

文章编号:1004-4213(2010)09-1537-6

LD 抽运钕玻璃薄片放大器热管理结构*

侯立群¹, 樊仲维¹, 邱基斯^{1,2,3}, 赵天卓², 张晶¹, 张晓雷¹, 唐熊忻¹

(1 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

(2 中国科学院光电研究院, 北京 100190)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:基于传热学基本理论,借助有限元分析方法,对 LD 端面抽运钕玻璃薄片激光放大器激光介质的瞬态热效应进行数值模拟.通过对不同边界条件下钕玻璃薄片内部温度场及应力场的分析,研究了 LD 端面抽运钕玻璃薄片的热效应特性,并对比了不同热管理方案下钕玻璃薄片的温度分布.结果表明:采用白宝石窗口结合外围热沉 TEC 制冷的冷却方案最佳.此种冷却方案下钕玻璃薄片内最高温度在非抽运面中心处,约 120 °C.虽然比直接对抽运面水冷方式的冷却效果稍差,但是可以避免抽运面直接水冷所引起的一些问题.相关研究结果也表明,由于钕玻璃热阻较大,即使加强径向散热,抽运区的热量仍然难以从径向疏散,对热管理方案进行优化时应该考虑从尺寸较小的轴向进行散热.

关键词:激光二极管抽运;薄片激光放大器;钕玻璃;热效应;热管理

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103909.1537

0 引言

在固体激光系统中,激光增益介质的热效应问题是影响系统输出性能的一个重要因素,热场在空间的非均匀分布不仅导致激光束发生畸变,严重时还会引起激光介质的破坏.因此,人们围绕如何消除热效应、如何改善热场分布等热管理问题展开了诸多工作^[1-6].其中,采用高转换效率的激光二极管作为抽运源,较闪光灯抽运而言较大幅度地避免了无用热被激光介质吸收;而采用薄片状激光介质来替代棒状激光介质则非常有效地改善了激光介质的轴向温度梯度^[7-9].基于以上考虑,采用激光二极管(Laser Diode, LD)抽运的钕玻璃薄片作为激光放大介质的技术方案在期望获得高能量增益、高光束质量的高功率激光装置中取得了应用.然而,在实际应用中,虽然钕玻璃具有良好的储能性能,但为了保证系统有足够增益能力,钕玻璃的轴向尺寸即通光方向并不能选择太薄.但由于钕玻璃介质导热性能较差,热导率仅有常用晶体的十分之一,在重复频率工作下(脉冲抽运光作用下),钕玻璃薄片内部的热量在短时间内较难被疏散.在这种情况下,如何确定有

效的热管理方案对于整个系统的稳定运行尤为重要.

从已公开发表的文献看,鲜有研究 LD 抽运钕玻璃薄片介质热效应的文章.如何解决重复频率抽运下低热导率钕玻璃介质的热管理问题是该技术在工程实际中取得应用的前提.因此,本文基于传热学基本理论,结合有限元分析,对高功率激光装置中 LD 抽运薄片钕玻璃激光放大介质的热效应进行研究,并通过对不同热管理方案冷却效果的对比和分析,结合钕玻璃薄片激光介质的冷却特性,选择较佳冷却方案,对系统的总体设计提供了有益的参考.

1 实验原理及方案设计

本文所研究的钕玻璃薄片放大器采用多程离轴放大结构,在满足整个系统增益需求的同时,还能够保证光束质量,同时抽运光利用率较高,降低了对泵浦系统总能量的需求.图 1 为本文实验的原理示意

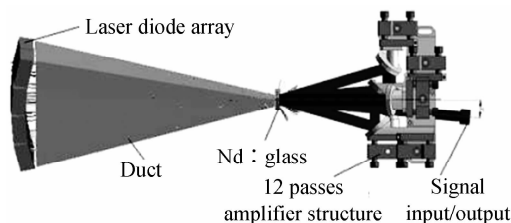


图 1 钕玻璃薄片放大器抽运示意图
Fig. 1 Schematic diagram of pumping in Nd doped glass disk amplifier

* 国家高技术研究发展计划(2009AA034701)和海淀园博士后专项基金(2008-07)资助

Tel: 010-62981937

Email: hlq310@163.com

收稿日期: 2010-02-02

修回日期: 2010-03-09

图. 其中左侧为激光二极管阵列 (Laser Diode Array, LDA), 输出 1 Hz、脉宽 350 μ s、中心波长 802 nm 的抽运光, 经过导光管 (Duct) 耦合后, 其强度可以近似看作为是均匀的, 导光管出口对应钕玻璃片中心, 而钕玻璃片的右侧为多程离轴提取结构. 种子光从最右端进入整个系统, 多次经过钕玻璃片后得到放大, 并按原路返回.

在抽运光的作用下, 钕玻璃介质所吸收的抽运光能仅有一部分转化为激光输出能量, 其余大部分能量被其吸收后转化为废热, 由此引起的非均匀热效应会导致激光放大性能降低、光束质量变差. 由于钕玻璃断裂极限较低, 当介质内温度差过大时甚至有可能使其炸裂. 因此, 必须采取合适的冷却手段疏散其内部的热量, 方可保证激光放大器的稳定运行.

结合本文所采用激光放大器的结构, 设计三种不同的热管理方案. 图 2 为端面冷却方式原理示意图. 其中方案一采用从抽运方向的端面进行水冷, 其它面不进行主动冷却. 方案二采用从抽运方向相对的端面进行水冷. 方案三采用传导冷却, 热量由抽运面贴合的白宝石窗口疏散, 并结合外围紫铜热沉冷却 (原理示意图见图 3).

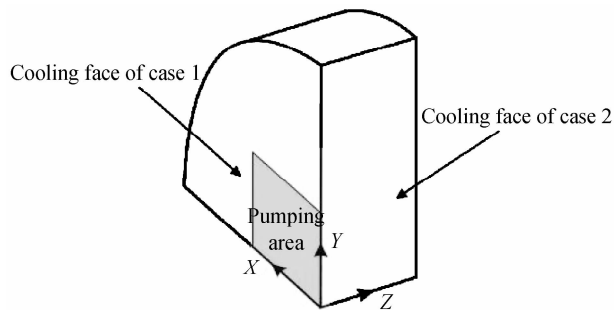


图 2 端面冷却原理示意图 (方案一和方案二)

Fig. 2 Schematic diagram of cooling from end face (Case 1 and Case 2)

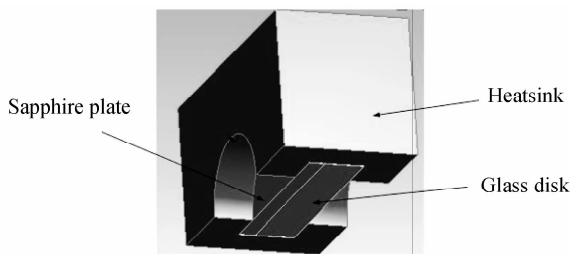


图 3 传导冷却原理示意图 (方案三)

Fig. 3 Schematic diagram of convective cooling (Case 3)

2 模拟结果及讨论

将抽运光在钕玻璃薄片内产生的废热等效为虚拟内热源, 并以体载荷加载, 利用有限元分析方法对不同热管理方案下钕玻璃薄片及其热管理结构的热致效应进行数值模拟. 计算时选取参量为: 抽运光功

率为 25 kW, 有效通光口径为 10 mm \times 10 mm, 钕玻璃薄片直径为 $\varphi=25$ mm, 厚度 $B=5$ mm, 钕玻璃的各项材料参量如表 1.

表 1 钕玻璃主要材料参量

Table 1 Main parameters of Nd doped glass

Material parameters	Nd doped glass(N31)
Heat capacity/(J/kg \cdot K)	750
Thermal conductivity/(W/m \cdot K)	0.56
Density/(kg \cdot m $^{-3}$)	2830
Thermal diffusivity/(m 2 /s)	0.26×10^{-6}
Thermal expansion coefficient/($10^{-6} \cdot$ K $^{-1}$)	10.7
Young modulus/Pa	51.6×10^9
Poisson ratio	0.23
Light absorption coefficient/cm $^{-1}$	3.8

白宝石的各项材料参量为: $\rho=3\ 980$ kg/m 3 , $\kappa=24$ W/mK, $c_p=761.5$ J/kg \cdot K, $\nu=0.27$, $\alpha=7.8 \times 10^{-6}$ /K, $E=379 \times 10^9$ Pa. 冷却水的温度取 15 $^{\circ}$ C, 强迫对流换热系数 h 取 3000~9 000 W/m 2 \cdot K, 环境温度为 15 $^{\circ}$ C, 介质与空气之间的自然对流换热系数取 50 W/m 2 K.

在模拟计算时, 选取钕玻璃薄片的圆心位置为坐标系原点. 鉴于方案一和方案二几何结构及边界条件的对称性, 选取钕玻璃薄片的 1/4 作为模拟对象以降低计算量; 方案三选取整个结构建模.

2.1 钕玻璃薄片瞬态温度及应力分布特性

以方案一为例考察钕玻璃薄片的瞬态温度及应力分布特性. 图 4 给出了 $h=3\ 000$ W/m 2 \cdot K、抽运时间 $t_p=10$ s 时薄片内的瞬态温度分布, 图中温度的单位为 K. 模拟结果表明, 此时薄片内的温度分布在轴向及径向均呈不均匀分布, 薄片心部温度最高, 最高温度达 311 K, 被冷却面上未被抽运到的区域温度较低.

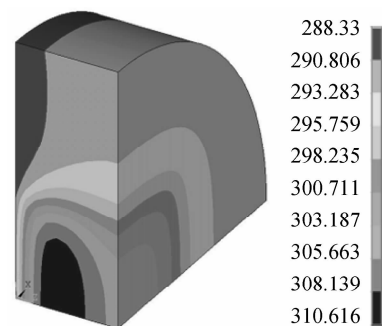


图 4 钕玻璃薄片的瞬态温度分布

Fig. 4 Transient thermal distribution within glass disk

随着抽运时间增加, 更多的废热会沉积于薄片内部. 由于钕玻璃导热性能较差, 沉积的废热在短时间内难以被疏散, 因此其温度会随时间逐渐升高. 沿抽运方向依次选取薄片轴线上不同位置的三个节点

(Node1: $z=0$; Node 2: $z=B/2$; Node 3: $z=B$), 考察它们的温度随时间变化的趋势, 结果如图 5.

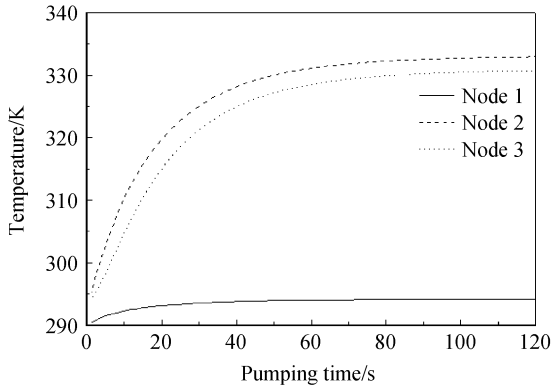


图 5 薄片内的节点温度随抽运时间变化的曲线
Fig. 5 Relationship between pumping time and node temperature of glass disk

由图 5 可知, 节点 1 距离冷却面最近, 因此温度仅在抽运初期有小幅上升, 之后变化较小. 由于节点 2 和节点 3 位于薄片内部, 因此温度会随着抽运时间增加而升高. 从温度随时间的变化曲线可以看出, 约 120 s 之后, 各节点的温度随时间变化的曲线已趋于平缓, 说明在此阶段之后薄片内的温度场已达到稳态, 即由冷却介质疏散走的热量等于薄片内部产生的热量. 图 6 为薄片内的稳态温度场, 和未达到稳态的温度场相比, 薄片内的最高温度点已由薄片的心部外延至未抽运面上, 约为 334 K, 薄片内最大温差约为 46 K.

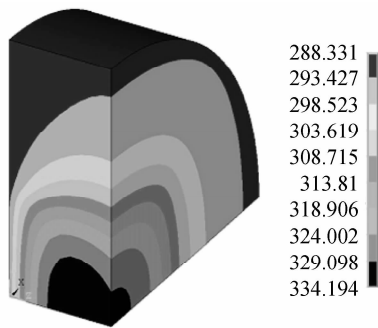


图 6 薄片内的稳态温度分布 ($h=3\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
Fig. 6 Steady thermal distribution within glass disk ($h=3\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

激光介质内的温差直接导致激光介质内部产生了热应力, 随着抽运时间的延长, 薄片不同部位处的温度差逐渐增加, 由此而产生的热应力也随时间而增大. 数值模拟结果表明, 当薄片内的温度场达到稳态分布时, 其对应的等效应力分布如图 7. 最大等效应力发生在薄片轴向的中心部位, 约为 12.9 MPa. 由应力分布云图可知, 在薄片轴向 (即抽运方向) 上存在较大的应力梯度, 在径向上抽运光斑范围内的热应力梯度并不大. 由于因应力变化而造成的折射

率变化较小, 因此可以认为热应力变化对径向折射率的变化影响不大.

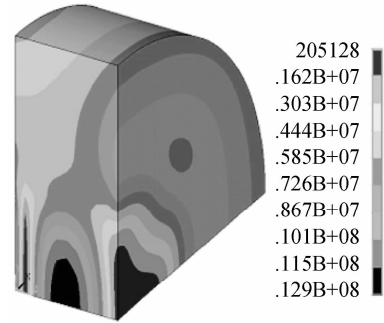
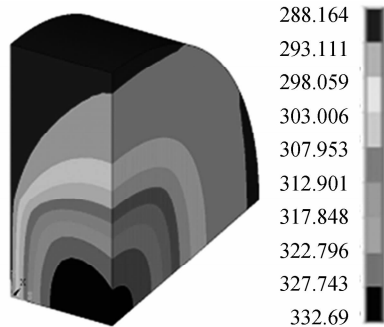


图 7 薄片内的稳态应力分布 ($h=3\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
Fig. 7 Steady stress distributions within glass disk ($h=3\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

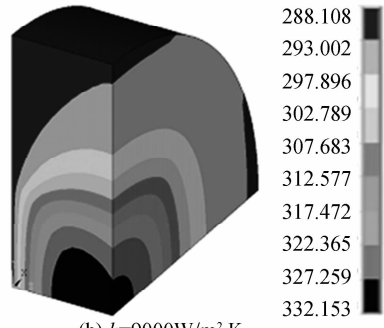
2.2 冷却参量对钕玻璃薄片热致效应的影响

为了考察冷却参量对钕玻璃薄片热致效应的影响, 改变冷却面所加载的对流换热系数 (在其它条件不变时可通过调节冷却水的流量实现), 对钕玻璃薄片的热效应进行数值模拟. 其它边界条件不变, 分别取 $h=3\ 000, 6\ 000, 9\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 三组结果进行对比.

图 8 给出了当换热系数为 $6\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 和 $9\ 000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 情况下薄片内的温度达到稳态后的温度分布. 对比图 6 所示结果可知, 提高换热面的对流换热系数对薄片内的温度分布影响较小, 其分布规律如前文所述, 差别仅在于最高温度略有降低.



(a) $h=6000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$



(b) $h=9000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

图 8 薄片内稳态温度分布
Fig. 8 Steady thermal distribution within glass disk

由传热学原理可知,对于强迫对流换热,冷却液从被冷却壁上带走的热量和对流换热系数及壁面和冷却液之间的温差成正比.因此,提高对流换热系数能够在一定程度上改善冷却效率.分析在本文中对流换热系数的提高并未显著改善热分布的原因,主要是由于钹玻璃介质的热导率较低,和晶体薄片激光器相比,钹玻璃薄片较厚,因此内部热阻也较大,这使得介质内部的热量难以在短时间内疏散到散热面上.所以,在设计冷却系统时应该考虑到这个因素,根据散热量来合理设计冷却液的流量,避免过高冗余设计.

2.3 不同热管理方案热效应对比

由于抽运光能量在薄片抽运面所沉积能量最高,在其内部呈指数衰减,抽运光在内部所产生的废热也随之降低,若未施加主动冷却,则抽运面温度最高,因此从理论角度考虑,抽运面施加主动水冷的方案一冷却效果最佳.而对方案二钹玻璃薄片热致效应的模拟结果表明(图9),两个方案中节点达到热平衡态的时间基本一致,但方案二薄片的最高温度点发生在抽运面中心,约444 K,比方案一约高70 K,内部温差高达150 K.由此导致的热应力约36.6 MPa,比方案一的最大热应力值高约30%.这表明,由于薄片热阻较高,从抽运相对面冷却而疏散走的热量极为有限.减小薄片厚度必然能够改善冷却效果,但厚度降低后无法保证既定的增益能力.

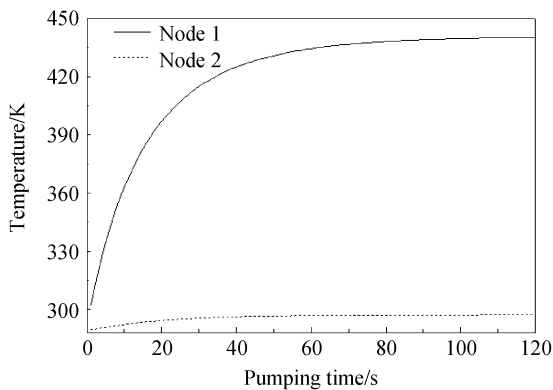


图9 方案二的温度-时间曲线[node 1(0,0,0), node 2(0,0,0.005)]

Fig. 9 Relationship between pumping time and node temperature of Case 2 [node 1(0,0,0), node 2(0,0,0.005)]

由前文对比结果可知,由于钹玻璃的低导热率,考虑从非抽运面散热的方式并不理想,因此设计热管理方案须基于抽运面散热.但在实验过程中,发现方案一的冷却效果在很大程度上受水层厚度的影响.一方面,水层厚度受限于结构设计不能太大;另一方面,水层厚度较小时会使水流不畅,冷却效果不

佳.此外,水流对注入种子光束传输的稳定性也会产生较大影响.因此,热管理方案三拟采用热导率较好同时也具有良好光学匹配性能的白宝石窗口,将其贴合于抽运面,将热量传导至外围热沉疏散.

首先,模拟外围热沉未施加主动散热的温度分布如图10(a),图中温度单位为 $^{\circ}\text{C}$.由结果可知,薄片内的最高温度约为 136°C ,位于光轴近非抽运面一侧,而抽运面由于直接与白宝石接触,温度分布较均匀,约为 45°C ,热沉外侧温度约 38°C .从总体温度分布趋势来看,该方案的冷却效果介于前两个方案之间.

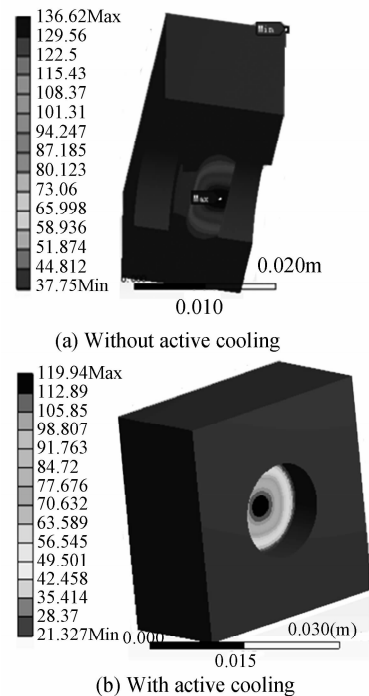


图10 方案三钹玻璃薄片内的热分布

Fig. 10 Thermal distribution within glass disk of Case 3

同时,从薄片的径向温度分布可知,在薄片侧面虽然施加了散热性较好的紫铜作为热沉,但对径向的温度梯度并无明显改善.表明即使加强径向散热,抽运区的热量仍然无法通过径向流出,考虑从尺寸较小的轴向进行散热是改善冷却效果的必由之路.

为进一步改善方案三的冷却效果,考虑在外围热沉施加TEC制冷主动散热(为便于对比,TEC的制冷量取等效于施加 $h=3\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 水冷时的冷却效果).图10(b)所示为这种边界条件下钹玻璃薄片热分布的模拟结果.由图可知,系统的整体温度呈较大幅度降低,最高温度约 120°C ,而钹玻璃薄片与白宝石接触的部位温度也降为约 34°C .尽管此时总体冷却效果仍不如方案一,但能够避免抽运面直接水冷带来的诸多问题,因此,确定白宝石窗口结合外围热沉施加主动散热为最终所采用的热管理方案.

3 结论

激光介质内部的非均匀热效应会导致激光放大性能降低、光束质量变差,甚至有可能导致激光介质的破坏。基于传热学理论,借助有限元分析方法,对 LD 抽运钕玻璃薄片放大器增益介质的瞬态热致效应进行数值模拟,总结其不同边界条件下的热效应特性,并研究了对流换热系数对热效应的影响,进一步对 LD 抽运钕玻璃薄片在不同热管理方案下的温度场进行了数值模拟,对比了几种不同冷却方案的冷却效果。结果表明,在本文的技术方案中,当抽运时间达 120 s 后,薄片内部温度基本达到稳态;对流换热系数 h 的改变对冷却效果的改善并不明显;加强径向散热无法有效疏散抽运区的废热,采用抽运面直接水冷的方案最佳,但在具体实施时无法同时兼顾冷却效果和光学性能;采用光学性能匹配且导热性良好的白宝石窗口结合外围紫铜热沉主动散热(TEC 冷却),薄片内最高温度约 120 °C,在取得较好冷却效果的同时避免了水冷对光学性能的影响。本文的相关研究结果对整个放大器系统的热管理方案设计起到了指导作用,并从理论上验证了热管理方案的可行性。

参考文献

- [1] HUDDLE J J, CHOW L C, LEI S, *et al.* Thermal management of diode laser arrays[C]. *Sixteenth IEEE SEMI-THERM™ Symposium*, 2000; 154-160.
- [2] CHOU H P, WANG Yu-lin, HASSON V. Compact and efficient DPSS laser using diamond-cooled technology [C]. *SPIE*, 2004, **5448**: 550-560.
- [3] DONG Yue, ZU Ji-feng, HOU Li-qun, *et al.* The approximate formulas of temperature and stress distributions and thermal induced effects in a heat capacity slab laser[J]. *Chinese Optical Letters*, 2006, **4**(6): 326-328.
- [4] YANG Yong-ming, ZHOU Rong, GUO Zhen, *et al.* End deformation's experiment and its computer mimic in LD end pumped Nd : YAG crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1297-1300.
杨永明,周荣,过振,等. LD 端泵下 Nd : YAG 端面形变热效应研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1297-1300.
- [5] YAN Ying, ZHANG Heng-li, LIU Yang, *et al.* Thermal effects of laser diode end-pumped multi-segmented slab laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2174-2178.
闫莹,张恒利,刘洋,等. 激光二极管端面抽运多段复合板条激光器热效应[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2174-2178.
- [6] SHI Peng, CHANG Rui, CHEN Wen, *et al.* Influence of the third thermal boundary condition on the thermal effect of laser crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2539-2542.
史彭,常锐,陈文,等. 第三类热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.
- [7] GAN An-sheng, LI Long, SHI Peng. Thermal effect of Yb : YAG slice laser by diode laser end-pumped[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 631-635.
甘安生,李隆,史彭. 激光二极管端面抽运 Yb : YAG 薄片激光器的热效应[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 631-635.
- [8] ZHANG Shen-jin, ZHOU Shou-huan, LÜ Hua-chang, *et al.* Laser-diode arrays symmetrically side-pumped thin disk laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(2): 168-172.
张申金,周寿桓,吕华昌,等. 激光二极管阵列侧面对称抽运薄片激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 168-172.
- [9] LI Qiang, CAI Yan-Fang, JIANG Meng-hua, *et al.* Laser diode array side pumped Nd : YAG thin disk laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7): 1793-1797.
李强,蔡艳芳,姜梦华,等. 激光二极管侧面抽运的 Nd : YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1793-1797.

Thermal Management of Laser Diode Pumped Nd Doped Glass Disk Amplifier

HOU Li-qun¹, FAN Zhong-wei¹, QIU Ji-si^{1,2,3}, ZHAO Tian-zhuo²,
ZHANG Jing¹, ZHANG Xiao-lei¹, TANG Xiong-xin¹

(1 Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China)

(2 The Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the fundamental theory of heat transmission, the transient thermal and stress distributions of laser gain medium in a laser diode end-pumped Nd doped glass disk amplifier are studied by means of finite element analysis. The cooling characteristics of glass disk on different boundary conditions in repetition mode are also discussed. Furthermore, three kinds of different thermal management schemes are proposed with the progress and their thermal effect characteristics are compared. The simulation results show that the cooling configuration with transparent sapphire plate adjacent to the pumping surface which is mounted with TEC-cooled copper housing outside is much attractive. The peak temperature about 120°C occurs in the centre of non-pumping surface. Although its cooling ability is not much effective as that of direct water cooling but it can avoid some problems brought out by the latter. The simulation analysis also proves that the heat within glass disk is difficult to be taken away radially because of its large heat resistance. In practice, the thermal management system should be designed to cool glass disk along axis direction.

Key words: LD pumped; Disk amplifier; Nd doped glass; Thermal effects; Thermal management



HOU Li-qun was born in 1976. She received the Ph. D. degree in optical engineering from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, in 2003. Now she is working at Beijing GK Laser Technology Co. Ltd as a post-doctor and her research interests focus on thermal management of diode pumped solid state lasers.



FAN Zhong-wei was born in 1965. He received the Ph. D. degree in optical engineering from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, in 1997. Now he is working at Beijing GK Laser Technology Co. Ltd as a researcher and Doctoral Supervisor. His research interests focus on high power diode pumped solid state laser and its related technologies.