

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

单小童^{1,2} 严雄伟¹ 张雄军¹ 郑建刚¹ 王明哲¹ 张永亮^{1,2} 於海武¹ 李明中¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

² 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 利用非均匀掺杂的设计思想, 针对正面抽运、背面冷却的有源反射镜放大器结构中不同激活离子掺杂分布的介质进行了模拟计算, 分析并比较了传统均匀掺杂介质与非均匀掺杂放大介质中的温度、温度梯度、应力、应变以及波前畸变的分布。结果表明, 与传统均匀掺杂介质相比, 非均匀掺杂放大介质内的温度、温度梯度、应力、应变与波前畸变均有明显的降低。模拟结果证明, 非均匀掺杂可以改善有源反射镜放大器构型冷却与产热异面的问题, 可以有效地提高放大器增益介质热管理性能, 为进一步讨论基于非均匀掺杂的放大介质的热管理优化提供了基础。

关键词 激光器; 热管理; 数值模拟; Yb:YAG 晶体; 激光二极管抽运; 非均匀掺杂

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0102009

Analysis of Thermal Characteristics in Laser Diode Pump Solid-State Laser with Variable Doping Amplifying Medium

Shan Xiaotong^{1,2} Yan Xiongwei¹ Zhang Xiongjun¹ Zheng Jiangang¹ Wang Mingzhe¹
Zhang Yongliang^{1,2} Yu Haiwu¹ Li Mingzhong¹

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
² Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract A simulation of performance of thermal management with variable doping gain medium in active mirror configuration of laser diode pump solid-state laser is reported. The parameters of temperature, temperature gradient, stress, strain and optical distortion for a conventional amplifying medium and several variable doping media for different doping distributions, in active mirror configuration amplifier with pumping in the front surface and cooling in the back are simulated and compared. The calculation indicates a positive result that the variable doping media can ameliorate the problem of heating and cooling in different surfaces in active mirror configuration, and can elevate the thermal, optical and mechanical performances for laser diode pump solid-state laser (DPSSL) system. The simulation results prove the feasibility for ameliorating thermal management performances in DPSSL by variable doping media.

Key words lasers; thermal management; numerical simulation; Yb:YAG crystal; laser-diode pumping; variable doping

OCIS codes 140.3460; 140.3280; 140.3480; 140.3580; 140.6810

1 引 言

高能量、高平均功率的激光二极管抽运固体激光(DPSSL)系统在能源、工业生产以及高能高密度

物理研究中具有极大的应用潜力。随着近年来激光二极管以及掺 Yb³⁺ 增益介质的发展, DPSSL 系统得到了广泛的研究^[1]。在 高 能、高 平 均 功 率 应 用 中,

收稿日期:2010-06-02; 收到修改稿日期:2010-08-30

基金项目:国家自然科学基金(10874157)资助课题。

作者简介:单小童(1986—),男,硕士研究生,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail:peterpannic@gmail.com

导师简介:张雄军(1972—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事重复频率高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail:zhang.xiongjun@163.com(通信联系人)

DPSSL 系统一般工作在重复频率、脉冲输出的模式下,这种运行模式使 DPSSL 系统的热效应,比如热透镜效应、热致应变等成了系统中比较突出的问题。增益介质中的热效应会破坏光束质量、影响放大器稳定性、降低激光系统效率、引起放大介质的断裂。因此,近年来,DPSSL 系统热管理研究得到了国内外科研人员的广泛关注^[2~13]。如美国 LLNL 实验室的 Mercury 装置采用了特殊设计的导流翼高速 He 气冷却平板结构进行热管理^[14];日本大阪大学的 HALNA 装置采用了边缘温度控制技术的侧抽运板条热管理结构^[15];日本大阪大学的 GENBU 装置采用了低温液氮冷却全反射有源镜结构^[16];法国 LULI 实验室的 LUCIA 装置采用了射流水冷有源镜结构^[17]。虽然以上装置均比较成功地实现了装置的热管理需求,但是均为基于外部冷却结构的优化设计实现热管理性能的提升。通过放大介质结构设计,尤其是介质中激活离子掺杂浓度设计,提高系统热管理性能的方法并不多见。近年来,随着激光陶瓷介质的发展,介质内激活离子的非均匀掺杂已成为可能。

本文利用非均匀掺杂的方法模拟了不同掺杂分布情况下基于有源反射镜构型的 DPSSL 系统放大介质的热管理效果,并与均匀掺杂介质进行了比较。激光器放大介质中的产热主要来自于抽运光的吸收。在有源反射镜结构的放大介质中,主要影响介质热管理的因素是介质有限的厚度。在均匀掺杂的有源镜放大介质中,热沉积主要集中在抽运光的入射面处。而同时,冷却流体却在与抽运相异的表面造成介质的散热不良。在非均匀掺杂介质中,通过调整掺杂浓度分布可以调制产热的分布,使热源接近冷却面,解决有源反射镜结构产热与冷却异面的问题,优化该构型的热管理效果。文中主要讨论了非均匀掺杂的掺杂浓度分布变化对增益介质温度、温度梯度、应力-应变以及波前畸变的影响,验证了非均匀掺杂对放大器热管理性能的提升作用。

2 物理模型

2.1 介质构型

放大器构型如图 1(a)所示,该放大器采用背面水冷、正面抽运的有源镜放大器构型。增益介质为 Yb:YAG 晶体,尺寸 $\phi 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,抽运区尺寸 $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$,介质在厚度方向采用了非均匀的离子掺杂浓度分布,介质的冷却、抽运、掺杂结构在图 1(b)中显示。为了方便讨论,定义介质的厚度方

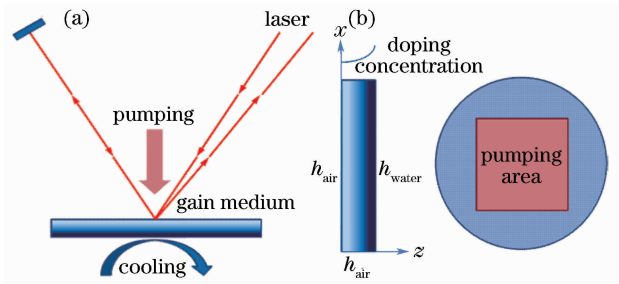


图 1 有源反射镜放大器结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of active mirror configuration 向为 z 方向。

2.2 模拟计算模型

在模拟计算中,首先通过给定掺杂浓度函数以及给定抽运强度计算介质中由于抽运光吸收的产热分布,进而计算介质中的温度场分布。由温度场的分布,可以通过进一步的多物理场耦合求解介质中的热致应力-应变以及由热致折射率变化和应变引起的波前畸变。

在模拟中,介质内的温度由初态经过一段时间的升高后,最终产热与散热的能力会达到平衡。此时,介质内的温度分布在空间与时间上应趋于稳定,温度分布随着抽运与冷却的过程围绕稳态分布有微小的变化。因此,针对介质内温度分布的稳态计算可以反映放大介质稳定工作过程中的热管理特性。

2.2.1 产热与散热

在笛卡尔坐标系中,介质内的非稳态热传输方程可写为

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, y, z; t)}{\partial t} = \kappa(T, C_{yb}) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + P_{th}(x, y, z; t), \quad (1)$$

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n_i} \Big|_{Si} = h_i \times (T_i - T_\infty), \quad (2)$$

式中 ρ 为增益介质的密度, C_p 为比热容, $\kappa(T, C_{yb})$ 为热导率,它是温度和掺杂浓度的函数,热导率 $\kappa(T, C_{yb})$ 随温度与掺杂浓度的变化关系可由 Gaumé 与 Patel 的文献中得到^[18,19]。 $P_{th}(x, y, z; t)$ 为介质内热源分布。边界条件中, h_i 为介质各表面的对流换热系数, T_i 为介质表面温度, T_∞ 为冷却工质的温度。通过求解热传输方程可以得到介质内的温度分布。

介质内的产热主要来自于对光的吸收,其中包括对抽运光的吸收,对激光的再吸收。由于介质对抽运光的吸收远大于对激光的再吸收强度,并且激光的能量小于抽运光。所以,一般情况下,在考虑产

热时,仅考虑介质对抽运光吸收所产生的废热。对于稳态情况,由于模拟中采用了均匀分布的面抽运,热源分布仅与空间坐标 z 有关,可以表示为

$$P_{th} = -\frac{\partial(I \times t_p \times F \times \eta_{th})}{\partial z} = -\frac{\partial I}{\partial z} \times t_p \times F \times \eta_{th}, \quad (x_{min} \leq x \leq x_{max}, y_{min} \leq y \leq y_{max}, z_{min} \leq z \leq z_{max}) \quad (3)$$

式中 I 为介质中的抽运光强,它是空间坐标的函数, t_p 为抽运脉宽, F 为重复频率, η_{th} 为热效率。考虑量子效率, Yb:YAG 的斯托克斯损耗为 8.6%, 在计算中 η_{th} 的数值固定为 11%。

在非均匀掺杂介质中,吸收截面与掺杂浓度相关。所以,光强在介质中的传播无法单纯利用指数衰减形式描述。光强在介质中的衰减可以写为

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\alpha(C_{Yb})I, \quad (4)$$

式中 α 为掺杂浓度的函数。由于掺杂浓度与吸收系数成正比,若不考虑吸收截面随温度的变化,单位距离吸收的光强可以表示为

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\alpha_0 C_{Yb}(z)I, \quad (5)$$

式中 α_0 为一常数,代表单位掺杂浓度的吸收系数,在通常的模拟中,考虑 Yb³⁺ 的吸收截面以及经验结论得到 α_0 的数值恒定为 0.12/m。同时,为了保证不同掺杂分布情况下介质对抽运光具有相同的吸收能力,介质内的掺杂浓度与厚度的乘积恒定为 15% × mm^[20]。

2.2.2 应力应变模型

利用 COMSOL 软件多物理场耦合,将求解出的温度场代入固体的应力应变模型,考虑实际应用中的具体情况,求解了介质的热弹方程。

2.2.3 波前畸变

由于热致折射率变化与热致应变的影响,激光在介质内的传播会产生波前畸变。在有限元法计算中,可以通过控制体内的光程求和计算光程差(OPD)。表示为

$$\delta_{OPD} = \int n(x, y, z; T) dl + \sum n(x, y, z; T) \times \delta l, \quad (6)$$

$$n(x, y, z; T) = n_0 + (\partial n / \partial T) \times \delta T(x, y, z), \quad (7)$$

式中 n_0 为介质初始温度时的折射率, $\partial n / \partial T$ 为折射率的热致折射率系数, δl 为介质应变造成的微元的变形。

计算中所采用的一些参数为:抽运光波长

940 nm, 提取激光波长 1030 nm, 抽运光强 20 kW/cm², 水温 288.15 K, 环境温度 293.15 K, 冷却流体为水, 水冷换热系数 15000 W/(m² · K), 自然对流换热系数 6.5 W/(m² · K)。Yb:YAG 的物理系数可由於海武等的文献中得到^[21]。

3 模拟计算

分别对掺杂原子数分数为 $C_{Yb}(z) = 5\%$, $C_{Yb}(z) = az$ ($a = 3.3$), $C_{Yb}(z) = \exp(bz^2)$ ($b = 0.3625$), $C_{Yb}(z) = \exp(cz^4)$ ($c = 0.0495$) 的 4 种情况进行了模拟。

3.1 介质内温度分布

温度分布的模拟结果如图 2 所示。图中所显示的温度为沿 z 方向的平均温度分布,由图中可以看出, $\exp(cz^4)$ 形式掺杂分布的介质最高温度最低,温度梯度也相应是最低的。随着掺杂梯度的增大,介质的主要产热区域趋向于介质的冷却面,散热的效果也相应地提高。可见,通过梯度掺杂,可以比较有效地降低介质内的温升,并且降低温度梯度。这对提高放大器的热管理效率是有帮助的。

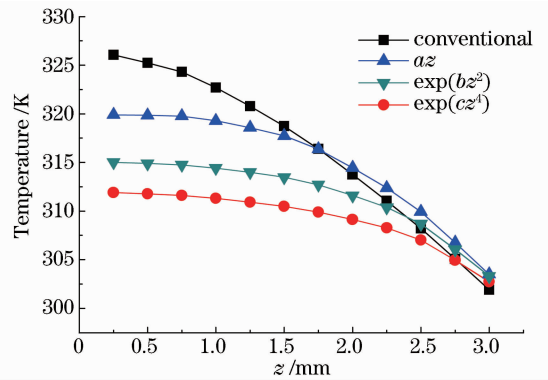


图 2 不同掺杂形式的介质中沿 z 方向的平均温度

Fig. 2 Average temperature along z axis in active media

3.2 应变与变形

在应变计算中,将已得到的温度分布分别代入介质材料,对上述 4 种不同掺杂浓度分布介质的热致应变与应变所造成的介质变形进行了模拟。在建模过程中,鉴于实际应用中激光头的结构。介质前表面为自由边界条件,边缘加载 100 N 的压力。介质后表面边缘在 z 方向无位移,在 x, y 方向为自由。介质的侧面为自由边界条件。模拟结果如图 3 所示。出于方便比较考虑,不同情况下介质的应变以及位移图的色标已经统一。图中所显示的介质位移为放大 500 倍后的效果。

图 3 中所显示的结果包括了应变以及应变所造

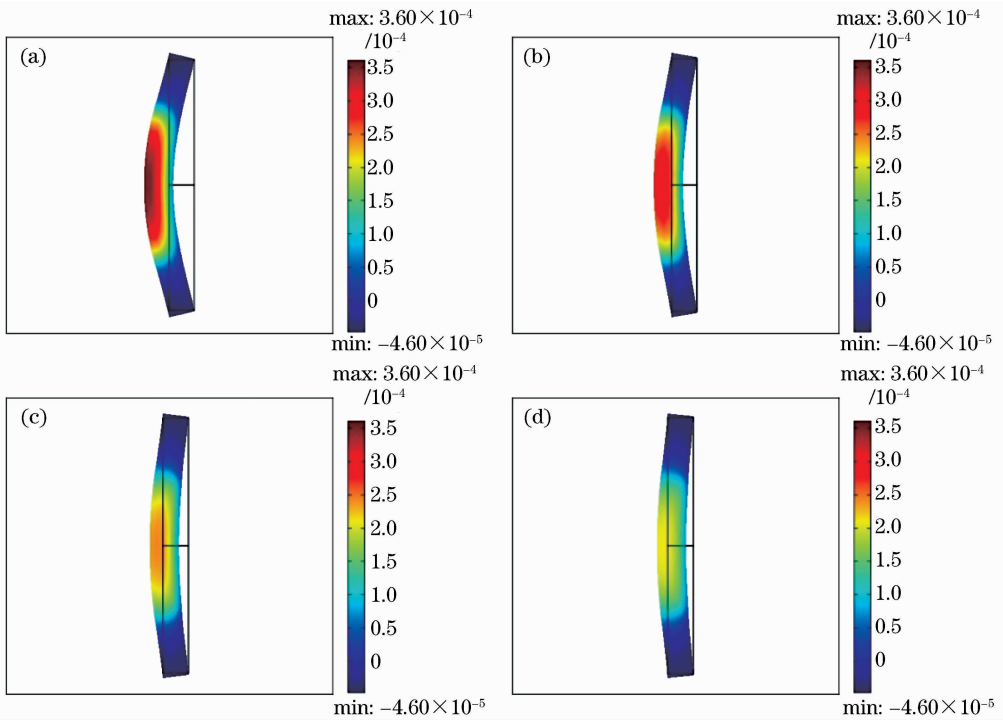


图 3 不同掺杂介质中应变与位移的模拟结果。(a) 均匀掺杂, (b) $C_{Yb} = az$ 形式掺杂, (c) $C_{Yb} = \exp(bz^2)$ 形式掺杂, (d) $C_{Yb} = \exp(cz^4)$ 形式掺杂

Fig. 3 Strain and displacement in media. (a) conventional doping, (b) linear doping, (c) Gaussian distribution doping, (d) $C_{Yb} = \exp(cz^4)$ doping

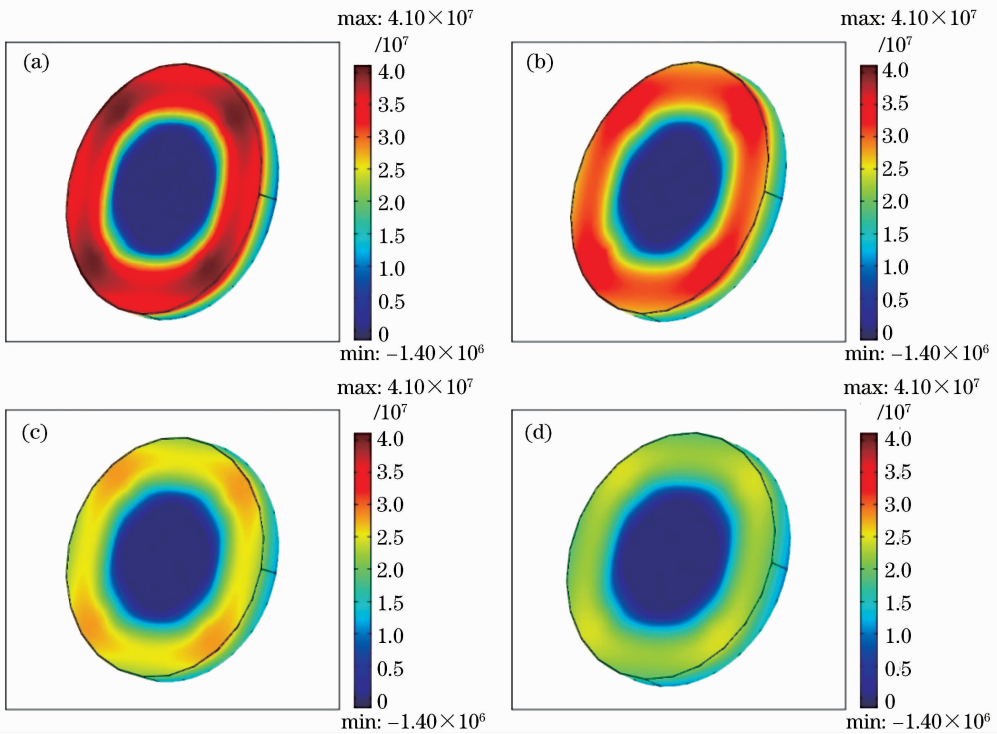


图 4 不同掺杂介质中应力的模拟结果。(a) 均匀掺杂, (b) $C_{Yb} = az$ 形式掺杂, (c) $C_{Yb} = \exp(bz^2)$ 形式掺杂, (d) $C_{Yb} = \exp(cz^4)$ 形式掺杂

Fig. 4 Stress in different media. (a) conventional doping, (b) linear doping, (c) Gaussian distribution doping, (d) $C_{Yb} = \exp(cz^4)$ doping

成的变形。由均匀掺杂到高阶高斯型掺杂分布,随着掺杂梯度的增大,由于热管理能力的提升,温度与温度梯度降低,介质内的应变以及应变所带来的位移也相应地减小。结果证明了温度的降低使晶体的应变相应地减小,说明梯度掺杂对降低介质中的应变有一定的帮助。

3.3 介质应力

严重的介质应力会使介质产生断裂的危险。因此,在 DPSSL 系统设计中也需要对应力的强度与分布进行考虑。采用了与分析应变时相同的条件,分别对 4 种掺杂浓度分布的介质中的第一主应力进行了模拟,结果在图 4 中给出。出于方便比较考虑,不同情况下介质内应力的色标已经统一。

模拟结果中,均匀掺杂介质的应力最为明显,而非均匀掺杂的介质的应力均比均匀介质小,并且随着温度的下降,其应力也随之下降,介质中的最大应力由均匀掺杂的 4.06×10^7 Pa,降低到高阶高斯型掺杂介质中的 2.54×10^7 Pa。说明采用非均匀掺杂介质对降低增益介质中的应力,维持增益介质的安全使用具有一定帮助。

3.4 波前畸变

模拟了 1030 nm 波长的激光在介质中的传播造成的波前畸变,比较了相同条件下不同掺杂分布介质的波前畸变。为了简化计算,在模拟中仅考虑激光透射过介质的情况。模拟所得到的波前畸变结果如图 5 所示。

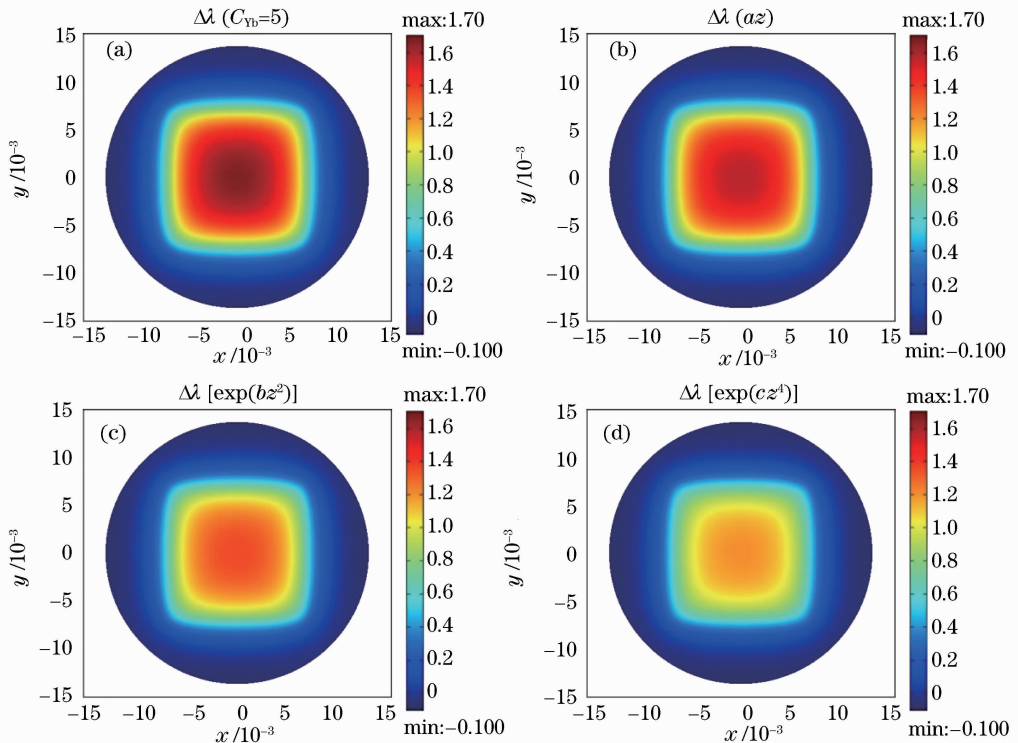


图 5 不同掺杂介质中的 OPD 分布。(a) 均匀掺杂,(b) $C_{yb} = az$ 形式掺杂,
(c) $C_{yb} = \exp(bz^2)$ 形式掺杂,(d) $C_{yb} = \exp(cz^4)$ 形式掺杂

Fig. 5 Optical path difference in media. (a) conventional doping, (b) linear doping,
(c) Gaussian distribution doping, (d) $C_{yb} = \exp(cz^4)$ doping

结果表明,非均匀掺杂可以抑制由热致折射率变化与应变造成的波前畸变。在实际情况下,由于放大器为多程放大结构,波前畸变的数值应为模拟结果数值乘以激光放大程数的 2 倍。这是由有源镜结构的反射式结构所决定的。若考虑放大器为三程放大,则放大器介质所产生的波前畸变的最大值将由均匀掺杂情况的 10.2λ 降低到高阶高斯型掺杂介质产生的 6.9λ 。

4 结 论

本文利用激活离子非均匀掺杂的方式优化了高能、高平均功率 DPSSL 系统热管理效果。通过模拟相同条件的正抽运有源反射镜结构放大器中不同掺杂浓度分布的放大介质的温度、应变、应力以及 OPD 分布情况,理论上验证了非均匀掺杂对改善有源反射镜放大器结构增益介质热管理性能,进而提高其热学、力学以及光学性能的效果。

通过激活离子非均匀掺杂方法实现了热管理效率的提升可以改善某些放大器构型中产热与冷却异面的情况。并且,较采用优化外部散热结构的方法,该方法具有结构紧凑、稳定性高的优势。在未来的工作中将通过非均匀掺杂的方法对特定情况下特定固体激光系统的增益介质进行优化设计,通过实验验证非均匀掺杂热管理优化方法的可行性与有效性,利用非均匀掺杂放大介质的手段实现激光二极管抽运的固体激光装置热管理效率的提升。

参 考 文 献

- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1605~1618
周寿桓,赵 鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1605~1618
- Xie Wu, Yu Jianhua, Bi Cheng *et al.*. Thermal-lens effect and influence on laser output and stability of resonator in the all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl.):70~73
谢 武,余建华,毕 成等. 全固体激光器热透镜效应及其对激光输出和腔稳定性的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):70~73
- Yang Yongming, Xu Qiming, Guo Zhen. Thermal deformation in crystal of end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1323~1328
杨永明,许启明,过 振. 端面抽运固体激光器中晶体的热形变[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1323~1328
- Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijun. Hot-image effects in high-power solid-state laser systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1315~1322
赵建林,彭 涛,叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1315~1322
- Li Bingbin, Guo Zhen, Song Xiaolu *et al.*. Direct heat dissipation from pumped end in laser diode end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):59~65
李兵斌,过 振,宋小鹿等. 端面抽运固体激光器中抽运端面的直接散热[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1):59~65
- Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin *et al.*. Time-varying characteristic of thermal effect in diode laser pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(suppl.):10~15
宋小鹿,过 振,李兵斌等. 激光二极管抽运固体激光器中晶体热效应的时变特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(增刊):10~15
- Dong Yantao, Zhao Zhigang, Liu Chong *et al.*. Influence of thermal effects on polarizability and output character of TEM₀₀-mode of solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1759~1765
董延涛,赵智刚,刘 崇等. 热效应对固体激光器偏振特性和基模输出特性的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1759~1765
- C. Pfister, R. Weber, H. P. Weber *et al.*. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7):1605~1615
- A. Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1057~1069
- J. Eggleston, T. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser—part I: theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3):289~301
- T. Kane, J. Eggleston, R. Byer. The slab geometry laser—part II: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(8):1195~1210
- Xie Wenjie, Tam Siu-Chung, Yang Hongru *et al.*. Optimum convective heat transfer coefficient for diode-pumped laser slabs [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(5):387~391
- D. Mudge, M. Ostermeyer, P. Veitch *et al.*. Power scalable TEM₀₀ CW Nd:YAG laser with thermal lens compensation [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4):643~649
- A. Bayramian, P. Armstrong, R. Beach *et al.*. System operations of mercury: a diode-pumped solid-state laser [R]. *Second International Workshop HEC-DPSSL*, Germany, 2005
- T. Kawashima. Recent progress of the HALNA DPSSL driver development [R]. *3rd International Workshop HEC-DPSSL*, Livermore, California, USA, 2006
- J. Kawanaka, K. Yamakawa, K. Tsubakimoto *et al.*. Generation of energetic beam ultimate (GENBU) laser—main laser [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2008, **36**(APLS):1056~1058
- J. Chanteloup, H. Yu, G. Bourdet *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
- R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien *et al.*. A simple model for prediction of thermal conductivity in pure and doped insulating crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(7):1355~1357
- F. D. Patel, E. C. Honea, J. Speth *et al.*. Laser demonstration of Yb₃Al₅O₁₂ (YbAG) and materials properties of highly doped Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(1):135~144
- Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Investigation on pumping dynamics and pulsed energy storage performance of Yb ions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7):4158~4167
於海武,徐美健,段文涛等. Yb 离子抽运动力学及脉冲储能特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7):4158~4167
- Yu Haiwu, Duan Wentao, Xu Meijian *et al.*. Review of ytterbium-doped laser materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4):1~12
於海武,段文涛,徐美健等. Yb 激光材料综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(4):1~12