

doi:10.3788/gzxb20154412.1214002

# 分离式放大器结构参量对热效应的影响分析

张德平, 吴超, 石会财, 张蓉竹, 孙年春

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘 要:**对激光二极管端面抽运矩形分离式放大器引起的热效应进行研究, 建立符合实际的 Cr, Yb:YAG/Yb:YAG 复合结构热传导模型. 对分离式放大器结构中不同增益介质与包层结构下放大器内部温度场变化进行了分析, 定量计算了对应材料内部温度分布, 并给出了出射端面波前相位分布随温度变化的情况. 研究表明: 在较薄的包层厚度和较小的厚度比下, 介质端面温升更高, 热效应加重; 相对较厚的包层和较大的厚度比可使放大器的热效应明显减弱. 该结果为降低复合结构激光放大器热效应提供了理论指导.

**关键词:**激光光束放大; 激光束热处理; 激光束激光应用; 激光束计算机模拟; 激光束效应; 分离式放大器; 温度分布

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1214002-6

## Analysis on Effect of Separated Amplifier Structure Parameter on Thermal Effect

ZHANG De-ping, WU Chao, SHI Hui-cai, ZHANG Rong-zhu, SUN Nian-chun

(School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The thermal effect of the laser diode end-pumped rectangular separated amplifier was studied. Thermal conduction model of Cr, Yb:YAG/Yb:YAG composite structure accord with reality was established. In the separated amplified structure, the internal temperature field variation of amplifier under different gain media and cladding structure was analyzed. The temperature distribution inside the material was calculated quantitatively, and the phase distribution of the wave front with the change of temperature was given. The research shows that in the thinner cladding thickness and smaller thickness ratio, medium face has a higher temperature rise, and aggravated thermal effect; the thermal effect of the amplifier is weakened by relative more thick cladding and larger thickness ratio. The research results can provide theoretical guidance to depress the thermal effect of composite structure amplifier.

**Key words:** Laser beam amplification; Laser beam heat treatment; Laser beam laser application; Laser beam computer simulation; Laser beam effects; Separated amplifier; Temperature distribution

**OCIS Codes:** 140.3280; 140.3430; 140.3380; 140.3290

## 0 引言

分离式复合结构激光放大器可以提高放大效率, 并对多束激光束进行放大, 具有提高输出激光光束的功率及能更高效地利用增益材料的储能等优点, 越来越被科研人员关注. 在激光放大过程中, 不可避免地存在自发辐射放大 (Amplified Spontaneous Emission,

ASE) 问题, 文献[1]指出可以通过在放大介质周围加上包层处理来吸收 ASE 能量, 但包层厚度的大小会直接影响对 ASE 的抑制效果<sup>[1-2]</sup>. 由于包层材料与增益晶体具有不同的热学性能, 因此在使用外加包层来解决放大器中 ASE 问题的同时, 必须考虑到包层厚度的变化对放大器热效应产生的影响. 由于这种对热效应的影响会使激光器输出特性发生变化, 输出光束质量

基金项目: 国家高技术发展计划 (No. 2014AA8402038) 资助

第一作者: 张德平 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光技术. Email: dpzhang@yeah.net

导师 (通讯作者): 孙年春 (1961-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子. Email: 8178137@163.com

收稿日期: 2015-06-09; 录用日期: 2015-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

下降,因此有必要对由包层厚度的变化而引起的分离式复合结构激光放大器热效应的变化进行研究.

为了尽可能地抑制热效应带来的不利影响,文献[3-4]对传统结构单块放大介质展开了讨论与分析.分别从理论和实验上对 Yb:YAG, Nd:GdVO<sub>4</sub> 及 Nd:YVO<sub>4</sub> 等材料进行了研究,得出了放大介质温度变化与端面形变等导致激光束畸变的结论<sup>[5-9]</sup>.与传统结构相比,分离式放大器结构需要考虑到包边材料的影响,因此其热效应分析模型相对而言要复杂一些.本文通过对分离式复合结构激光晶体工作特点分析,建立了符合实际工作情况的热分析模型.采用有限元分析方法对 Cr, Yb:YAG/Yb:YAG 分离式复合结构在不同包层厚度下和不同厚度比(Thickness Ratio, TR)下介质内部 3 维温度分布特性进行了模拟计算,在得到温度场分布的基础上,研究了由于温度梯度的存在,对介质折射率变化和出射光束波前相位分布的影响,并分析了包层厚度和厚度比 TR 对分离式放大器热效应的影响.

## 1 分离式放大热模型及理论计算

### 1.1 放大模型

分离式放大介质的热模型如图 1. 放大器整体由四块完全相同的放大介质在包层材料的组合下组成,边长为  $C$ . 选择放大介质厚度为 50 mm 的正方形 Yb:YAG 晶体,边长为  $A$ . 放大介质外部边缘被 Cr, Yb:YAG 陶瓷材料包裹后单元放大器边长为  $B$ .

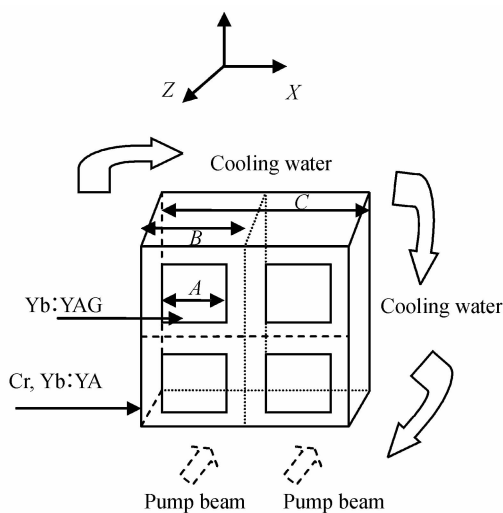


图 1 分离式放大器

Fig. 1 The separated amplifier

激光二极管(Laser Diode, LD)阵列发出的泵浦光均匀照射到晶体表面,在晶体中传播的分布可以表示为

$$I = I_0 \exp(-\beta z) \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为入射光的中心光功率密度,  $\beta$  是 Yb:YAG 晶体的吸收系数. 泵浦光入射到晶体端面后在晶体中

传播过程中,损失的那一部分光强即为晶体所吸收的光能. 假设晶体所吸收的总泵浦光能量中转化成热能的比例为  $\eta_h$  (设为  $\eta_h = 20\%$ ), 在达到稳定状态时,放大介质内部的热源可以表示为<sup>[10]</sup>

$$Q = \eta_h \frac{dI}{dz} = \eta_h I_0 \beta \exp(-\beta z) \quad (2)$$

通过循环水冷却的方式保持激光介质的侧面恒温,晶体吸收的泵浦光能量所产生的热对称地从陶瓷材料的上下表面和两个侧面通过热传导的方式散去.

### 1.2 折射率变化分析

随着晶体温度的变化,材料的折射率也会改变,其变化量可以分解成与温度、应力有关的变量,因此有<sup>[11]</sup>

$$n(T, \epsilon) = n_0 + \Delta n_T + \Delta n_\epsilon \quad (3)$$

式中,  $n_0$  为晶体初始时的折射率,  $\Delta n_T$  和  $\Delta n_\epsilon$  分别是与温度、应力有关的折射率变化量. 与温度有关的变化量可以表达为

$$\Delta n_T = [T - T(0)](dn/dt) \quad (4)$$

式中,  $T$  代表达到稳定状态后晶体的温度,  $T(0)$  表示晶体的初始温度,  $dn/dt$  表示 Yb:YAG 晶体的温度折射率系数, 值为  $7 \times 10^{-6}/K$ . 综合式(1)~(4), 利用已经求得温度分布可以得到在不同泵浦时长下晶体折射率的变化.

### 1.3 出射端面波前相位分布

在晶体内部形成稳定的温度场后,激光晶体受热发生膨胀使晶体端面产生热形变. 晶体内部一微元  $dz$  从温度  $T_1(x, y, z)$  增加到  $T_2(x, y, z)$  后,热膨胀量为

$$dl = \alpha [T_2(x, y, z) - T_1(x, y, z)] dz \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为晶体的热膨胀系数,于是可以得到在  $z$  方向上的总的热膨胀量为<sup>[12-14]</sup>

$$l = \int_0^d dl = \int_0^d \alpha [T_2(x, y, z) - T_1(x, y, z)] dz \quad (6)$$

式中,  $d$  为放大介质通光方向的厚度,从该式可以看出,温度变化必然导致光程差的变化.

同时考虑晶体受热后端面发生膨胀和折射率变化的共同作用. 晶体出射端面光束的相位分布可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\varphi = \int_0^{d+l} n(T, \epsilon) dz \quad (7)$$

式中,  $n(T, \epsilon)$  为晶体受温度和应力影响下的折射率. 联合式(1)~(7)计算出晶体在两种不同包层厚度和泵浦时长下出射端面的波前相位分布.

### 1.4 包层厚度对热效应的影响

分离式放大模型中,介质之间的热传导遵循傅里叶定律,即

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8)$$

式中,  $q$  为热流密度,比例常量  $k$  是一个输运特性,称为

导热系数,  $\partial T/\partial x$  为传热方向上的温度梯度, 负号表示热量流向温度降低的方向. 当泵浦光照射到 Yb: YAG 晶体端面时, 由于对泵浦光的吸收, 导致晶体温度升高, 包层材料由于未受到泵浦光直接照射因而温度相对较低, 放大介质和包层材料之间将会存在温度差, 分离式放大器中各晶体块之间将会通过包层进行热传导和散热, 热量传导过程中会有一些热量被包层所吸收, 导致包层温度升高. 分离式放大器内部热传导过程中, 包层厚度的大小将会直接影响到晶体块间热量传导的多少, 进而会对分离式放大器的热效应产生影响.

## 2 模拟计算

在本文的模拟计算中, 忽略由于温度变化对晶体物理特性(如热导率、吸收系数等)的影响以达到简化计算的目的, 在还未达到激光增益介质的断裂极限的情况下, 对分离式放大器的热效应进行了模拟计算和分析. 对于掺杂浓度为 10. atm% 的 Yb: YAG 晶体而言, 在模拟计算中激光介质和泵浦光的对应参量如表 1.

表 1 激光介质和泵浦光的对应参量

Table 1 Corresponding parameters of laser medium and pumping light

Type	Value
Absorb coefficient of Yb: YAG	$10.8\text{cm}^{-1}$
Heat conductivity of Yb: YAG	$6.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Coefficient of thermal expansion of Yb: YAG	$7\times 10^{-6}/\text{K}$
Specific heat of Yb: YAG	$590\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Density of Yb: YAG	$4560\text{kg}/\text{m}^3$
Coefficient of heat convection	$5\,000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
Pumping power density	$1\times 10^7\text{W}/\text{cm}^2$

### 2.1 不同包层厚度下的计算结果

#### 2.1.1 温度分布

使用 ANSYS 软件中的 SOLID70 3-D 热单元模型, 建立分析模型, 模拟计算介质的温度场分布. 当入射光功率密度为  $1\times 10^7\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  时, 在热放大模型中, 将放大介质尺寸保持为  $80\text{mm}\times 80\text{mm}\times 50\text{mm}$  的 Yb: YAG 晶体, 分别计算两种不同包层厚度 2.5 mm 和 10 mm, 在泵浦时长为 1s 时介质的温度分布, 如图 2.

从图 2 可以看出, 晶体对泵浦光的吸收导致晶体的端面温度上升. 晶体端面处泵浦区域的温度最高, 靠近边缘处温度逐渐降低. 不同包层厚度下晶体端面的最高温升有较大差异, 包层厚度为 10 mm 时, 晶体端面最高温升为  $612^\circ\text{C}$ ; 但是当包层厚度为 2.5 mm 时, 晶体端面的最高温升却可以达到  $653^\circ\text{C}$ ; 这是由于包层厚度的较厚时, 在相同的时间内各晶体块之间传递的热量会有更大一部分损耗在包层中, 被包层吸收, 而包层厚度较小时, 被包层吸收的热量较少, 因此晶体端

面会呈现出更高的温升; 且随着时间的增长, 这种差异会越来越明显.

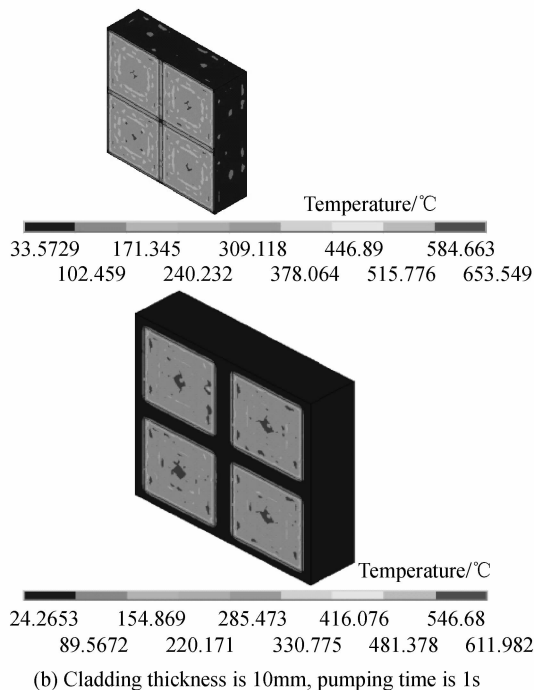


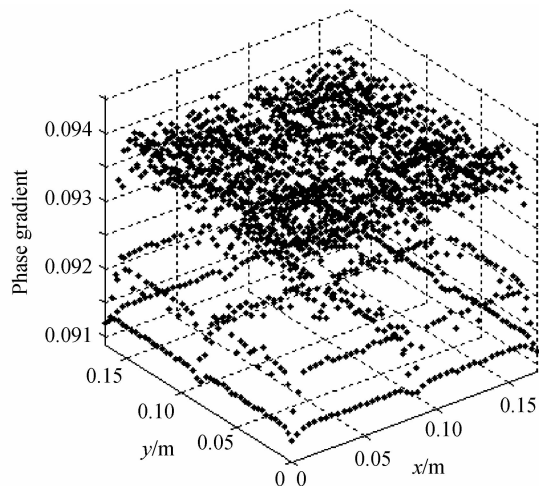
图 2 不同包层厚度下介质的温度分布

Fig. 2 Medium temperature distribution under different cladding thickness

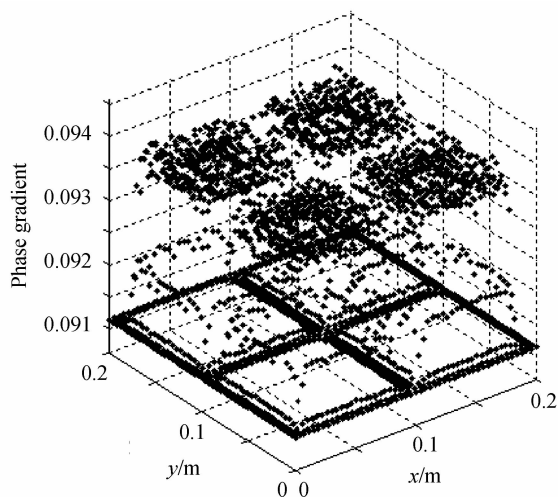
#### 2.1.2 出射端面波前相位分布

在计算出晶体温度分布的基础之上, 结合前述的理论计算得到放大介质出射端面光束波前相位分布如图 3.

从图 3 可以看出, 出射端面波前相位分布由于受折射率和温度变化的影响呈现出一定程度上的不均匀分布. 在相同泵浦时长下, 随着包层厚度的减小, Yb: YAG 晶体出射端面的波前相位分布情况较为相似, 无明显差异; 但是放大介质与包层材料相接触边缘部分的波前相位分布却随着包层厚度的减小逐渐呈现出越



(a) Cladding thickness is 2.5mm, pumping time is 1s



(b) Cladding thickness if 10 mm, pumping time is 1s

图 3 不同包层厚度下的出射端面波前相位分布  
Fig. 3 Output end face wave front phase distribution under different cladding thickness

来越严重的畸变,即放大介质靠近中心处与边缘处波前相位分布由于包层厚度的减小而出现严重不一致,对激光器性能产生较大影响,导致激光器输出光束质量急剧下降。

图 4 为泵浦时长为 1 s 和 0.5 s 时介质出射端面通光口径内相位均方根值(Root Mean Square, RMS)随包层厚度之间的变化关系。从图 4 可以看出,随着包层厚度的减小,介质出射端面 RMS 值呈现非线性增长。在相同泵浦时长下,包层厚度越小, RMS 值越大,即介质出射端面光束的波前相位畸变越大。热效应对输出光束的影响随着包层厚度的减小也越来越大。另外,在泵浦时长较短时, RMS 呈现出较为平缓的增长趋势,包层厚度变化对 RMS 的影响没有泵浦时间较长时那样明显。图 5 表示在包层厚度为 10 mm 时, RMS 随时间变化的关系。从图 5 可以看出,随着泵浦时间的增长,介质出射端面 RMS 值也呈现增长的趋势。

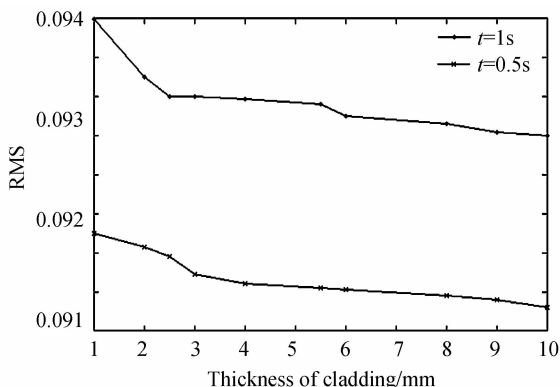


图 4 不同泵浦时长下出射端面 RMS 值与包层厚度之间的关系

Fig. 4 Relationship between RMS of output end face and cladding thickness under different pumping time

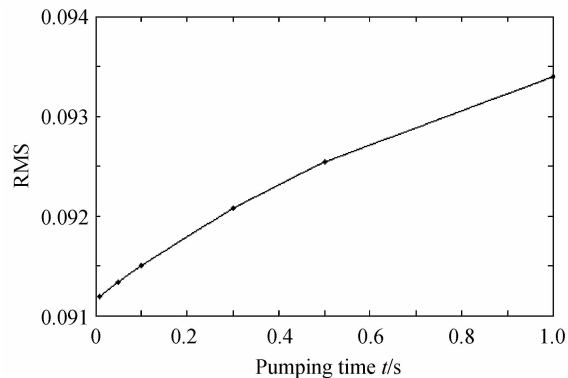


图 5 包层厚度为 10 mm 时,出射端面 RMS 值与泵浦时长之间的关系

Fig. 5 Relationship between RMS of output end face and pumping time while cladding thickness is 10 mm

## 2.2 不同厚度比 TR 下的计算结果

保持单块复合晶体尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 定义包层厚度与放大介质厚度(与通光方向相垂直方向上的厚度)的厚度比为 TR. 采用与相同计算方法得到 TR 分别为 5/90、15/70 下介质的温度分布和出射端面波前相位分布情况, 见图 6 和图 7。

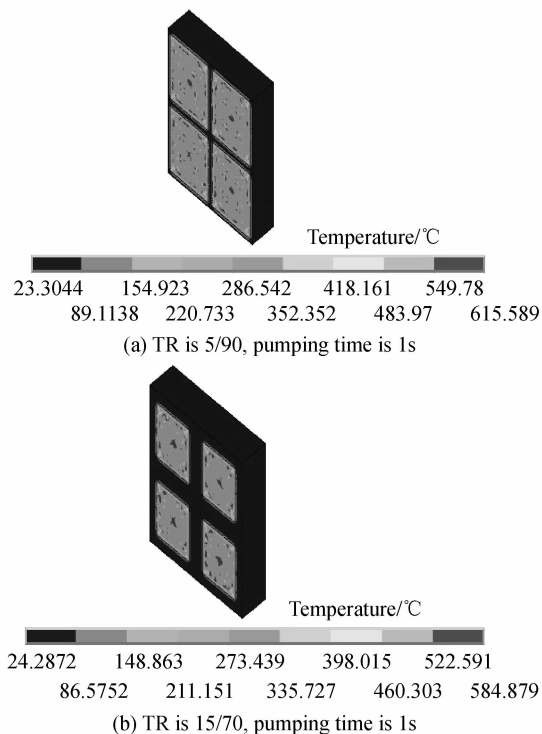
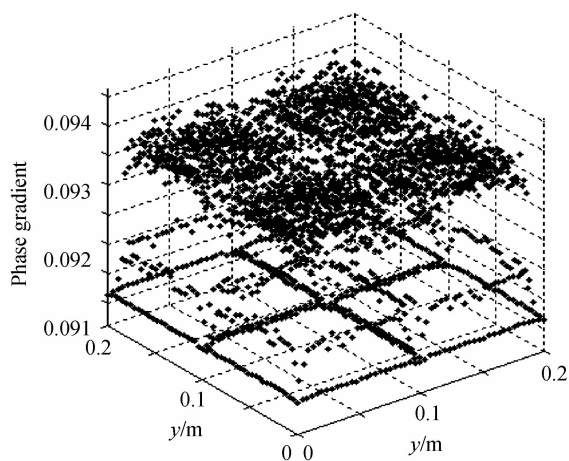


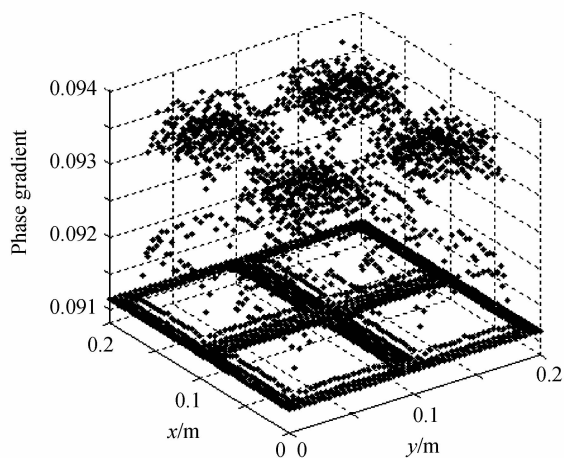
图 6 不同厚度比下的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution under different TR

从图 6 和图 7 可以看出,在泵浦时长为 1 s, TR 为 5/90 时,晶体端面最高温度为  $615\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; TR 为 15/70 时,端面最高温度为  $584\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随着厚度比的增大,介质端面的最高温升有所降低。温度的不均匀分布导致折射率呈现出非均匀变化,出射端面的波前相位分布也因此出现不同程度的畸变。随着厚度比的减小,晶体端面靠近中心处的相位分布与晶体与包层相接触边缘部分的



(a) TR is 5/90, pumping time is 1 s



(b) TR is 15/70, pumping time is 1 s

图7 不同厚度比下的波前相位分布

Fig. 7 Output end face wave front phase distribution under different TR

波前相位分布同样会出现与前述厚度变化时相类似的情况.当增大厚度比时,晶体的最高温升会下降,有利于减弱激光器的热效应,从而获得更好的输出光束质量.

图8为泵浦时长为0.5 s和1 s时出射端面通光口径内相位均方根值(RMS)随TR变化的关系.从图

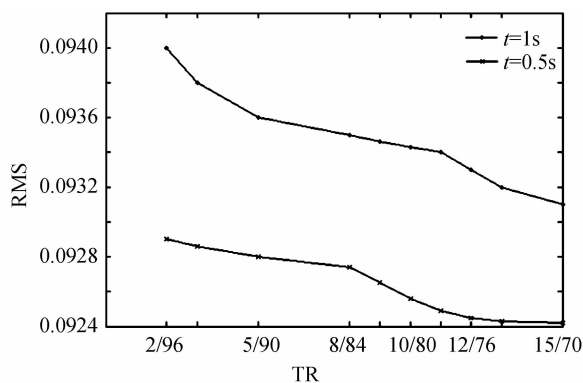


图8 不同泵浦时长下出射端面RMS值与厚度比之间的关系

Fig. 8 Relationship between RMS of output end face and TR under different pumping time

8可以看出,在泵浦时长为0.5 s时,随着TR的减小,RMS的增长趋势较为平缓;当增大泵浦时间为1 s时,随着TR的减小,出射端面RMS值则呈现出急剧增大的趋势,因此,泵浦时间越长,RMS随TR的变化更加明显,增长趋势也越明显.

研究发现,随着泵浦参量的变化,材料温度相应改变,进而影响输出光束质量.水冷和气冷两种热管理方案虽然可以得到较高热管理效率,但是在封装、气动影响等方面还存在问题.

### 3 结论

本文建立了LD端面泵浦Cr, Yb: YAG/Yb: YAG分离式放大复合结构热模型.用有限元法计算了激光介质在不同包层厚度下的温度分布,给出了计算介质折射率变化的方法.在温度和折射率的基础之上计算了晶体出射端面光束的相位分布,得到不同厚度比下介质温度和出射端面波前相位分布情况.分别给出了出射端面通光口径内相位均方根值(RMS)随包层厚度和厚度比的变化关系.结果表明:包层厚度的变化会对分离式放大器的热效应产生影响,在不同包层厚度下,复合结构温度分布及出射端面波前相位分布均存在较大差异,随着包层厚度的减小,分离式放大器的热效应变得严重;同时TR的变化同样会对分离式放大器的热效应有着明显的影响,较大的TR更加有利于减弱分离式放大器的热效应.为了能有效地控制复合放大器的热效应,使激光器的输出达到最高,可以适当增加包层的厚度以及复合结构的厚度比.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Hua, FAN Dian-yuan. Study on the spontaneous emission of Nd: glass plate laser amplifier[J]. *Journal of Physics*, 2000, **49**(06): 1047-1051.  
张华,范滇元.钕玻璃片状激光放大器自发辐射放大特性的研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(06): 1047-1051.
- [2] WANG Xiao-jun, SU Hua, CAI Zhen. Amplified spontaneous emission in disk laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(8): 1998-2004.  
王小军,苏华,蔡震.圆片激光器中放大的自发辐射现象[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(8): 1998-2004.
- [3] SHI Peng, CHEN Wen. Thermal effect of LD end-pumped circular cross section YAG-Nd: YAG composite crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(z3): 213-217.  
史彭,陈文. LD端面抽运圆形截面YAG-Nd: YAG复合晶体热效应[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(z3): 213-217.
- [4] HUANG Feng, WANG Yue-feng, NIU Yan-xiong. Study on thermal effect of LD end pumped high repetition rate Nd: YAG laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 355-358.  
黄峰,汪岳峰,牛燕熊. LD端面泵浦的高重频Nd: YAG激光器的热效应研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 355-358.
- [5] LU Fu-yuan, GONG Ma-li, XUE Hai-zhong, et al. Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007(45): 43-48.

- [6] YANG Huo-mu, FENG Guo-ying, ZHOU Shou-huan. Thermal effects in high-power Nd:YAG disk type solid state laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011(43): 1006-1015.
- [7] DONG Jun, DENG Pei-zhen, XU Jun. Study of the effects of Cr ions on Yb in Cr, Yb : YAG crystal [J]. *Optics Communication*, 2003(170): 255-258.
- [8] LI Chen, LIU Qiang, GONG Ma-li, *et al.* Modeling of end-pumped CW Yb : YAG lasers exhibiting non-uniform temperature distribution[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2004(36): 745-758.
- [9] MONCORGE R, EREMEYKIN O, DOUALAN J, *et al.* Original of thermal refractive index changes observed in Yb<sup>3+</sup> doped YAG and KGW [J]. *Optics Communications*, 2008 (281): 2526-2530.
- [10] CHEN Xin-yu, YU Yong-ji, WANG Chao, *et al.* Study on the uniformity of temperature field distribution in LD side-pumped laser[J]. *Optik*, 2013, **124**: 2067-2071.
- [11] 克希耐尔(Koehn W). 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] SHI Peng, CHANG Rui, CHEN Wen, *et al.* The influence of third kinds of boundary conditions on the thermal effect of laser crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2539-2542.
- 史彭, 常锐, 陈文等. 第三类边界条件对激光晶体热效应的影响[J]. 光子学报, 2009, **38**(10): 2539-2542.
- [13] YANG Ji-min, LIU Dan-hua, LIU Jie. Study on laser thermal effect of ytterbium doped yttrium silicate crystal[J]. *Quantum Electronic Journal*, 2013, **30**(3): 293-297.
- 杨济民, 刘丹华, 刘杰. 掺镱硅酸钇晶体的激光热效应研究[J]. 量子电子学报, 2013, **30**(3): 293-297.
- [14] LI Long, ZHANG Wei, TIAN Lai-ke, *et al.* Thermal deformation of a rectangular doped laser crystal by high power diode laser end-pumped[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 500-503.
- 李隆, 张伟, 田来科, 等. 高功率半导体激光端面泵浦方形掺Nd<sup>3+</sup>离子激光晶体热形变研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 500-503.
- [15] PEI Zheng-ping, TANG Chun, TU Bo, *et al.* Thermal wave front distortion of Nd:YAG slice laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1615-1618.
- 裴正平, 唐淳, 涂波, 等. Nd:YAG薄片激光器热致波前畸变[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(10): 1615-1618.