

LD 泵浦 Er, Yb:glass 板条多程放大器设计 及热效应分析

张可欣^{1,2}, 王凯鑫^{1,2}, 高春清^{1,2*}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

摘要 设计了一种 LD 阵列泵浦的钕镱共掺磷酸盐玻璃(Er, Yb:glass)板条放大器, 通过多次折叠反射结构来提高能量提取效率, 实现 1.5 μm 波段较大能量的激光输出, 激光放大增益可达 35.29 倍。基于稳态热传导理论, 对所设计的 Er, Yb:glass 板条放大器进行了热效应分析, 建立了热力耦合模型, 采用有限元方法比较不同参数条件下板条介质的热力学特性。结果表明通过提高板条宽厚比和减小泵浦光功率密度可以有效缓解热效应, 在此基础上提出了一种补偿波前畸变的方法。

关键词 激光器; Er, Yb:glass; 多程; 板条放大器; 热效应

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0514001

Design and Thermal Effect Analysis of LD Pumped Er, Yb:glass Slab Multi-pass Amplifier

Zhang Kexin^{1,2}, Wang Kaixin^{1,2}, Gao Chunqing^{1,2*}

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Information Photonics Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China

Abstract An Er, Yb:glass slab amplifier pumped by laser diode (LD) array is designed in this paper, which adopts a multi-bounce structure to improve extraction efficiency. It is expected to achieve the laser output with greater energy in the 1.5 μm band, and the laser amplification gain can reach 35.29. Based on the steady-state heat conduction theory, the thermal effect of the Er, Yb:glass slab amplifier is analyzed and the thermo-mechanical coupling model is established. The thermodynamic characteristics of the slab medium at different parameters are compared by the finite element method. The results indicate that the thermal effect can be effectively alleviated by increasing the width-thickness ratio of the slab and reducing the power density of the pump light. Based on the analysis, a method for wavefront distortion compensation is proposed.

Key words lasers; Er, Yb:glass; multi-pass; slab amplifier; thermal effect

1 引言

人眼安全波段激光光源在激光雷达、遥感、大气环境探测和自由空间光通信等领域具有广阔的应用前景。目前, 1.5 μm 波段的人眼安全激光光源多为

掺铒光纤激光器, 但由于光纤中的非线性效应, 很难获得较大能量的激光输出, 其输出能量限制在百微焦量级^[1]。与掺铒的光纤介质相比, 钕镱共掺磷酸盐玻璃是可输出 1.5 μm 波段激光的固体材料^[2], 有望获得大能量的激光输出。然而磷酸盐玻璃具有

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61627821)

通信作者: *gao@bit.edu.cn

较大的热膨胀系数和较低的热断裂极限,更容易发生热损伤,这些是目前限制 Er, Yb: glass 激光器输出大能量激光的主要原因^[3]。

与单一的激光振荡器相比,主振荡功率放大器(MOPA)是获得高功率和高光束质量激光输出的有效技术之一。近年来,国内外多个课题组研究了在 1 μm 波段采用多程放大技术提高系统输出能量的方法,如薄片多程放大器^[4]、棒状四程放大器^[5]、多光路折叠板条放大器^[6]、多通平面波导放大器^[7]等。与 1 μm 波段的激光介质相比,1.5 μm 波段的 Er, Yb: glass 的受激发射截面较小,热效应严重^[8]。与棒状激光介质相比,平面波导和板条结构可以提供更大的冷却表面,这有利于 Er, Yb: glass 放大器承受更高的泵浦功率。日本三菱公司开展了 Er, Yb: glass 平面波导放大器的研究,设计制作了芯层厚度为 19 μm ,内包层厚度为 105 μm 的平面波导,获得了重复频率 4 kHz、脉冲能量 3.2 mJ 的激光输出^[9]。2015 年,美国国家航空航天局(NASA)基于多通道 Er, Yb: glass 平面波导的 MOPA 结构将激光脉冲能量放大到 1.5 ~ 2 mJ,其波导厚度为 0.5 mm^[10]。根据三菱公司和 NASA 的研究结果,为了获得单模激光输出,要求芯层与内包层折射率差小于 0.3%,芯层和内包层厚度仅有十几微米到百微米,因此对波导的制作技术要求很高^[11]。相比之下,板条结构的激光介质则更容易制作和加工。

基于上述研究背景,本文设计了一种 LD 阵列双端泵浦 Er, Yb: glass 板条的多程放大器,旨在实现 1.5 μm 波长毫焦量级脉冲激光输出。文中介绍了 Er, Yb: glass 板条多程放大器结构,计算了板条激光放大器的增益,并基于有限元方法对放大器热效应的影响因素展开了讨论与分析。

2 Er, Yb: glass 多程板条放大器设计

2.1 多程板条放大器设计

本文所设计的 Er, Yb: glass 板条结构如图 1 所示,板条长度为 30 mm,宽度 5 mm,厚度 1 mm。首先需确定 Er³⁺ 和 Yb³⁺ 的掺杂浓度(质量分数)。根据文献^[12],合适的 Er³⁺ 掺杂浓度应最大限度地提高 Yb³⁺ \rightarrow Er³⁺ 的能量转移效率,同时避免上转换损失和浓度淬灭。合适的 Yb³⁺ 浓度应最大限度地提高 Yb³⁺ \rightarrow Er³⁺ 的传输速率,同时保证泵浦光的高效吸收和均匀泵浦之间的平衡。一般增益介质中轻掺杂 Er³⁺ 可以降低重吸收损耗和激光阈值,重掺杂 Yb³⁺ 有利于更好地吸收泵浦光。因此,本研究将

Er, Yb: glass 中 Er³⁺ 和 Yb³⁺ 的质量分数确定为 0.52% 和 22%。

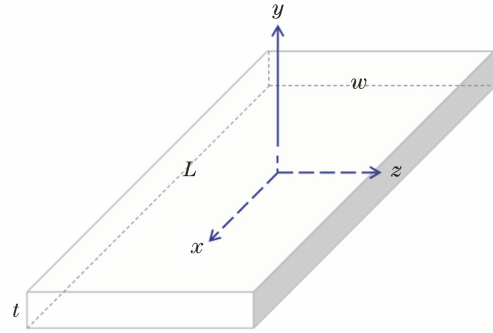


图 1 Er, Yb: glass 板条结构模型

Fig. 1 Geometry model of Er, Yb: glass slab

本研究设计的 Er, Yb: glass 多程放大器如图 2 所示。本研究采用输出波长为 940 nm 的 LD 为泵浦光源。LD1 和 LD2 分别由三根 LD 巴条组成,每根巴条由单个微透镜准直,经过整形透镜系统后,得到一个面积约为 0.8 mm \times 30 mm 的匀化泵浦光斑,再将其耦合进 Er, Yb: glass 板条放大器。板条侧面镀有 940 nm 和 1550 nm 增透膜,上下两个未抛光的大面安装在半导体制冷器和由循环水冷却的铜散热器上。为了抑制寄生振荡和自发辐射放大(ASE),本研究将镀有 1550 nm 高反(HR)膜和 940 nm 增透(HT)膜的两个平面双色镜稍微倾斜放置。种子光源采用中心波长 1550 nm,重复频率 1 kHz,脉冲能量 70 μJ 的激光。种子光进入放大器前由柱透镜实现模式匹配。M1、M2、M3 为 45° 高反镜,轻微旋转反射镜 M3,使种子光以一个小角度 θ 进入放大装置。通过调节入射角 θ 的大小,控制种子光往返经过增益介质的次数,最终实现多程放大。

2.2 Er, Yb: glass 增益计算

小信号高增益放大器要获得高的增益倍率,必须同时考虑两方面因素:高增益系数和抑制自激振荡。在稳态板条放大器中,为了准确描述 Er, Yb: glass 多程放大器的增益,将归一化输入能量密度 D_{in}/D_s 描述为^[13]

$$D_{\text{in}}/D_s = \ln(G_0/G)/G - 1, \quad (1)$$

式中, D_{in} 为入射脉冲能量密度。 $D_s = h\nu/\gamma\sigma_e$ 为饱和能量密度,是一个表示放大器能量提取难度的物理量,其中 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数, ν 为激光的光频率, γ 为简并度, σ_e 为受激发射截面。从表达式可知,受激发射截面越小,饱和能量密度 D_s 则越高,能量提取也越困难。对于激光放大器来说,

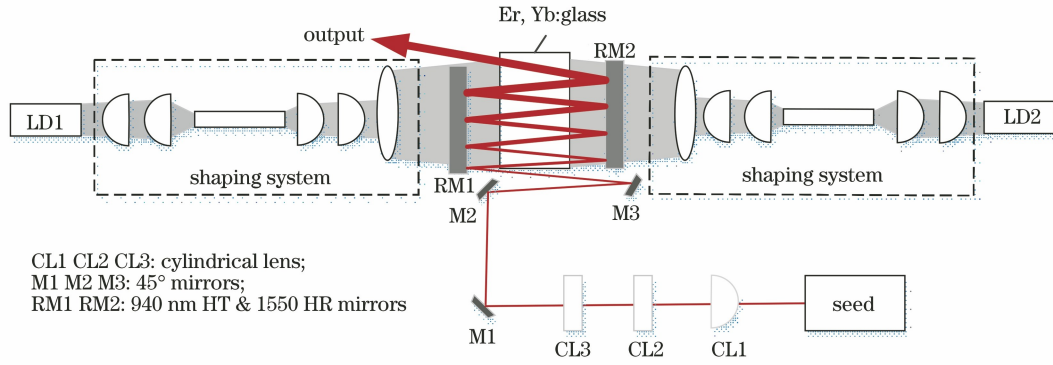


图 2 Er, Yb:glass 多程放大器示意图

Fig. 2 Schematic view of the Er, Yb:glass multi-pass amplifier

种子光的入射能量密度应接近饱和能量密度, 才能获得更高的能量提取效率。G 表示多程放大器总的放大增益, $G_0 = \exp(g_0 l)$ 表示增益长度为 l 的放大器中小信号单程增益, 且小信号增益系数 g_0 为

$$g_0 = \frac{\sigma_e \tau_f \eta_q \eta_s \eta_{abs} P}{h\nu V}, \quad (2)$$

式中, τ_f 为荧光寿命, η_q 为量子效率, η_s 为斯克托斯因子, η_{abs} 为泵浦光吸收效率, P 为泵浦功率, V 为泵浦区域体积。

种子光输出能量密度 D_{out} 和输出能量 E_{out} 可分别表示为

$$D_{out} = G \cdot D_{in} = D_s \cdot \ln\{1 + [\exp(D_{in}/D_s) - 1] \cdot \exp(g_0 l)\}, \quad (3)$$

$$E_{out} = D_{out} \cdot S, \quad (4)$$

式中 S 为激光束的截面积。

根据(1)~(4)式, 利用 MATLAB 进行仿真计算, 相关物理参数见表 1。计算结果如图 3 所示, 当有效增益长度约 200 mm(即放大次数约为 40)时, 在一定范围内随着泵浦功率的增加, 输出脉冲能量不断提高。一般情况下, 放大器可提取的能量约为

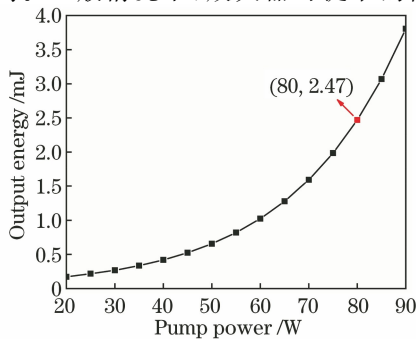


图 3 多程放大器中输出能量与泵浦功率的关系

Fig. 3 Relationship between output energy and pump power in multi-pass amplifier

饱和能量的 10 倍, 超出此范围的泵浦能量将被 ASE 消耗。因此应适当控制泵浦功率, 避免泵浦功率过大导致 ASE 快速增长。当泵浦功率为 80 W 时, 重复频率 1 kHz, 脉冲能量 70 μ J 的种子光经过 Er, Yb:glass 板条多程放大系统后, 可获得 2.47 mJ 脉冲输出能量。此时相应的增益长度积 $g_0 l$ 约为 3.59, 放大器增益约为 35.29。根据文献[14], 如果 $g_0 l < 4$, ASE 将可以忽略。

表 1 仿真计算中使用的物理参数

Table 1 Parameters used in the simulation

Parameter	Value
Energy level degeneracy	$\gamma=2$
Stimulated emission cross section	$\sigma_e=0.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Fluorescence lifetime	$\tau_f=7.9 \text{ ms}$
Quantum efficiency	$\eta_q=0.95$
Stokes factor	$\eta_s=0.606$
Pump absorption efficiency	$\eta_{abs}=0.95$
Incident seed energy density	$D_{in}=140 \text{ J/m}^2$
Laser beam cross section area	$S=0.5 \text{ mm}^2$
Gain length	$l \approx 200 \text{ mm}$

2.3 Er, Yb:glass 热仿真实理论模型

由于量子缺陷, 激光放大器中一部分泵浦能量会被转移到激光介质中以产热的形式耗散。为了评价 Er, Yb:glass 板条结构在双端泵浦作用下的热效应, 建立了如图 1 所示的坐标系。假设板条中心为坐标原点, 沿增益介质的长度 L 、厚度 t 和宽度 w 方向分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴。板条的上下两个冷却面在 TEC 和水冷却散热器作用下保持恒定温度, 而其余四个端面 Σ 与空气自然对流散热。

根据傅里叶定律和能量守恒定律, LD 双端泵浦 Er, Yb:glass 板条结构的温度场 $T(x, y, z)$ 满足以下稳态热传导方程和边界条件^[15]

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \\ K_z \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + Q(x, y, z) = 0 \\ T(x, \pm t/2, z) = T_c \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = h_0 (T_{\Sigma} - T_0) \end{cases}, \quad (5)$$

式中, $K_x = K_y = K_z = K$ 表示各向同性介质在 x 、 y 、 z 三个方向上的热传导系数, T_c 和 T_0 分别为冷却温度和周围环境温度, h_0 为介质端面与空气的自然对流换热系数, $Q(x, y, z)$ 为介质内部的热源函数, 即热功率密度, 代表单位体积产热量。

LD 发出的泵浦光经过整形匀化后进入板条介质, 沿水平 x 方向呈均匀分布, 沿 y 方向上近似高斯分布, 沿 z 方向呈指数吸收。因此热源函数 $Q(x, y, z)$ 可表示为^[16]

$$Q(x, y, z) = \frac{\alpha \eta P_{\text{abs}}}{2\omega_p(z)L} \cdot \left\{ \exp \left[-\alpha \left(\frac{\omega}{2} - z \right) \right] + \exp \left[-\alpha \left(\frac{\omega}{2} + z \right) \right] \right\} \cdot \exp \left[-\frac{2y^2}{\omega_p(z)^2} \right], \quad (6)$$

式中, α 是介质对泵浦光的吸收系数, $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l$ 是产热效率, λ_p 为泵浦光波长, λ_l 为激光波长, $P_{\text{abs}} = \eta_a \cdot P_{\text{in}}$ 是介质吸收的泵浦功率, $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha \cdot \omega)$ 为介质对泵浦光的吸收效率, P_{in} 为单端入射泵浦功率, $\omega_p(z)$ 是泵浦光在 z 位置处的光斑半径, 其表达式为^[17]

$$\omega_p^2(z) = \omega_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{M^2 \lambda_p z}{n \pi \omega_0^2} \right)^2 \right], \quad (7)$$

式中, ω_0 为泵浦光斑束腰半径, M^2 为光束质量因子, n 为折射率, λ_p 为泵浦光波长。

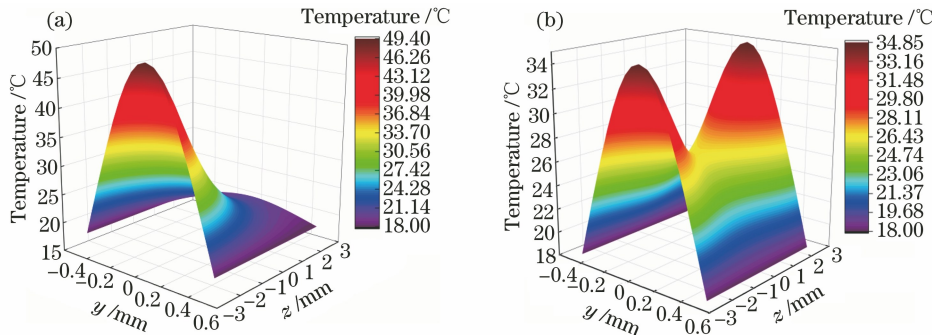


图 4 不同泵浦方式下板条介质在 y - z 平面上的三维温度分布。(a)单端泵浦;(b)双端泵浦

Fig. 4 Three-dimensional temperature distribution of the slab medium on the y - z plane at different pump modes. (a) Single-ended pump; (b) dual-ended pump

经查阅, Er, Yb: glass 激光介质的相关物理参数如表 2 所示^[12]。

表 2 Er, Yb: glass 激光介质的物理特性参数
Table 2 Physical characteristic parameters of the Er, Yb: glass laser medium

Parameter	Value
Thermal conductivity	$K = 0.85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Young's Modulus	$E = 67 \text{ GPa}$
Poisson ratio	$\mu = 0.24$
Thermal expansion coefficient	$\alpha_T = 8.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Thermal optical coefficient	$dn/dT = -2.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Cooling water temperature	$T_c = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
Room temperature	$T_0 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$
Convective heat coefficient of air	$h_0 = 27.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Pump beam waist radius	$\omega_0 = 400 \text{ } \mu\text{m}$
Thermogenesis efficiency	$\eta = 0.3935$
Absorption coefficient	$\alpha = 6 \text{ cm}^{-1}$
Refractive index	$n = 1.532$

3 讨论与分析

3.1 不同参数条件对热力分布的影响

本研究基于端面泵浦板条放大器的热力耦合理论, 利用有限元方法求解了 Er, Yb: glass 板条介质中的温度和应力分布^[18], 分析了不同泵浦条件和板条结构参数对增益介质中热效应的影响。

本研究分别采用单端泵浦和双端泵浦两种泵浦方式, 得到 $x = 0 \text{ mm}$ 处沿泵浦光传输方向 (即 y - z 平面) 的温度分布, 如图 4 所示。在单端泵浦方式下, 泵浦光主要在入射端面附近被吸收, 最高温度出现在入射端面处。当改为双端泵浦模式时, 相同传输界面内部的最大温差由 $31.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $16.85 \text{ }^\circ\text{C}$ 。双端泵浦方式下的介质内温度分布更加均匀, 可有效降低由温差引起的热应力。

考虑到增益介质的几何结构对热效应的影响非常大,本研究设计了 4 种具有不同宽厚比的 Er,Yb:glass 板条样品(具体尺寸如表 3 所示),并分别进行了热力学仿真,得到最高温度与最大应力结果如图 5 所示。由图表可以看出,在 4 个板条样品当中,样品 2 的宽厚比最大,对应的最高温度 51.6 °C 和最大应力 78.348 MPa 也都最小。因此本文将 Er,Yb:glass 的板条尺寸设计为 30 mm×5 mm×1 mm。当板条宽度 $w=5$ mm 时,泵浦功率吸收效率为 $\eta_a=1-\exp(-\alpha \cdot w) \approx 95\%$,随着样品 2、样品 3、样品 4 的宽厚比降低,最高温度和最大应力依次升高。对于热性能较差的激光介质而言,在泵浦功率充分吸收的情况下,适当增大板条结构的宽厚比是一种减弱热效应的有效方法。

表 3 Er,Yb:glass 板条样品的几何参数

Table 3 Geometric parameters of Er,Yb:glass slab sample

Sample	Length L /mm	Width w /mm	Thickness t /mm
1	30	4	1
2	30	5	1
3	30	5	1.2
4	30	5	1.6

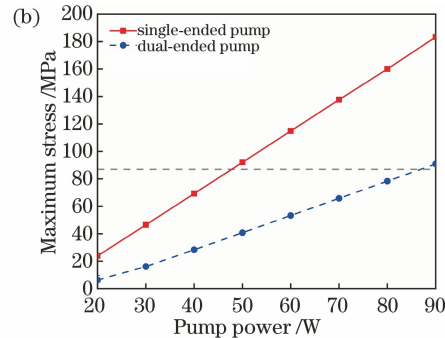
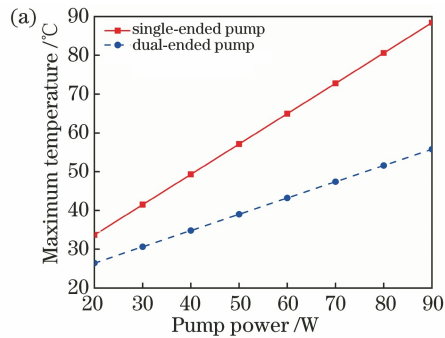


图 6 不同泵浦功率下的热力学仿真结果。(a)最高温度;(b)最大应力

Fig. 6 Thermodynamic results at different pump power. (a) Maximum temperature; (b) maximum stress

在其他条件不变的情况下,只改变泵浦光斑束腰半径 ω_0 ,本研究得到板条介质内部沿 z 轴方向的温度分布和应力分布,如图 7 所示。泵浦光斑束腰半径 ω_0 越大,在介质内部同一位置处的温度值和应力值就越小。由此可知,在相同泵浦功率情况下,通过增大泵浦光的束腰半径,尽量使泵浦光充分地填充激光介质,可以达到减小泵浦功率密度的目的,从而能够有效降低热效应。

3.2 热透镜效应分析

热透镜效应是激光增益介质热效应的主要表现形式之一,通常用热透镜焦距的数值来表征热透镜效应的影响程度。它是由介质内部温度梯度、端

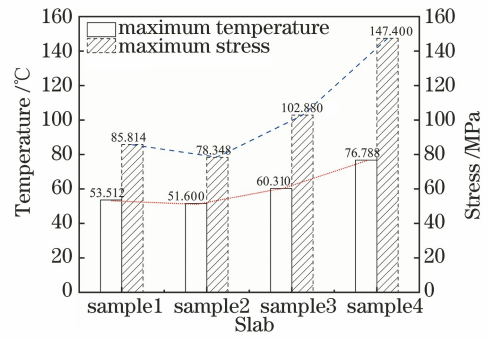


图 5 Er,Yb:glass 板条样品中的最高温度和最大应力
Fig. 5 Maximum temperature and stress of Er,Yb:glass slab samples

泵浦功率密度取决于泵浦功率和泵浦光斑半径,直接影响激光介质的热效应。不同泵浦功率下的热力学仿真结果如图 6 所示,随着泵浦功率的增加,相比于单端泵浦方式,双端泵浦时介质最高温度与最大应力的增长速度更慢。Krupke 等^[19]指出,磷酸盐玻璃的表面破碎应力极限大约为 87 MPa。因此,为了获得高增益,同时避免热损伤,Er,Yb:glass 板条放大器设计采用双端泵浦方式,当泵浦功率为 80 W 时,介质内部对应的最高温度为 51.6 °C,最大应力为 78.3 MPa。

面形变和应力双折射引起的光程差(OPD, O_{PD})变化而导致的。OPD 的推导公式为^[20]

$$O_{PD}(x,y) = \int_0^w \frac{\partial n}{\partial T} [T(x,y) - T_r] dz + n_0 \cdot \Delta u(x,y) + \sum_{i,j=1}^3 \int_0^w \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{ij}} \epsilon_{ij}(x,y) dz, \quad (8)$$

式中, $\partial n / \partial T$ 为热光转换系数, $T(x,y)$ 表示介质内点 (x,y) 位置处的温度, T_r 为参考温度。 $\Delta u(x,y)$ 表示介质内点 (x,y) 位置处的形变量, n_0 为折射率, $\epsilon_{ij}(x,y)$ 表示介质内点 (x,y) 位置处的应变。第 1 项为折射率随温度梯度的变化,第 2 项为纵向应变引起的端面变形,第 3 项为热致双折射。实际

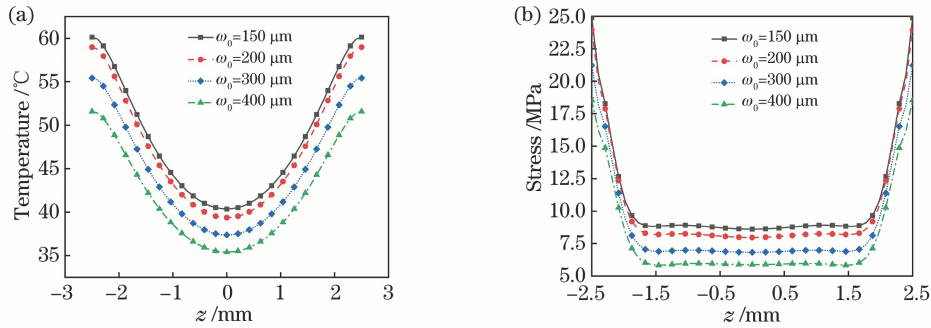


图 7 不同泵浦光斑束腰半径下沿 z 轴方向的热力分布结果。(a)温度分布;(b)应力分布

Fig. 7 Thermodynamic results along the z axis at different pump beam waist radius.

(a) Temperature distribution; (b) stress distribution

上,在 OPD 的计算中,由温度分布引起的折射率变化起着主导作用,公式后两项可以忽略,对光程差函数进行多项式拟合^[21]

$$O_{PD_{fit}} = B_0 + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + B_4x^4 + \dots + B_kx^k, \quad (9)$$

式中, B_2 是与热透镜焦距相关的二阶系数,四阶系数 B_4 表示球差效应的强度, B_k 为高阶像差。端面泵浦板条介质的等效热透镜焦距可由简化(10)式近似计算得到^[22]

$$f = -\frac{1}{2B_2}. \quad (10)$$

图 8 是单程光程差沿 y 轴方向的分布图,分别进行二阶拟合和四阶拟合。从图中可以看出,四阶拟合比二阶拟合效果更好。在低泵浦功率时,可以不考虑四次项系数,增益介质的热透镜效应近似等价于理想球面镜。但在高泵浦功率下,热透镜将不再是理想透镜,此时球差系数的影响不可忽视。

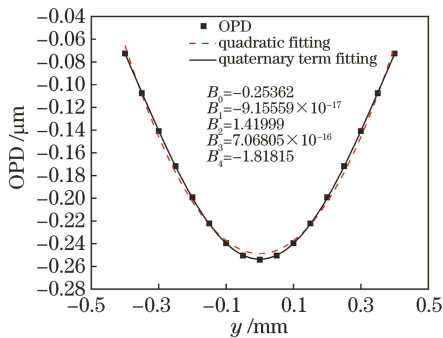


图 8 沿 y 轴方向的 OPD 分布拟合结果

Fig. 8 OPD distribution fitting results along the y axis direction

当 OPD 拟合的二阶项系数为 $B_2 = 1.41999$ 时,近似计算得到热焦距 $f = -352$ mm。这意味着可以使用正透镜或带曲率的反射镜来补偿波前畸变。因此,本研究根据热焦距设计多程放大器的热

透镜效应补偿装置,可将板条放大器中的平面反射镜 RM1 和 RM2 换成带曲率的反射镜。

4 结 论

基于 Er, Yb:glass 的热力学特性,本研究设计了高增益的 Er, Yb:glass 板条多程放大器,在保证模式匹配和输出稳定性的同时,能够实现高平均功率和大脉冲能量的激光输出。通过控制入射角的大小确定往返增益介质的次数,计算了多程放大系统增益,探究了不同板条宽厚比和泵浦条件对热效应的影响。结果表明,宽厚比相对较大的板条结构具有良好的散热性能,允许更高的泵浦功率。尽可能增大泵浦光斑半径以降低泵浦功率密度,从而减弱热效应。在分析热透镜焦距的基础上,提出采用可变曲率反射镜替代平面镜的方法来补偿放大器的热透镜效应和热光畸变效应。因此,对于热性能较差的 Er, Yb:glass 激光介质,该板条多程放大器是一种实现 $1.5 \mu\text{m}$ 波段较大能量激光输出的有效途径。

参 考 文 献

- [1] Kameyama S, Ando T, Asaka K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [2] Liu Z P, Hu L L, Dai S X, et al. Er³⁺, Yb³⁺ codoped phosphate glass laser pumped by LD [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(9): 1129-1131. 柳祝平, 胡丽丽, 戴世勋, 等. 激光二极管抽运的 Er³⁺、Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃激光器 [J]. 光学学报, 2002, 22(9): 1129-1131.
- [3] Takada Y, Hirokawa K, Kameyama S, et al. Small-sized Er, Yb:glass planar waveguide laser amplifier pumped by a laser diode bar [C] // Laser Congress

- 2018 (ASSL), November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts. Washington D. C.: OSA, 2018: ATh2A.23.
- [4] Song E M, Zhu G Z, Wang H L, et al. Design and experimental investigation of Yb : YAG thin-disc multipass laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214001.
宋恩茂, 朱广志, 王海林, 等. Yb:YAG 薄片多程激光放大器的设计及实验研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1214001.
- [5] Wang Z T, Chen S B. Experimental study of diode side-pumped Nd : YLF multi-pass amplification [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(5): 590-592.
王之桐, 陈三斌. 激光二极管侧抽运 Nd:YLF 多程放大实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(5): 590-592.
- [6] Sang S H, Zhang H L, Mao Y F, et al. Compact, high-average-power, nanosecond multi-pass Nd : YVO₄ Innoslab amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(2): 131-134.
- [7] Qu B, Liu Q, Wang S B, et al. High efficiency multipass 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.
- [8] Yanagisawa T, Asaka K, Hamazu K, et al. 11-mJ, 15-Hz single-frequency diode-pumped Q-switched Er, Yb: Phosphate glass laser [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(16): 1262-1264.
- [9] Sakimura T, Hirosawa K, Watanabe Y, et al. 1.55- μm high-peak, high-average-power laser amplifier using an Er, Yb: glass planar waveguide for wind sensing coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24175-24187.
- [10] Yu A W, Abshire J B, Storm M, et al. Laser amplifier development for IPDA lidar measurements of CO₂ from space [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9342: 93420M.
- [11] Sakimura T, Watanabe Y, Ando T, et al. 1.5- μm high-gain and high-power laser amplifier using a Er, Yb: Glass planar waveguide for coherent Doppler LIDAR [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, October 11, 2012, San Jose, California. Washington D.C.: OSA, 2012: CTu2D.7.
- [12] Heintze M C. Development and testing of an Er, Yb: glass coherent lidar for wind field mapping [D]. South Australia: The University of Adelaide, 2010: 27-78.
- [13] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 133-158.
- [14] Orth C D, Payne S A, Krupke W F. A diode pumped solid state laser driver for inertial fusion energy [J]. *Nuclear Fusion*, 1996, 36(1): 75-116.
- [15] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(19): 1831-1833.
- [16] Tilleman M M. Analysis of thermal effects in laser materials, 2: disk and slab geometry [J]. *Optical Materials*, 2011, 33(3): 363-374.
- [17] Chénais S, Druon F, Forget S, et al. On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium-doped materials [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2006, 30(4): 89-153.
- [18] Wang K X, Fu S Y, Zhang K X, et al. Thermal effects of the zig-zag Yb : YAG slab laser with composite crystals [J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(8): 1-10.
- [19] Krupke W F, Shinn M D, Marion J E, et al. Spectroscopic, optical, and thermomechanical properties of neodymium- and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(1): 102-114.
- [20] Huang T R, Huang W F, Wang J F, et al. Thermal-induced wavefront aberration in sapphire-cooled Nd: glass slab [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 1-9.
- [21] Hu M, Tang Y P, An R D, et al. Study on the influences of thermal lenses spherical aberration of beam quality [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(9): 1417-1420.
- [22] Bermudez G J C, Pinto-Robledo V J, Kir' Yanov A V, et al. The thermo-lensing effect in a grazing incidence, diode-side-pumped Nd : YVO₄ laser [J]. *Optics Communications*, 2002, 210(1/2): 75-82.