10]:一维方向的波导可以限制激光模式,输出光束质量好;双包层波导结构易于泵浦耦合,增益介质可以获得高的泵浦吸收率,输出功率高、能量转换效率高;同时具有大的功率体积比,结构紧凑。因此,近年来平面波导激光器已成为高平均功率固体激光器的重要发展方向之一。

对于平面波导激光器,激光放大器较振荡器^[11-12]更易实现高功率连续输出。目前采用 Nd:YAG^[13-14]和 Yb:YAG^[15-16]作为增益介质的平面波导放大器已实现 kW 级放大输出。相比 Nd:YAG, Yb:YAG 具有更小的量子亏损,可以实现更高的能量转化效率,同时产生的废热小,可承受的泵浦功率更大,因此采用 Yb:YAG 作为增益介质的平面波导放大器在高功率输出方面更具潜力。2008 年, Raytheon 公司报道了端面抽运的双包层 Yb:YAG 平面波导激光器,波导增益介质的厚度为 200 μm ,当种子光功率为 100 W 时,输出功率为 16.1 kW^[8]。2012 年, Raytheon 公司报道了 MOPA 结构的平面波导激光系统,该系统包括具有高光束质量的主振荡器、Yb:YAG 双包层平面波导放大器、高效率泵浦二极管和基于波前校正的高功率自适应光学系统^[12]。其中,主振荡器是 1030 nm 光纤激光器,可输出 200 W 的种子光,经放大后获得 25 kW 的高光束质量激光输出。为获得高功率放大输出激光,平面波导放大器需具有高的泵浦吸收率,为此增益结构采用双包层平面波导以利于泵浦耦合,同时使用端面泵浦以使吸收长度最大化。由于平面波导的芯层长度受制备工艺约束,端面泵浦时的泵浦光吸收长度受限,因此为了能够充分吸收泵浦功率,需要将高掺杂浓度的 Yb:YAG 作为芯

层。但受 Yb:YAG 再吸收的影响, Yb 的掺杂浓度越高,越不利于吸收功率的充分提取。为了使光-光转换效率最大化,本课题组制备出一种多通泵浦平面波导放大器^[17],以大幅增加泵浦吸收长度,从而在低掺杂浓度条件下也可以实现高的泵浦吸收率。但是,该放大器采用了非对称泵浦设置,即将泵浦源置于种子光光轴同侧,导致波导芯层宽度方向上的吸收功率密度分布不对称,在种子光放大过程中光束左右两侧受热效应影响不同,导致放大输出光束质量退化。

本文设计了一种对称多通泵浦低掺杂的 Yb:YAG 平面波导放大器。将泵浦源对称分置于种子光光轴两侧,泵浦光在波导中经多次反射通过芯层,可以实现更高的泵浦吸收效率,同时有利于提高泵浦吸收的均匀性,降低热效应的影响。对影响泵浦吸收率和均匀性的因素进行分析,同时建立了激光放大模型用于分析和优化多通泵浦平面波导放大器的性能。激光放大模型计算结果显示,优化后的对称多通泵浦平面波导激光放大器在泵浦吸收率和输出功率方面得到进一步提高。当输入泵浦总功率为 10 kW,注入种子光功率为 200 W 时,对称多通平面波导激光放大器的泵浦吸收率为 9680 W,获得的放大激光输出功率为 7483 W,光-光转换效率为 72.8%。同时,芯层的泵浦均匀性明显改善,热效应降低,利于获得更高质量的输出光束。

2 对称多通泵浦平面波导放大器

图 1 为对称多通平面波导结构示意图,芯层选择掺杂原子数分数为 1% 的 Yb:YAG,尺寸为 16 mm \times 0.2 mm \times 80 mm,上、下内包层均选择厚度为 0.5 mm、掺杂原子数分数为 0.5% 的 Er:YAG。在芯层与内包层周围键合 YAG,之后通过键合将尖晶石覆盖在 YAG 与 Er:YAG 之上作为外包层。平面波导结构关于 x 轴对称。平面波导泵浦光入射面镀有 940 nm 增透膜,反射面镀有 940 nm 高反膜,并分别与光轴(z 轴)呈一定角度。将平面波导两个端面分别作为种子光入射面和放大光出射面,镀有 1030 nm 增透膜。

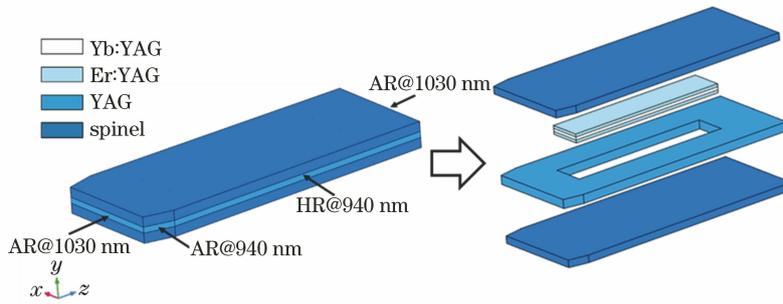


图 1 对称多通泵浦平面波导结构示意图

Fig. 1 Schematic of symmetrical multi-pass pumped planar waveguide

对称多通泵浦平面波导放大器的设置如图 2 所示。激光放大器使用的泵浦源为半导体激光堆栈，输出中心波长为 940 nm，与增益介质吸收峰的波长相同，发射的带宽为 3 nm，小于增益介质的泵浦吸收带宽(8 nm@940 nm)。慢轴发散角为 8.5°(全角, 95%能量)，快轴发散角为 0.28°(全角, 95%能量)，对应的发光区域尺寸为 10 mm×45.6 mm，最大连续输出功率为 5000 W。泵浦整形系统由两块柱透镜组成。泵浦光先经过焦距为 $f_1=130$ mm 的柱透镜在慢轴(非波导)方向扩束，后经过焦距为 $f_2=150$ mm 的柱透镜在快轴(波导)方向聚焦，并

耦合进入波导扩展区。泵浦光垂直于入射面进入波导后，在两个外包层反射面间来回反射传输，多次通过芯层，从而增加芯层对泵浦光的吸收长度。同时，泵浦方式采用对称泵浦，芯层宽度方向上的吸收功率密度分布具有对称性。种子源为光纤激光器，输出波长为 1030 nm，最大连续输出功率为 200 W，光束质量 $M^2=1.1$ 。种子光整形系统由三片透镜组成。种子光先经过焦距分别为 $f_3=360$ mm 和 $f_4=300$ mm 的两个球透镜缩束，后经过焦距为 $f_5=200$ mm 的柱透镜，并在波导方向聚焦耦合到波导芯层。

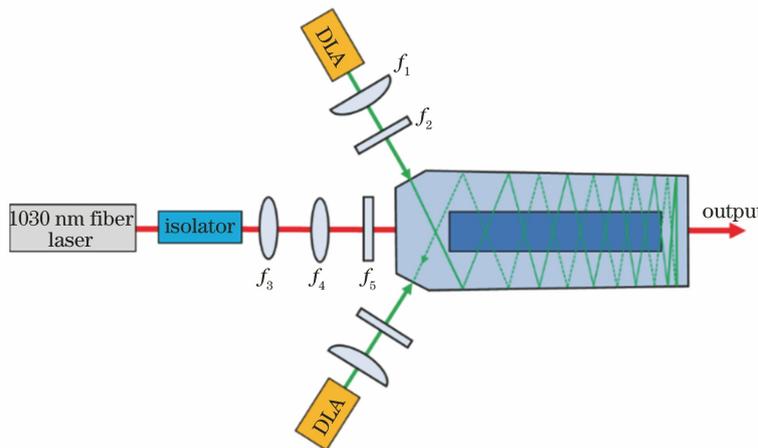


图 2 对称多通泵浦平面波导放大器设置

Fig. 2 Setup of symmetrical multi-pass pumped planar waveguide amplifier

3 平面波导结构的优化

在对平面波导结构进行优化时，希望优化的结构在具有较高的泵浦吸收率的同时，能够改善泵浦吸收均匀性。图 3 为平面波导几何参数示意图(俯视)。平面波导的最大宽度为 W ，在其左右两侧分别切角 α 和 β ，形成泵浦入射面和反射面。在波导长度方向上，最大宽度对应位置距种子光波导入射端面的距离为 L_1 ，距种子光芯层入射端的距离为

L_2 ，放大光芯层出射端与波导出射端的距离为 L_3 。

在对平面波导进行优化时，有两个关键问题需要解决。第一个问题是关于泵浦光对芯层的覆盖率。泵浦光在波导中传输时，每次被反射后传播方向与法线间的夹角都会减小。当 $\alpha - n \cdot 2\beta \leq 0$ 时，其中 n 为反射次数，泵浦光就会返回泵浦入射端。如果 α 太小或 β 太大，会使泵浦光在完全覆盖芯层前就返回泵浦输入端。在这种情况下，即使泵浦功率被充分吸收，但受 Yb^{3+} 再吸收效应的影响，放大

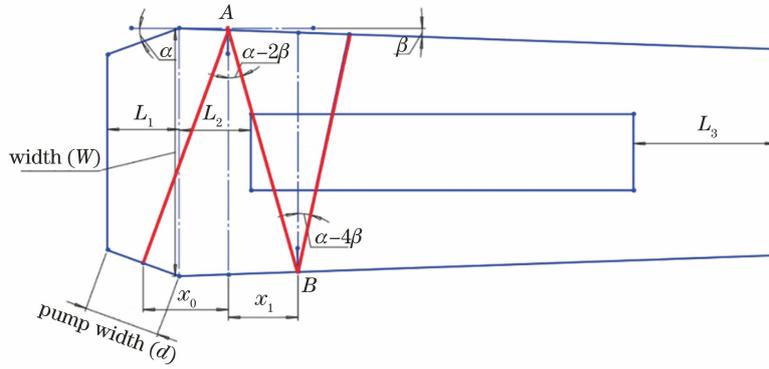


图 3 对称多通泵浦平面波导结构几何参数示意图

Fig. 3 Geometric parameters of symmetrical multi-pass pumped planar waveguide

光在芯层后半部分被吸收,进而导致整体提取效率降低,同时使芯层长度方向的泵浦均匀性变差。图 3 中 A、B 两个点为相邻反射过程中泵浦光中心光线与泵浦反射面的交点, x_0 为中心光线第一次反射过程中沿波导长度方向行进的距离, x_1 为第二次反射过程中沿波导长度方向行进的距离,以此类推,中心光线的总行进距离 $X = x_0 + x_1 + \dots + x_n$, 其表达为

$$X = \sum_{n=1} \frac{W_n}{\tan \beta + 1/\tan(\alpha - n \cdot 2\beta)}, \quad (1)$$

$$W_n = W_{n-1} - 2 \cdot x_{n-1} \cdot \tan \beta. \quad (2)$$

为了使泵浦光在传输过程中完全覆盖芯层, X 应大于 L_2 与芯层长度之和,最小值为 80 mm。考虑到 L_2 越大,吸收均匀性越好,因此 L_2 大于 0,但 X 的最大值约为 $140 - L_1$,为了兼顾泵浦吸收率与吸收均匀性,选择 $X = 100$ mm 作为总行进距离。

第二个问题是产生了泵浦空洞。当芯层中相应位置的泵浦功率密度低于阈值功率密度时,就会形成空洞。在对称泵浦中,空洞位于芯层中心线上,这是因为入射的两束泵浦光在波导中传输时,每次反射后会在芯层中心线上会聚后分离,分离位置的泵浦吸收功率密度明显减小。空洞处的吸收功率无法被提取,甚至空洞会吸收放大光的能量,影响整体提取效率。同时,空洞的出现会大幅增加芯层宽度方向上的吸收功率密度峰谷值,使吸收均匀性变差。在参数优化过程中,有两种方法可以抑制空洞的产

生:1)增加 L_2 的距离,使泵浦光在进入芯层区域前的传输距离增加。由于泵浦光的发散作用,两束泵浦光的光束宽度随着传输距离的增加而增大,这使得光束能够完全覆盖空洞,但 L_2 的长度受到 X 的限制。2)减小波导的宽度 W ,随着芯层长度方向上单位距离内反射次数的增加,泵浦光的交叠更加紧凑,以使泵浦光完全覆盖空洞。由于空洞对波导宽度 W 的改变更敏感,因此本实验选择减小波导宽度的方法来抑制空洞的形成,以优化泵浦吸收均匀性。

为了满足泵浦光能够完全进入波导内进行反射传输,而不会直接由对侧入射窗口泄漏, W 、 L_1 和 α 还需要满足以下条件:

$$\frac{L_1}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \leq W \leq 52. \quad (3)$$

为了兼顾泵浦吸收率与均匀性的设计要求,将同时影响泵浦吸收率与均匀性的 L_1 作为优化驱动参数。根据(1)~(3)式中各参数的约束关系,分别对不同 L_1 时的平面波导结构进行优化,最终得到的优化结果如下: $L_1 = 12$ mm, $L_2 = 11$ mm, $L_3 = 25$ mm, $\alpha = 15^\circ$, $W = 49$ mm, $\beta = 0.5^\circ$ 。

4 对称多通泵浦平面波导的激光放大特性

对称多通泵浦平面波导的激光放大特性使用激光放大方程求解^[16],其模型的理论基础为 Yb^{3+} 的动力学模型^[18],方程组为

$$a(x_0, y_0, z_0) = \sigma_{pn_d} \left[\frac{1 + \left(1 - \frac{f_{12}f_{03}}{f_{01}f_{11}}\right) \frac{I_L(x_0, y_0, z_0)}{I_L^S}}{1 + \left(1 + \frac{f_{03}}{f_{11}}\right) \frac{I_L(x_0, y_0, z_0)}{I_L^S} + \left(1 + \frac{f_{12}}{f_{01}}\right) \frac{I_P(x_0, y_0, z_0)}{I_P^S}} \right], \quad (4)$$

$$g(x_0, y_0, z_0) = \sigma_L n_d \left[\frac{\left(1 - \frac{f_{12} f_{03}}{f_{01} f_{11}}\right) \frac{I_P(x_0, y_0, z_0)}{I_P^S} - \frac{f_{03}}{f_{11}}}{1 + \left(1 + \frac{f_{03}}{f_{11}}\right) \frac{I_L(x_0, y_0, z_0)}{I_L^S} + \left(1 + \frac{f_{12}}{f_{01}}\right) \frac{I_P(x_0, y_0, z_0)}{I_P^S}} \right], \quad (5)$$

$$I_P^S = \frac{h\nu_P}{\sigma_P \tau_R}, \quad I_L^S = \frac{h\nu_L}{\sigma_L \tau_L}, \quad (6)$$

$$I_P(x_0, y_0, z_0) = \frac{\sum P_n \{ \exp[g(x_0, y_0, z_0) l_n] - 1 \}}{a(x_0, y_0, z_0) V}, \quad (7)$$

$$I_L(x_0, y_0, z_0) = \frac{\sum P_m \{ 1 - \exp[-a(x_0, y_0, z_0) l_m] \}}{g(x_0, y_0, z_0) V}, \quad (8)$$

式中: $a(x_0, y_0, z_0)$ 为离散单元吸收系数; $g(x_0, y_0, z_0)$ 为离散单元增益系数; f_{ij} 为 Stack 子能级的热居分布因子; σ_P 为泵浦吸收截面; σ_L 为激光发射截面; I_P 和 I_L 分别表示泵浦强度与激光强度; I_P^S 和 I_L^S 分别为泵浦饱和强度和激光饱和强度; τ_R 为自发辐射寿命; $I_P(x_0, y_0, z_0)$ 和 $I_L(x_0, y_0, z_0)$ 分别为离散单元内的泵浦强度与激光强度; P_m 和 P_n 分别表示入射至离散单元的泵浦光线与激光光线功率; l_m 和 l_n 分别表示泵浦光线与激光光线在离散单元中的光程; V 为离散单元体积。为了与文献[17]中的多通泵浦平面波导放大器特性进行对比分析, 在模拟对称多通泵浦平面波导放大器时, 使用的相关参数与文献[17]的参数相同。

4.1 泵浦吸收特性

当注入种子光功率为 200 W 时, 多通泵浦平

面波导泵浦吸收功率曲线如图 4(a) 所示, 泵浦吸收率曲线如图 4(b) 所示。对称多通泵浦平面波导的吸收功率随泵浦功率线性变化, 当泵浦功率为 10 kW 时, 对称多通泵浦平面波导吸收功率为 9680 W; 当泵浦功率小于 4000 W 时, 泵浦吸收率稳定在 98% 以上, 并随着泵浦功率的增加缓慢下降至 96.8%, 降幅为 1.2%。与文献[17]中的平面波导放大器相比, 相同泵浦功率下多通平面波导的泵浦吸收功率增加, 增幅随泵浦功率的增加逐渐增大, 最高增加了 342 W; 同时, 多通平面波导的泵浦吸收率变化幅度更小, 说明对称多通泵浦平面波导放大器受泵浦饱和程度的影响更小。因此, 对称多通泵浦平面波导不仅可以进一步提高泵浦吸收率, 还具有更好的吸收稳定性。

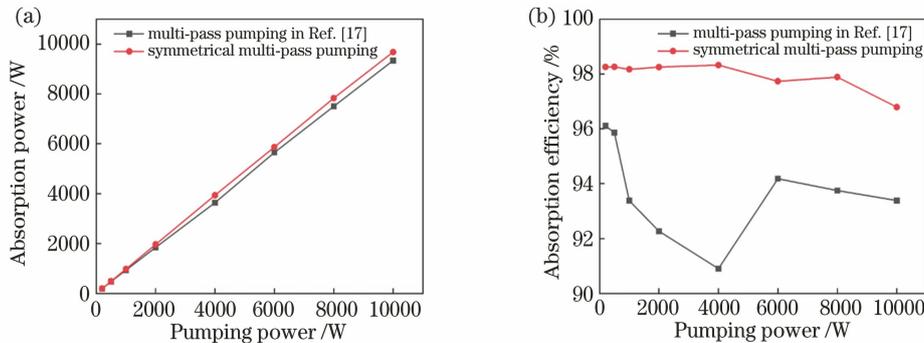


图 4 注入种子光功率为 200 W 时, 对称多通泵浦平面波导与文献[17]的多通泵浦平面波导的泵浦吸收功率和吸收率的变化曲线。(a) 泵浦吸收功率随泵浦功率的变化曲线; (b) 泵浦吸收率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 4 When the power of injected seed light is 200 W, the curves of pumping absorption power and pumping absorption efficiency for symmetrical multi-pass pumped planar waveguide and planar waveguide in Ref. [17]. (a) Pumping absorption power versus pumping power; (b) pumping absorption efficiency versus pumping power

本实验的设计目标是获得高功率泵浦条件下吸收功率密度沿芯层宽度方向的对称性, 改善泵浦吸收的均匀性, 因此对泵浦功率为 10 kW 时, 对称泵浦平面波导与已有研究^[17]中的平面波导芯层的吸

收功率密度分布进行比较。当泵浦功率为 10 kW 时, 对称多通泵浦平面波导芯层的吸收功率密度分布如图 5(a) 所示。图 5(b) 所示为相同泵浦输入条件下, 文献[17]中的平面波导芯层的吸收功率密度

分布。在对称多通泵浦平面波导中,芯层宽度方向(x 轴)上的吸收功率密度呈对称分布,峰谷(P-V)值最大为 20 W/mm^3 (位置 A);芯层整体的吸收功率密度 P-V 值为 38.9 W/mm^3 。在文献[17]的平面波导中,芯层宽度方向的 P-V 值最大为 40 W/mm^3 (位置 B)。相比于文献[17]中的平面波

导,对称多通泵浦平面波导芯层的吸收功率密度分布除了具有对称性外,宽度方向上吸收功率密度的最大 P-V 值减小了 20 W/mm^3 ,芯层整体的吸收功率密度 P-V 值减小了 14.4 W/mm^3 。由于吸收功率密度 P-V 值越小,吸收均匀性越好,因此对称多通泵浦平面波导具有更好的泵浦吸收均匀性。

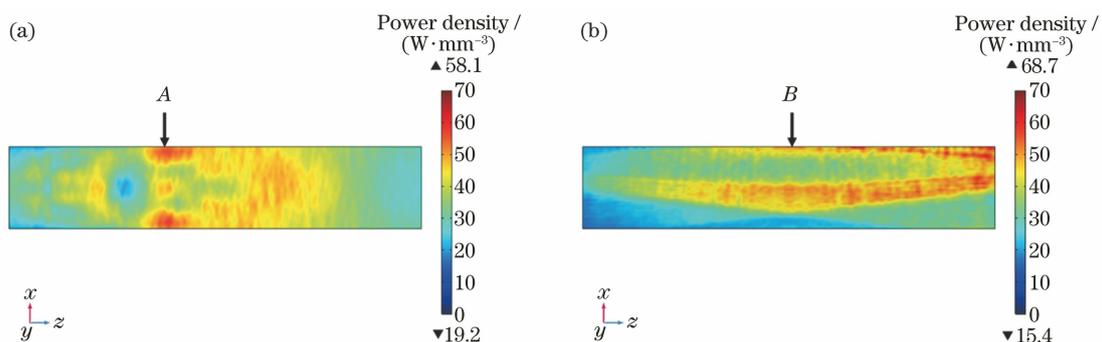


图 5 泵浦功率为 10 kW 时,平面波导芯层的吸收功率密度分布。(a)对称多通泵浦平面波导;(b)文献[17]的平面波导

Fig. 5 Absorbed power density distribution of the core when pumping power is 10 kW. (a) Symmetrical multi-pass pumped planar waveguide; (b) planar waveguide in Ref. [17]

4.2 温度特性

采用与文献[17]相同的热传导模型计算得到对称多通泵浦平面波导的温度分布。波导上下大面分别采用铜质水冷热沉进行散热,计算采用的换热系数为 $20000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;其他外表面为自然对流,计算采用的换热系数为 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。当泵浦功率为 10 kW 时,对称多通泵浦平面波导的芯层温度分布如图 6(a)所示。图 6(b)所示为相同泵浦输入条件下,文献[17]中多通泵浦平面波导的芯层温度

分布。受泵浦吸收分布影响,对称多通泵浦平面波导的芯层温度在宽度方向上呈对称分布,在长度方向上温度分布呈现两边低中间高,最大温度为 $106 \text{ }^\circ\text{C}$ 。与文献[17]的平面波导相比,对称多通泵浦平面波导的芯层温度分布对称性可以使得种子光在波导中进行放大时,光束左、右两侧受到的热效应影响相同,从而阻止光轴在宽度方向上发生偏移。同时,芯层端面的温度更低,使得芯层中温度梯度减小,从而可以进一步减弱端面效应的影响。

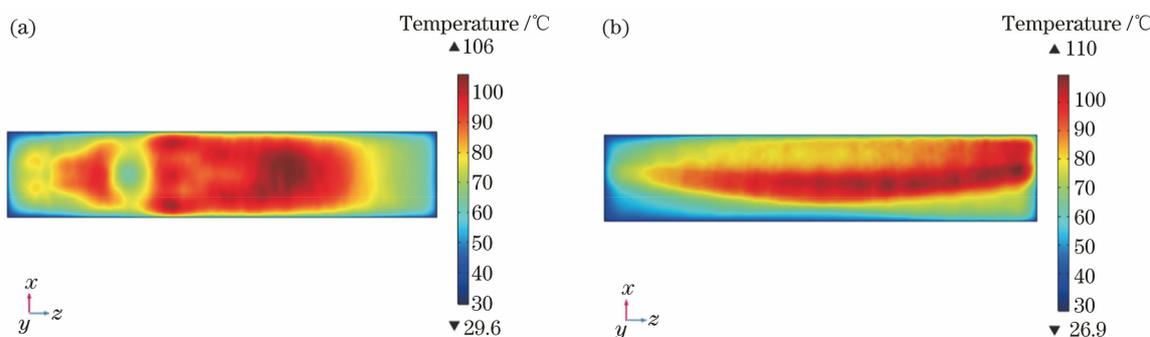


图 6 泵浦功率为 10 kW 时,平面波导芯层温度分布。(a)对称多通泵浦平面波导;(b)文献[17]的平面波导

Fig. 6 Temperature distribution of the core when pumping power is 10 kW. (a) Symmetrical multi-pass pumped planar waveguide; (b) planar waveguide in Ref. [17]

另外,对称多通泵浦平面波导的最大温度更小,当厚度方向上(y 轴)的温度梯度减小时,平面波导不同组成部分的最大应力减小。因此,对称多通泵浦平面波导同样具有更低的热损伤风险。表 1 列出了多通泵浦平面波导不同组成部分的最大热应力。

4.3 放大输出特性

图 7(a)所示为种子光输出功率为 200 W 时,多通泵浦平面波导放大器的输出功率与光-光转换效率随泵浦功率的变化曲线。可以看到:对称多通泵浦平面波导放大器的阈值功率为 500 W;泵浦功率越高,输出功率越大,光-光转换效率趋于饱和。当

泵浦功率为 10 kW 时,输出功率为 7483 W,对应的光-光转换效率为 72.8%。与文献[17]中的多通泵浦平面波导放大器相比,对称多通泵浦平面波导的阈值功率没有明显变化,输出功率与光-光转换效率

随泵浦功率的变化趋势相同,但由于吸收功率更高,不同泵浦功率对应的输出功率与光-光转换效率增大,分别增加了 172 W 和 1.7 个百分点。因此,对称多通泵浦平面波导放大器的放大输出性能更好。

表 1 多通泵浦平面波导各部分的最大热应力

Table 1 The maximum thermal stress in parts of multi-pass pumped planar waveguides

Waveguide	Maximum thermal stress /MPa		
	Core	Inner cladding	Outer cladding
Symmetrical multi-pass pumped planar waveguide	12.8	29.0	83.7
Planar waveguide in Ref. [17]	13.9	32.4	84.2

在本实验中,温度条件为恒温,但实际进行高功率放大时,温度升高会明显影响放大器的输出功率,因此泵浦功率越高,实际的激光输出与计算结果的差距越大。最终的激光输出是温度变化、泵浦吸收和放大提取间平衡的结果,会在一定范围内变化。为了获得放大器稳定运行时的输出功率范围,还需要得到输出功率的下限值。由于恒温时的泵浦吸收功率最大,对应的芯层温度最高,若以此作为计算时的温度条件,就可以得到输出功率的下限值。图 7(a)中虚线对应对称多通泵浦平面波导放大器输出功率的下限,实际的激光输出曲线位于上限与下限曲线之间的区域内。当泵浦功率低于 2000 W 时,输出功率几乎不受温度影响。随着泵浦功率的增加,实际输出曲线的变化范围逐渐增大。当泵浦功率为 10 kW 时,得到的输出功率为 6527 W,因此当温度变化、泵浦吸收和放大提取过程之间实现平衡时,输出功率仍可以维持在 6500 W 以上,对应的光-光转换效率大于 63%,而输

输出功率的变化范围应小于输出功率的变化范围。

图 7(b)所示为多通平面波导中放大光功率随芯层长度的变化曲线。泵浦方式的差异使得放大光功率在芯层中的变化趋势呈现出明显不同。当芯层长度小于 10 mm 时,对称多通泵浦平面波导放大器与文献[17]中平面波导放大器的放大光功率曲线几乎重合,这是由入射端的种子光强度较低,导致提取效率不足造成的。但随着传播距离的增加,二者的放大光功率差距逐渐增大,在芯层长度为 65 mm 时该差距达到最大值。这是因为在对称多通泵浦平面波导放大器中,芯层在宽度方向具有更好的吸收均匀性,除放大光中心外,光束边缘也能获得足够的强度来实现充分提取。在芯层长度大于 65 mm 后,对称泵浦平面波导放大器的放大光功率增长幅度变小,这是因为在放大光出射端附近吸收功率减小,尽管放大光强度已足够高,获得的提取效率也较高,但可提取功率降低。

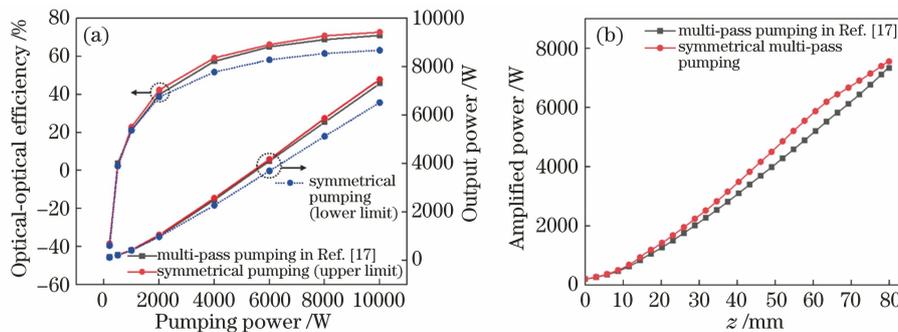


图 7 注入种子光功率为 200 W 时,对称多通泵浦平面波导与文献[17]中多通泵浦平面波导的功率和转换效率的变化曲线。(a)输出功率与光-光转换效率随泵浦功率的变化曲线;(b)放大光功率随芯层长度的变化曲线

Fig. 7 When the power of injected seed light is 200 W, the curves of power and conversion efficiency for symmetrical multi-pass pumped planar waveguide and planar waveguide in Ref. [17]. (a) Output power and optical-optical conversion efficiency versus pumping power; (b) amplified power versus length of the core

图 8(a)所示为种子光在芯层入射端面的强度分布,图 8(b)所示为文献[17]中多通平面波导放大器的输出光束在芯层出射端的强度分布,图 8(c)所示为对称多通泵浦平面波导放大器的输出光束在芯

层出射端的强度分布,图 8(d)所示为芯层宽度方向的激光强度分布曲线。对称多通泵浦平面波导放大器的输出光束峰值强度为 236.1 kW/cm²。芯层宽度方向上的激光强度分布由输入时的高斯分布变为

平顶分布,如图 8(d)所示。相比文献[17]中的平面波导放大器,对称多通泵浦平面波导放大器的输出光束芯层宽度方向上的激光输出强度分布左右对称

且更均匀,峰值强度下降了 18%,这是因为芯层中的泵浦吸收功率密度分布均匀性更好,种子光束边缘也能获得足够的强度来实现线性提取。

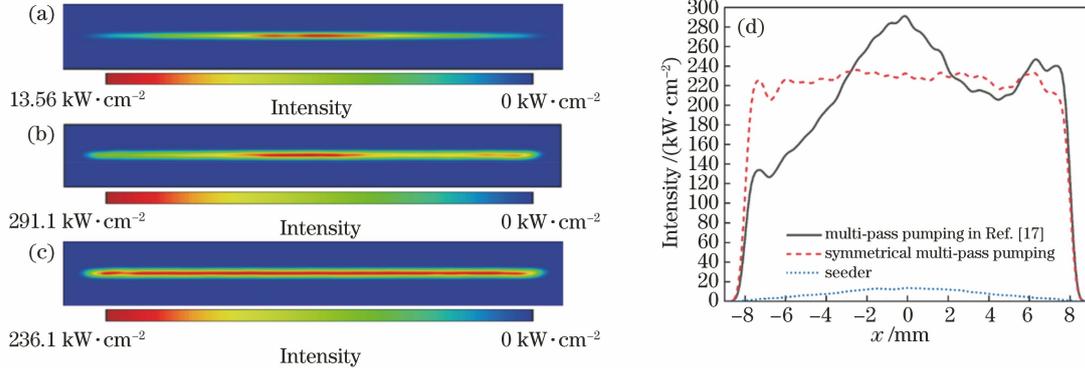


图 8 不同端面的激光强度分布。(a)芯层入射端面;(b)文献[17]中平面波导芯层出射端面;(c)对称多通泵浦平面波导芯层出射端面;(d)芯层宽度方向的激光强度分布曲线

Fig. 8 Intensity distribution of laser beam at different end faces. (a) Incident end of the core; (b) exit end of the core of planar waveguide in Ref. [17]; (c) exit end of the core in symmetric multi-pass pumped planar waveguide; (d) intensity distribution along the width of the core

热畸变是高功率放大器光束质量的主要影响之一。输入种子光为近基模光,由于在波导方向受波导约束,放大输出光仍为近基模光,热畸变对光束质量的影响可以忽略,因此只考虑芯层宽度方向的热畸变。由热畸变引起的平面波导宽度方向的光程差(OPD)可表示为

$$D_{OP} = \frac{dn}{dt} \int_L (T - T_{ext}) dz, \quad (9)$$

式中: $dn/dt = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,为芯层热光系数; T_{ext} 为室温,取 293 K; L 为芯层长度。根据图 6(a)中的温度分布,绘制了文献[17]的平面波导与对称多通泵浦平面波导芯层宽度方向的 OPD 曲线,如图 9 所示。在对称多通泵浦平面波导放大器中,放大光的光束中心部分几乎不受热畸变影响,仅光束边缘的 OPD 出现退化,且在 20 个波数以内。另外,相比于文献[17]中的平面波导放大器,对称多通泵浦平面波导放大器的 OPD 最大值减小了 30%,同

时具有对称性,因此可以认为对称多通泵浦平面波导放大器输出光束的质量更高。

5 结 论

设计了一种对称多通泵浦双包层平面波导结构,以进一步提高多通泵浦平面波导放大器的性能。分析了对称多通泵浦平面波导放大器泵浦吸收特性的影响因素,推导了相关几何参数间的关系并据此对平面波导的结构进行了优化。采用激光放大模型模拟了对称泵浦多通平面波导放大器的泵浦吸收特性、热效应与放大输出特性,并与已有研究的多通泵浦平面放大器的特性进行了对比。结果显示:使用对称多通泵浦平面波导进行放大可以使芯层的吸收功率密度具有对称性,吸收均匀性也得到了明显改善;对称多通泵浦平面波导放大器具有较高的泵浦吸收率与稳定性,其均匀且对称的芯层温度分布有利于抑制端面效应与由光轴偏移造成的光束质量退化,同时热损伤风险小。最终在泵浦功率为 10 kW,注入种子光功率为 200 W 时,对称多通泵浦平面波导可获得的最大泵浦吸收功率为 9680 W,对应的泵浦吸收率为 96.8%,最大的放大输出功率为 7483 W,对应的光-光转换效率为 72.8%。

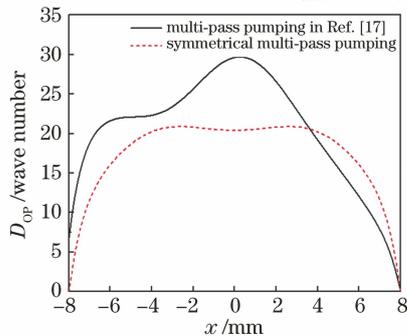


图 9 芯层宽度方向的 OPD 曲线

Fig. 9 The OPD profiles along the width direction of the core

参 考 文 献

[1] Bruesselbach H, Sumida D S. A 2.65-kW Yb:YAG single-rod laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 600-603.

- [2] Peng Y H, Lim Y X, Cheng J, et al. Multi-kW high brightness Yb:YAG thin disk laser[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8599: 85991B.
- [3] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S, et al. Physics of high performance Yb:YAG thin disk lasers [C]//2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, June 2-4, 2009, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-2.
- [4] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 719507.
- [5] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag[®] laser program [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2010: JThH2.
- [6] Fomin V, Gapontsev V, Shcherbakov E, et al. 100 kW CW fiber laser for industrial applications [C]//2014 International Conference Laser Optics, June 30-July 4, 2014, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2014.
- [7] Chen Y J, Jiang H, Wang J T, et al. Planar waveguide oscillator with high output power and high efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0401001.
陈月健, 姜豪, 王君涛, 等. 高功率高效率平面波导激光振荡器实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0401001.
- [8] Filgas D, RockWell D, Spariosu K. Next-generation lasers for advanced active EO systems[J]. Raytheon Technologies, 2008, 1: 9-13.
- [9] Grivas C. Optically pumped planar waveguide lasers, Part I: fundamentals and fabrication techniques[J]. Progress in Quantum Electronics, 2011, 35(6): 159-239.
- [10] Chen S L, Liu Q, Meng J Q, et al. Research progress in planar waveguide lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050004.
陈思露, 刘琪, 孟俊清, 等. 平面波导激光器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050004.
- [11] Thomson I J, Baker H J, Wlodarczyk K, et al. 400 W Yb:YAG planar waveguide laser using novel unstable resonators[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 75780K.
- [12] Thomson I J, Wlodarczyk K L, Hall D R, et al. High brightness Yb:YAG planar waveguide laser with an unstable resonator formed with a novel laser-machined, toroidal mode-selective mirror [C]//Advanced Solid-State Photonics 2012, January 29-February 1, 2012, San Diego, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2012: AW4A.19.
- [13] Wang J T, Wang X J, Zhou T J, et al. Design of end-pumped double cladding Nd:YAG planar waveguide laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102009.
王君涛, 王小军, 周唐建, 等. 端面抽运双包层 Nd:YAG 平面波导激光放大器设计 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102009.
- [14] Wang J, Wu Z, Su H, et al. 1.5 kW efficient CW Nd:YAG planar waveguide MOPA laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3149-3152.
- [15] Yu A W, Betin A, Krainak M A, et al. Highly efficient Yb:YAG master oscillator power amplifier laser transmitter for future space flight missions[C]//Advanced Solid-State Photonics 2012, January 29-February 1, 2012, San Diego, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2012: AW4A.26.
- [16] Lin W P, Jiang N, Zhou T J, et al. 1030 nm laser amplification of Yb:YAG ceramic planar waveguide [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0501002.
林伟平, 姜楠, 周唐建, 等. Yb:YAG 陶瓷平面波导 1030 nm 激光放大 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0501002.
- [17] Qu B, Liu Q, Wang S B, et al. High efficiency multi-pass pumped planar waveguide laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601002.
曲波, 刘奇, 王思博, 等. 高效率多通泵浦平面波导激光放大器 [J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601002.
- [18] Brown D C, Vitali V A. Yb:YAG kinetics model including saturation and power conservation [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(1): 3-12.