

气体冷却激光二极管抽运的固体激光放大模块 设计及热管理研究

徐鹏翔^{1,2} 李学春¹ 王江峰¹ 黄文发¹ 彭宇杰¹ 张玉奇¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)成为实现下一代激光器驱动装置对能量转换效率和重复频率要求的重要途径。高重复频率导致介质内存在热积累,引起热光效应、弹光效应和形变,导致波前畸变的产生,影响光束质量。针对目标输出能量 100 J,重复频率 10 Hz 的放大模块,分析其储能提取效率和增益性能,采用气体冷却技术,设计激光二极管抽运的片状放大模块结构。利用有限元数值分析方法,建立了该装置单片放大器热分析模型,研究了单片增益介质厚度、对流换热系数对波前畸变的影响,结合波前畸变的要求,得到了单片厚度的最优值,并对该设计进行热分析,利用超高斯光束近似抽运光源,结合氦气流分布情况,模拟单片介质的温度、形变和应力分布,计算得到了热光效应、形变和弹光效应对波前畸变的贡献以及单片增益介质的总波前。

关键词 激光技术; 有限元分析; 二极管抽运; 气冷技术; 片状放大器; 波前畸变

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1002001

Gas-Cooled Laser Diode-Pumped Solid-State Laser Amplification Module Design and Thermal Management

Xu Pengxiang^{1,2} Li Xuechun¹ Wang Jiangfeng¹ Huang Wenfa¹

Peng Yujie¹ Zhang Yuqi¹

(*Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Laser diode pumped solid-state lasers (DPSSL) has become an important way to realize the next generation of laser-driven device for energy conversion efficiency and repetition rate requirements. High repetition frequency leads to heat accumulation on the memory medium, which will cause thermo-optical effect, elasto-optical effect and bulk displacement, then results in the generation of wavefront distortion and affects the beam quality. Aimed at 100 J output energy and 10 Hz repetition frequency amplifier module, the extraction efficiency and gain performance storage are analyzed, and the sheet laser diode pumped amplifier module structure is designed using gas cooling technology. Thermal analysis models of single slice amplifier are established using the finite element analysis. The influence of signal slice thickness and convective heat transfer coefficient to the wavefront distortion are researched, in consideration of the limitation of the total wavefront distortion, we obtain the optimal value of single slice thickness. Using super-Gaussian beam on behalf of pump source and considering the distribution of helium gas flow, we analysis the thermal designed data and simulate the temperature, bulk displacement and stress distribution to get the related wavefront distortions.

Key words laser technique; finite element analysis; diode pumping; gas-cooled; slice amplifier; wavefront distortion

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.2010; 140.4480

收稿日期: 2014-04-08; **收到修改稿日期**: 2014-05-26

作者简介: 徐鹏翔(1988—),男,硕士研究生,主要从事重复频率固体放大激光器热管理技术方面的研究。

E-mail: xupengxiang1234@126.com

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术和光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

传统氙灯抽运钕玻璃放大器能量转换效率低,无法实现高的重复频率,满足不了下一代激光驱动器的要求。目前正在研究中的新一代超强激光设施项目,例如在惯性约束聚变(ICF)背景下的高功率激光能源研究装置(HiPER)系统中^[1],激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)成为满足下一代激光驱动器对能量转换效率(大于10%)和重复频率(10 Hz)要求的重要途径^[2]。

对于激光二极管抽运的固体激光器,由于高重复频率的要求,在激光增益介质内存在热沉积问题,产生温度梯度、热应力和表面形变,将引起热致波前畸变和热致双折射现象,甚至导致介质断裂,最终制约激光输出能量,导致激光系统的能量损耗和光束质量退化^[3-9]。为解决这些问题,必须对激光系统中的热效应进行抑制,优化热管理特性,保证系统安全良好运行。目前,大能量 DPSSL 装置的热管理技术在各 国 已 展 开 了 广 泛 研 究,如 美 国 的 Mercury 系统采用高速气冷技术,放大器采用激光二极管阵列对介质进行端面抽运,高速氦气通过介质端面进行冷却^[10-11]。法国的 LUCIA 系统采用主动镜结构,利用背向冷却技术,将抽运光与冷却流体分离,减少了冷却对抽运稳定性的影响^[12]。日本的 HALNA 系统采用 zig-zag 水冷结构^[13],该结构具有高的光束交叠效率和较长的增益距离,因此抽运的能量利用率较高^[14]。其中,高速气冷技术更适用于透射式大口径固体放大器,可通过改变钕玻璃的

片数和冷却气体的对流换热系数有效改善波前。但是,国内缺乏对于气体冷却的激光二极管抽运的固体激光放大模块的热管理技术的深入研究。

本文针对目标输出能量 100 J,重复频率 10 Hz 的气体冷却激光二极管抽运固体激光放大器进行了设计,分析了片状放大器的增益性能,设计了放大器的结构,进而针对该放大器开展了热管理技术研究,建立了基于钕玻璃的单片增益介质热分析模型,研究了相同目标输出下,单片增益介质厚度、对流换热系数对波前畸变的影响,得到单片增益介质厚度的最优值,并分析了在设计条件下,介质的温度梯度、形变、热应力分布,得到了热光效应、形变、弹光效应对波前畸变的贡献及单片增益介质的总波前。

2 原 理

2.1 放大器结构

基于高功率重复频率面阵激光二极管抽运下的氦气冷却钕玻璃片状放大模块开展热管理技术研究。包含 6 片片状放大介质的激光头如图 1(a)所示,两片叶片间厚度为 1 mm,高速氦气流通过叶片表面对增益介质进行冷却,放大器增益介质为钕玻璃,四周被铝板夹持,抽运光源为 801 nm 波长的激光二极管面阵,钕玻璃表面镀 801 nm 的增透膜。单片放大器的工作原理如图 1(b)所示,对于单片增益介质,该装置采用双向端面抽运,抽运光垂直于介质端面,两端面由高速氦气冷却制冷。

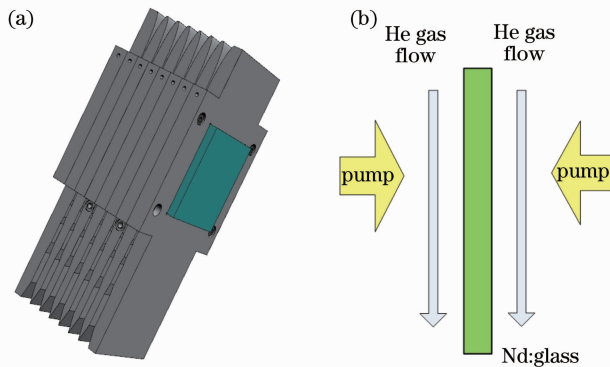


图 1 高功率重复频率固体放大模块结构示意图。(a) 含 6 片叶片的激光头;(b) 单片放大器工作原理图
Fig. 1 Schematic of high power repetition frequency solid amplifying module. (a) Laser head with 6 slices;
(b) operating principle of single slice amplifier

在片状增益介质中,抽运光源只照射到介质的一部分,热量只会抽运区域内产生热沉积,抽运区域外的介质只存在热耗散,对于研究目标,假设抽运

光在同一抽运截面服从高斯分布,增益介质上的内热源分布可表示为^[15]

$$\begin{cases} P_{th}(x, y, z) = \frac{P_0(x, y, z)\eta\alpha\chi\{\exp(-\alpha z) + \exp[-\alpha(Z-z)]\}}{A_{pump}[1 - \exp(-\alpha Z)]}, & A \leq A_{pump} \\ P_{th}(x, y, z) = 0, & A > A_{pump} \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_{pump} 为抽运面积, $P_0(x, y, z)$ 为抽运光源的功率分布, α 为抽运光的吸收系数, η 为抽运光耦合效率, χ 为抽运光的生热百分比, Z 为增益介质厚度。

2.2 储能与能量提取

在四能级系统中, 激光放大模块单位体积所存储的能量可表示为^[16]

$$E_{st} = g_0 E_s, \quad (2)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, E_s 为介质的饱和能量通量。信号光单程放大后输出能量通量为^[17]

$$E_1 = TE_{st} \ln\{1 + [\exp(E_{in}/E_{st}) - 1]G_0\}, \quad (3)$$

式中 T 为损耗因子, E_{in} 表示放大模块输入能量通量, G_0 为信号光单程增益。对此过程, 定义能量提取效率为信号光从放大模块提取的能量与激光能级存储的能量之比, 即

$$\eta_1 = \frac{E_1 - E_{in}}{g_0 l E_{st}}, \quad (4)$$

在小信号增益下, 信号光经过 k 程放大后, 输出光能量通量 E_k 为

$$E_k = TE_{st} \ln\left\{G_{k-1} \left[\exp\left(\frac{E_{k-1}}{E_{st}}\right) - 1\right] + 1\right\}, \quad (5)$$

式中 E_{k-1} 表示第 $k-1$ 程放大后的能量通量, G_{k-1} 为 k 程增益。在多程放大过程中的能量提取效率为

$$\eta = \frac{E_k - E_{in}}{g_0 l E_{st}}. \quad (6)$$

在四程放大的情况下, 当 $T=0.93$, $g_0 l=1.6$ 时, 信号光入射能量通量 $E_{in} \geq 0.03 \text{ J/cm}^2$ 时, 总提取效率 $\eta \geq 60\%$, 如图 2 所示。

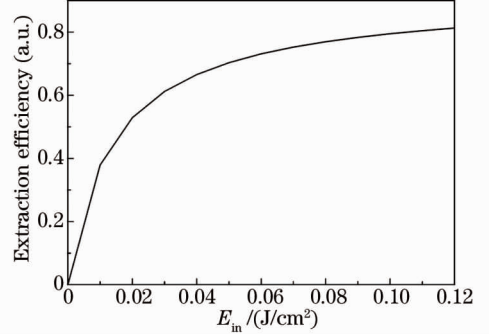


图 2 四程放大能量提取效率 η 与信号光能量通量 E_{in} 的关系曲线

Fig. 2 Extraction efficiency η as a function of E_{in} in four-pass amplifier

2.3 热效应分析理论分析

在热管理研究中, 首先建立增益介质的有限元模型, 得到放大模块的温度梯度分布, 由于温度梯度的存在, 导致介质内部产生热应力, 进而导致热致双折射效应, 同时介质的表面发生形变。这些因素导致介质折射率和光线传输方向上介质长度的变化, 进而引起光程的不均匀分布, 导致波前畸变的产生。上述物理模型的分析过程如图 3 所示。

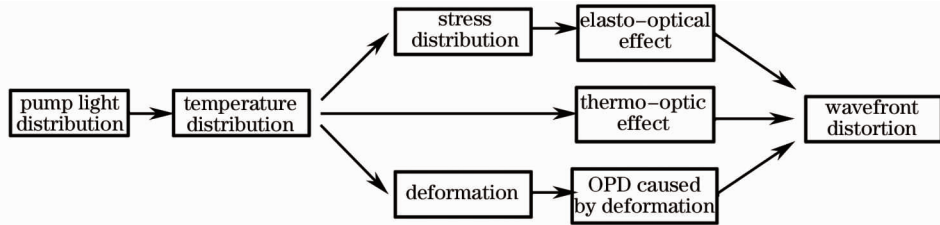


图 3 热管理研究流程图

Fig. 3 Thermal management flowchart

激光器工作过程中, 增益介质的热传输方程可由如下的标准三维热传输方程描述^[18]:

$$\begin{cases} \rho c(T) \partial T(x, y, z, t) / \partial t = k(T) (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + P_{th}(x, y, z) \\ T(x, y, z; 0) = T_0 \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = h_c (T - T_{gas}) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 ρ 为介质密度, $c(T)$ 为比热容, $T(x, y, z)$ 为介质的温度分布, $k(T)$ 为介质热导率, T_0 为介质初始温度, h_c 为制冷氦气与介质表面的对流换热系数, 该参

数与气体温度、压强和流速有关, T_{gas} 为氦气温度。

随着生热导致介质温度升高, 氦气与介质的温度差增大, 氦气的冷却效果增强, 热量沉积达到稳定

后,单位时间单位体积内介质的产热量与散热量相等,从而介质的热效应达到稳定状态。稳定状态下

的三维热传输方程可由(7)式简化为^[19]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \rho P_{th}(x, y, z) = 0, \quad (8)$$

由于抽运和冷却的作用,增益介质温度分布不均匀,产生热应力,根据胡克定律,应力应变关系可用下式描述^[20]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha T \delta_{ij} \right], \quad (9)$$

式中 ϵ_{ij} 为热应变, σ_{ij} 为热应力, E 为弹性模量, ν 为泊松比, δ_{ij} 为克鲁尼彻-迪尔踏符号, i 与 j 相同时为 1, 不同时为 0, α 为介质的热膨胀系数, T 为温度分布。

温度的梯度分布导致的热光效应和由热应力导致的弹光效应引起介质的折射率的变化,同时,不均匀的温度分布也导致介质发生形变进而影响光程。经过介质后信号光的光程差如下:

$$S_{OPD}(x, y) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y) dz + n_0 \Delta u(x, y) + \sum_{i,j=1}^3 \int_0^l \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x, y) dz, \quad (10)$$

式中 l 为信号光传播方向上介质的长度, n_0 为介质初始折射率, $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为温度折射率系数, $\Delta u(x, y)$ 为信号光传输方向上介质的形变量。(10)式右边第一项是热光效应引起的光程差,第二项是介质形变引起的光程差,第三项是弹光效应引起的光程差。在各项同性介质中,弹光效应导致的折射率改变为^[20]

$$n_i = n_0 + \sum_{j=1}^j C_{ij} \sigma_j, \quad (11)$$

式中 C_{ij} 为介质的应力光学常数,对于确定的材料该值为常量。

3 放大模块设计及模拟分析

3.1 放大模块设计

基于以上理论,设计研究气体冷却激光二极管抽运的片状固体放大装置,装置的设计目标如表 1 所示。设计该装置块为双激光头四程放大系统,压损要求小于 0.078 MPa 由控制氦气循环的鼓风机决定,波前畸变由变形镜的补偿能力决定,该装置信号光波长 1053 nm,目标输出能量 100 J,重复频率 10 Hz,入射信号光能量 0.5 J,脉冲宽度 3 ns。对于钕玻璃, $E_{st} = 4.3 \text{ J/cm}^2$,为使输出能量 100 J,装置的总效率大于 10%,需要总提取效率 $\eta \geq 60\%$,可以确定 $g_0 l = 1.6$, $E_{in} \geq 0.03 \text{ J/cm}^2$,则对于入射光能量为 0.5 J 的信号光,光束截面积应小于 16.6 cm^2 ,因此可设定抽运面积为 16.8 cm^2 ,即光斑尺寸为 $4.1 \text{ cm} \times 4.1 \text{ cm}$,考虑边界效应和放大自发辐射 (ASE) 后,设定钕玻璃截面尺寸为 $5.5 \text{ cm} \times$

5.5 cm ,输出光斑尺寸为 $4.07 \text{ cm} \times 4.07 \text{ cm}$ 。在保证单程增益的前提下,提高掺杂浓度可以达到高的吸收效率,减少片的总厚度,但同时会导致 ASE,因此可设定单程片状放大器总厚度为 16 cm。

表 1 放大模块设计目标

Table 1 Design goals of amplifier module

Element	Goal
Energy	100 J
Repetition rate	1~10 Hz
Wavelength	1053 nm (1 ω)
Pulse length	3 ns
Total efficiency	>10%
Beam size	4.07 cm×4.07 cm
Wavefront distortion	<12 λ
Lifetime	>10 ⁷ shot
Pressure loss	<0.078 MPa

在放大介质中,结合(1)式,可得

$$E_{st} = \eta_c \eta_a \eta_s \eta_u P_0, \quad (12)$$

式中 η_c 为抽运光耦合效率, η_a 为抽运吸收效率, η_u 为钕玻璃的量子效率, η_s 为上能级荧光损耗效率, η_u 为斯托克斯效率。放大器总的能量提取效率为

$$\eta = \frac{E_{out} - E_{in}}{\eta_c \eta_a \eta_s \eta_u P_0}. \quad (13)$$

因此可得输入能量为 0.5 J 的四程激光放大器的输出能量与抽运能量关系曲线如图 4 所示,由图可知,输出能量为 100 J 时,抽运能量为 305 J,装置的光-光转换效率为 32.8%,抽运耦合效率 $\eta_c = 0.80$,抽运吸收效率 $\eta_a = 0.92$,量子效率 $\eta_u = 0.92$,上能级荧光损耗效率 $\eta_s = 0.87$,斯托克斯效率 $\eta_u = 0.76$,可以得到放大器储能为 136.6 J,提取能量为 99.5 J,提取效率为 $\eta = 72.8\%$,且随着抽运能量的

增大,提取效率增高。

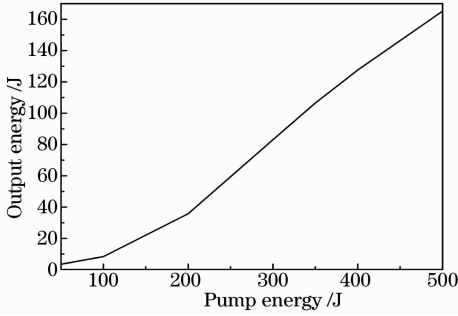


图4 片状放大器输出能量与抽运能量关系曲线

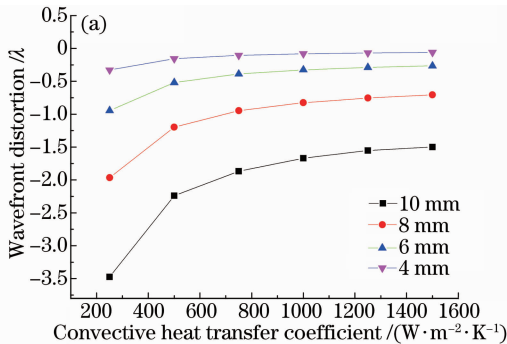
Fig. 4 Output energy as a function of pump energy for slice amplifier

因此为达到输出 100 J, 10 Hz 的目标, 总的抽运输出能量为 305 J, 脉冲宽度 $\tau=250 \mu\text{s}$, 重复频率 $f=10 \text{ Hz}$, 抽运光耦合效率 $\eta=80\%$, 抽运光的吸收系数 $\alpha=0.99 \text{ W/cm}^3$, 抽运光的生热百分比 $\chi=24\%$, 因此可计算得抽运区域产热量为 2 W/cm^3 , 冷却气体温度与介质初始温度为 $T_0=T_{\text{gas}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, 钕玻璃的其他相关参数由表 2 给出。

表 2 钕玻璃参数

Table 2 Parameters of Nd:Glass

Parameter	Value
Density $/(\text{Kg/m}^3)$	2760
Specific heat capacity (300 K) $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	760
Heat conductivity (300 K) $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	7.66
Elastic modulus $/(1000 \text{ N/mm}^2)$	58
Poisson's ratio	0.232
Thermal expansion coeff. (300 K) $/(10^{-7} \text{ K}^{-1})$	82
Refractive index n_0	1.5445



3.2 单片增益介质厚度、对流换热系数对波前畸变的影响

由图 3 可知,介质的热沉积引起了折射率变化和表面形变,热光效应、形变、弹光效应三个分量都对波前畸变产生贡献,为了使波前畸变在 $12 \mu\text{m}$ 范围内,需要着重分析各因素对增益介质热效应的影响。可以通过改变冷却气体的压强和流速来改变对流换热系数,通过改变增益介质的厚度来改变介质的散热能力,进而影响介质热沉积,最终改变波前畸变,因此着重分析单片增益介质厚度和对流换热系数对波前畸变的影响。

由 3.1 节的设计参数,利用 20 阶超高斯光束模拟抽运光源,可得图 5(a)所示不同厚度的单片放大模块波前畸变量随对流换热系数变化的曲线,图 5(b)为单程增益介质总厚度相同的前提下,不同单片厚度的放大模块单程放大总波前畸变量随 h_c 变化的曲线图。由图可知,对于单片增益介质,厚度相同的情况下,随着 h_c 的增大,气体对介质的冷却效果增强,波前畸变减小;相同 h_c 下,介质的厚度越薄,介质的散热能力越强,波前畸变越小。单程放大总波前畸变的变化规律与单片增益介质相同,说明在单程增益介质总厚度相同的情况下,虽然随着片厚度的变薄,片的数量增加,但是每片的波前畸变减小更多,因此总畸变减小。需要指出的是, h_c 在 $250 \sim 750 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之间,波前畸变迅速减小, h_c 达到 $750 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之后,变化趋于平缓,增大 h_c 对波前畸变的改善越来越不明显,而当片厚较小时,总畸变趋近于零。

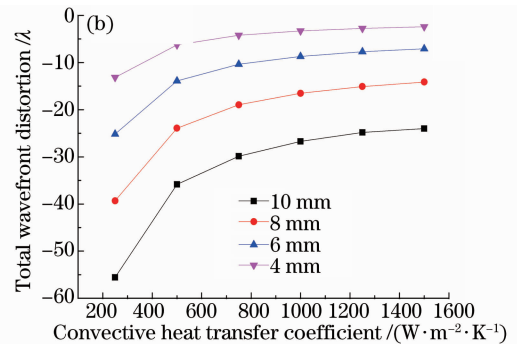


图 5 总片厚相同时,不同单片厚度的放大模块波前畸变随对流换热系数的变化曲线。

(a) 单片放大器畸变; (b) 单程放大总畸变

Fig. 5 Wavefront distortion as a function of convective heat transfer coefficient under the same total thickness of the film but different single slice thicknesses. (a) Single slice wavefront distortion; (b) one-pass wavefront distortion

3.3 气流分布

图 6 为氦气冷却通道示意图,如图所示,氦气经过前部喷嘴区后,通过冷却区域对钕玻璃进行冷却,

最后经扩散区离开放大模块。为使氦气气流在冷却区内保持稳定均匀,喷嘴区设计为一定弧度,使氦气气流逐渐加速,冷却区内保持通道宽度固定,扩散区

通道宽度设计成一系列梯度的渐变,使得离开放大模块后的气体流速与喷嘴区入射时速度相近,便于循环利用。

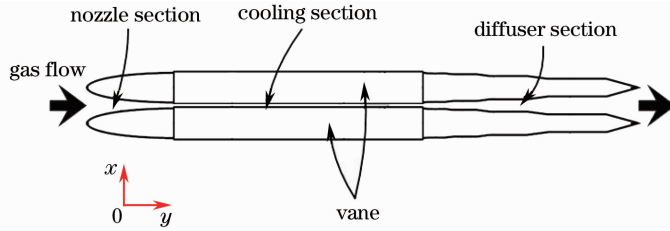


图 6 气流冷却通道

Fig. 6 Airflow cooling channel

图 7 给出了放大模块通道内氦气的速度、相对压强和温度的分布情况。由图 7(a)结合图 6 可以看到,氦气经过放大模块前部的喷嘴区后,速度迅速增大,在冷却区域内保持匀速状态,经过扩散区后,速度逐渐减小,最后速度为 15 m/s。压力损失是设计激光头时考虑的一个重要因素,从图 7(b)可以看

到,气流经过通道区后压力损失为 0.013 MPa,能够满足系统对压损的要求。另外,如图 7(c)所示,经过通道区后,由于增益介质的散热作用,氦气温度由初始的 20 °C,上升为加热后的 23 °C,温度上升 3 °C,因此会影响氦气的冷却效果,导致在氦气冷却方向上增益介质温度分布的不均匀。

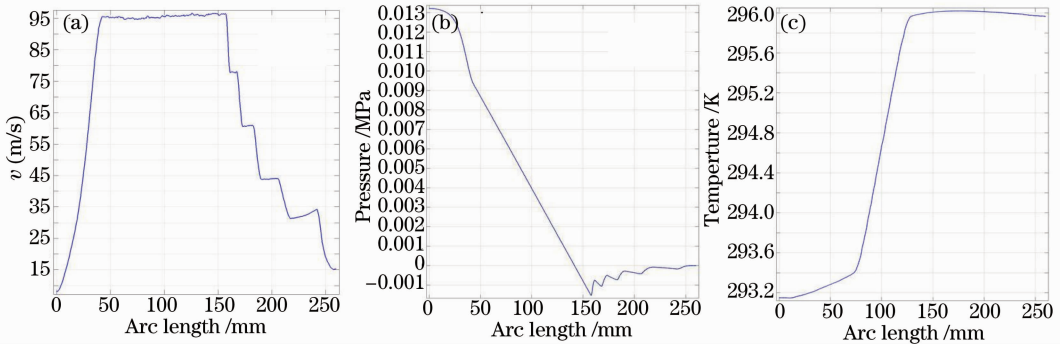


图 7 通道内氦气分布情况。(a) 速度; (b) 相对压强; (c) 温度

Fig. 7 Distribution of helium in the passage. (a) Speed; (b) relative pressure; (c) temperature

3.4 热效应分析

由 3.2 节分析可知,可设计单片厚 5 mm,由 32 片放大器组成的放大模块在 $h_c = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,单程放大总波前畸变为 -10.04λ ,满足对波前畸变的要求,可通过变形镜对波前补偿,且片的纵横比能保证片机械稳定、加工工艺,因此选取该结构作为该放大模块的设计方案。近似设定抽运区域内能量密度均匀分布为 20 阶超高斯分布,设定束腰半径为 20 mm,前后端面氦气冷却,其他 4 个侧面与铝传热,传热系数为 $h = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。增益介质固定在铝片的槽内,因此可以近似设定介质的 4 个侧面被铝片约束,没有膨胀形变。根据 3.3 节氦气温度分布,设定冷却方向沿 y 轴正方向,且氦气存在 3 °C 温升。

在以上条件下,运用有限元分析软件 Ansys 建立单片增益介质模型,将坐标系设定为直角坐标系, z 方向为增益介质厚度方向, x、y 方向分别为两互相垂直的增益介质棱边方向,整个介质在第一象限

内。介质工作状态稳定后,介质的温度、形变、热应力分布如图 8 所示。

图 8(a)显示,介质温度分布沿冷却方向存在一定温升,这与冷却气体冷却过程中温度升高有关,介质中心存在一个较大面积的均匀温度区,抽运区边缘处存在较大温度梯度,抽运区边缘最低温度为 25.39 °C,表面最高温度为 31.96 °C,介质内部的最大温度为 42.00 °C,抽运区域内介质最大温差约为 16.61 °C。图 8(b)为介质 z 方向形变云图,该云图与温度分布云图图样相似,中心存在较大面积均匀形变区域,边缘形变梯度较大,介质最大形变量为 0.511 μm ,抽运区域内最小形变量为 0.342 μm ,抽运区域内的相对形变量约为 169 nm。图 8(c)、(d)、(e)分别为 x、y、z 方向的应力分布云图,可以看出,在抽运光边缘处,由于温度梯度的存在和 4 个侧面形变被约束的双重作用,应力主要存在于增益介质的边缘位置,其中最大应力为 9.87 MPa,小于钎

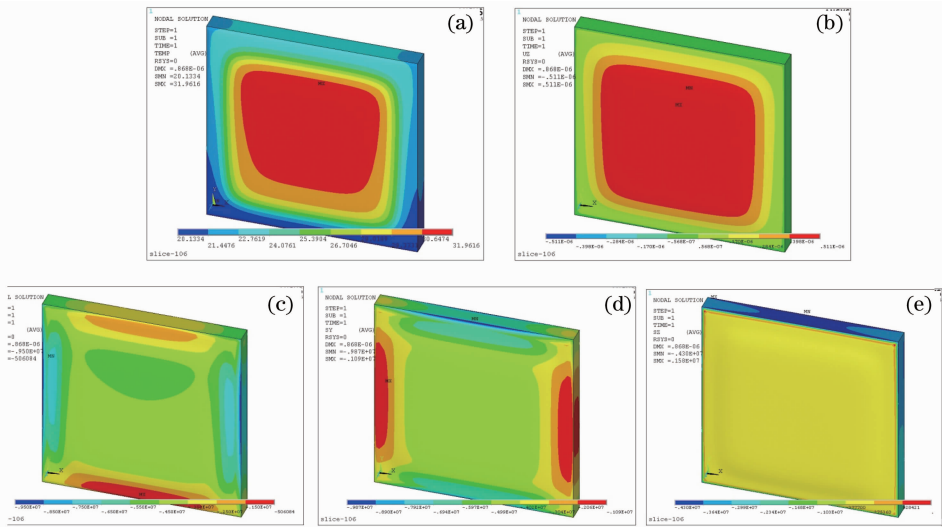


图 8 单片增益介质有限元分析云图。(a) 温度分布云图；(b) z 方向形变分布云图；(c) x 方向应力分布云图；(d) y 方向应力分布云图；(e) z 方向应力分布云图

Fig. 8 Finite element analysis results of single slice. (a) Temperature contour; (b) contour of bulk displacement along z axis; (c) contour of stress along x axis; (d) contour of stress along y axis; (e) contour of stress along z axis

玻璃最大断裂应力。

将单片的温度、形变、应力数据代入(10)式得到的单片放大器波前畸变和热光效应、形变、弹光效应三个分量对畸变的贡献如图 9 所示,总波前畸变为 -0.3138λ ,热光效应的贡献量为 0.0483λ ,形变的贡献量为 -0.3115λ ,弹光效应的贡献量为 -0.0498λ ,各个分量波前畸变的中间区域平坦,边

缘处均存在剧烈变化。并且,由于冷却效果沿气流方向减弱,各分量引起的波前畸变在气流冷却方向均存在一定梯度。通过分析可知,形变引起的波前畸变贡献最大,热光效应引起的畸变量与弹光效应引起畸变量大致相等。对照图 8 和图 9,可发现热光效应引起波前畸变图样与温度分布图样一致,形变引起的波前畸变图样与形变云图一致,符合(10)

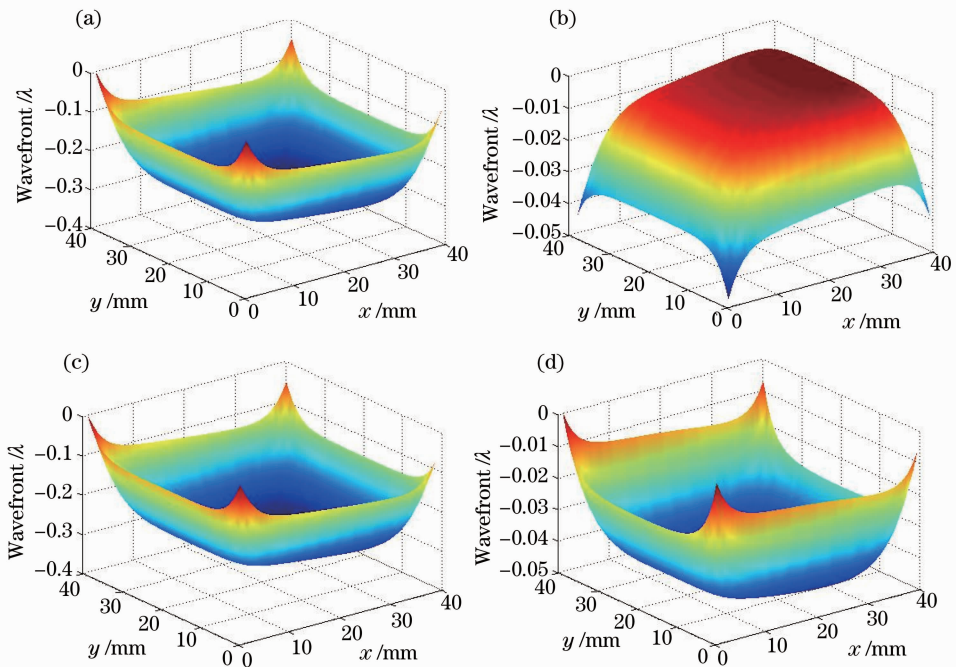


图 9 单片波前畸变。(a) 总波前畸变；(b) 热光效应引起的畸变；(c) 形变引起的畸变；(d) 弹光效应引起的畸变

Fig. 9 Wavefront distortion of single slice. (a) Total wavefront distortion; (b) thermo-optical effect induced wavefront distortion; (c) bulk displacement induced wavefront distortion; (d) elasto-optical effect induced wavefront distortion

式对波前畸变的描述。

4 结 论

基于下一代激光驱动装置的要求,通过分析放大器的能量提取效率、增益能力,设计了输出能量 100 J,重复频率 10 Hz 的气体冷却激光二极管抽运的片状固体激光器。为将单程放大的波前畸变控制在一定范围内,设计 32 片片状放大器,单片厚度 5 mm。结合氦气分布情况,对该装置建立热分析模型,通过计算得到单片增益介质的温度、形变、应力分布,进一步求得波前畸变,并分析了热光效应、形变、弹光效应的波前贡献量,得出了波前畸变与单片厚度、对流换热系数的关系。在增益介质总厚度不变的前提下,通过增大对流换热系数和减小单片增益介质厚度均可使单程放大波前畸变减小。

参 考 文 献

- Mason P D, Ertel K, Banerjee S, *et al.*. Optimised design for a 1 kJ diode-pumped solid-state laser system[C]. SPIE, 2011, 8080: 80801X.
- Mason P, Ertel K, Banerjee S, *et al.*. An efficient high pulse energy and high average power cryogenic gas cooled multi-slab Yb:YAG amplifier[C]. CLEO: Science and Innovations, Optical Society of America, 2012: CM3D. 1.
- Wang Yanhai, Pan Xue, Li Xuechun, *et al.*. The influence of wave-front-distorted pump pulse on the beam quality of OPA front-end system of the petawatt laser[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3088—3093.
王艳海, 潘雪, 李学春, 等. 抽运光波前畸变对拍瓦激光器前端 OPA 光束质量的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3088—3093.
- Zhang Xiang, Su Likun, Cai Qing. Analysis of thermal effect and experimental test of beam wavefront aberration in all solid-state Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 802—807.
张翔, 苏礼坤, 蔡青. 全固态 Nd:YAG 激光器热效应及输出光束波前像差分析[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 802—807.
- Zheng Chaosi, Hu Qiquan. Thermal effect of LD CW end pumped anisotropic solid state lasers[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(8): 679—684.
郑朝思, 胡企铨. 半导体激光泵浦各向异性介质的热效应[J]. 中国激光, 1997, 24(8): 679—684.
- Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying, *et al.*. Analyses of transient temperature and thermal stress distribution in ring laser diode array pumped laser rod[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 803—807.
欧群飞, 陈建国, 冯国英, 等. 环形激光二极管抽运棒状激光器中瞬态温度和热应力分析[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 803—807.
- Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Wang Chengcheng, *et al.*. Investigation of thermal recovery of wavefront distortion of the

- single-segment amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(11): 961—965.
於海武, 郑万国, 王成程, 等. 单口径片状放大器光波束前畸变热恢复研究[J]. 中国激光, 2001, 28(11): 961—965.
- Shan Xiaotong, Yan Xiongwei, Zhang Xiongjun, *et al.*. Analysis of thermal characteristics in laser diode pump solid-state laser with variable doping amplifying medium[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0102009.
单小童, 严雄伟, 张雄军, 等. 基于非均匀掺杂的激光二极管抽运固体激光系统放大介质热特性分析[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0102009.
- Wenfa Huang, Jiangfeng Wang, Xinghua Lu, *et al.*. A highly stable laser diode pumped cryogenic Yb:YAG nanosecond regenerative amplifier[J]. Laser Phys, 2013, 23(3): 035804.
- 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.
- Gronberg J. Status of the MERCURY Laser[R]. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2004.
- Chanteloup J C, Yu H, Bourdet G, *et al.*. Overview of the LUCIA laser program: toward 100-Joules, nanosecond-pulse, kW averaged power based on ytterbium diode-pumped solid state laser[C]. SPIE, 2005, 5707: 105—116.
- Matsui H, Eguchi T, Kanabe T, *et al.*. Conceptual design of a laser-diode-pumped Nd:glass slab laser driver for inertial fusion energy[J]. Fusion Engineering and Design, 1997, 44(1): 401—405.
- Wang Mingzhe, Ding Lei, Lou Yiming, *et al.*. Recent progress of laser diode-pumped solid-state laser drivers for inertial fusion energy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(10): 56—63.
王明哲, 丁磊, 罗亦鸣, 等. 惯性聚变能领域的激光二极管抽运固体激光装置[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(10): 56—63.
- Cao Dingxiang, Zheng Wanguo, He Shaobo, *et al.*. Finite element analysis on thermal effect of heat capacity laser disk[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1417—1422.
曹丁象, 郑万国, 贺少勃, 等. 片状热容激光器热效应有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1417—1422.
- W Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- Lü Baida, Zhangbin. Theory of the high-power laser propagation through amplifiers[J]. Laser Technology, 1997, 21(5): 288—292.
吕百达, 张彬. 高功率激光放大器中的光传输理论[J]. 激光技术, 1997, 21(5): 288—292.
- S B Sutton, G F Albrecht. Optical distortion in end-pumped solid-state rod lasers[J]. Appl Optics, 1993, 32(27): 5256—5269.
- Zhang Yunzhen, Cao Fuxin. Finite Element Methods of Elastic Mechanics[M]. Beijing: China Railroad Press, 1983.
张允真, 曹富新. 弹性力学及其有限元法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- M Huang. Stress effects on the performance of optical waveguides[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(7): 1615—1632.

栏目编辑: 韩峰