

# 主振荡功率放大激光器增益导引效应的 数值模拟及分析

项震<sup>1</sup> 汪丹<sup>1</sup> 李通<sup>1</sup> 潘孙强<sup>1</sup> 董延涛<sup>1</sup> 赵智刚<sup>1</sup> 葛剑虹<sup>1</sup> 刘崇<sup>1\*</sup> 冯爱民<sup>2</sup> 毛谦敏<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)  
(<sup>2</sup>中国计量学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 在增益导引的作用下,未采用任何补偿措施,主振荡功率放大(MOPA)激光器的输出光光束质量得到改善。综合考虑热效应、增益导引效应、增益饱和效应后,在 MOPA 系统中建立了一种新的激光放大模型,并进行了数值计算,模拟结果与已报道的实验结果符合较好。另外,计算结果表明填充因子和抽运光功率是影响输出激光光束质量的重要因素,而热效应与增益导引效应是其深层原因,这对进一步利用增益导引效应改善光束质量具有指导意义。

**关键词** 激光技术;增益导引效应;填充因子;热畸变;光束质量;主振荡功率放大器

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502004

## Numerical Simulation and Analysis for Gain Guiding Effect in Master Oscillator Power Amplifier Lasers

Xiang Zhen<sup>1</sup> Wang Dan<sup>1</sup> Li Tong<sup>1</sup> Pan Sunqiang<sup>1</sup> Dong Yantao<sup>1</sup> Zhao Zhigang<sup>1</sup>  
Ge Jianhong<sup>1</sup> Liu Chong<sup>1</sup> Feng Aimin<sup>1</sup> Mao Qianmin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)  
(<sup>2</sup>China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** With the help of gain guiding effect, the quality of the beam which emitted from master oscillator power amplifier (MOPA) laser system can be improved without any compensations. Considering thermal effect, gain guiding effect and gain saturation effect comprehensively, a novel model for laser amplifier in MOPA system is developed and numerically calculated. The simulation result approximately agrees with the recently reported experimental counterpart. Moreover, the simulation result reveals that fill factor and pump power are two key aspects influencing the final beam quality of the MOPA system. Besides, the thermal effect and gain guiding effect are the underlying reasons. This analysis is meaningful for improving beam quality of laser emitted from amplifier.

**Key words** laser technique; gain guiding effect; fill factor; thermal distortion; beam quality; master oscillator power amplifier

**OCIS codes** 140.3280; 140.3295; 140.3480; 140.3580

## 1 引 言

主振荡功率放大器(MOPA)系统是获得高功率、高光束质量激光的有效方法之一。由于功率放大中的热畸变、非均匀抽运等因素,通常导致功率放大后的光束质量变差<sup>[1,2]</sup>。为了保证高功率、高光束质量的获得,在以往的研究中一般都加入了补偿措施<sup>[3]</sup>。

但是即使是这样,光束质量仍然会趋向恶化。

通过控制抽运光或掺杂粒子分布而改变晶体内的增益分布和区域,使激光系统中高阶模与基模的增益和损耗存在较大差异,以达到模式选择的目的,这就是增益导引效应。该效应优点在于无需采用额外的补偿措施,便可使输出光光束质量变好。这一

收稿日期: 2010-12-22; 收到修改稿日期: 2011-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(60908013)和浙江省重大科技专项项目(2009C14036)资助课题。

作者简介: 项震(1971—),男,副教授,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: xiangzhen@zju.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: chongliu78@hotmail.com

效应早已出现在光纤放大的相关应用<sup>[4,5]</sup>中,而在全固态激光器放大上的应用(主要为 MOPA 系统),直到最近才出现相关报道<sup>[6,7]</sup>。为了更好地利用增益导引效应来改善输出光的质量,有必要对增益导引效应进行深入研究。

本文模拟了全固态激光器 MOPA 系统中激光的放大。建立了薄片式模型,在模型中引入了热效应、增益导引效应及增益饱和效应,利用衍射的角谱理论模拟光束在晶体中的传播,通过迭代,得到激光经放大后的光强分布,然后利用  $M^2$  因子的二阶矩定义计算了输出激光的光束质量。模拟结果表明,在增益导引效应和热效应的共同作用下,输出激光不仅功率得到放大,而且光束质量得到改善,这符合已报道的实验结果<sup>[7]</sup>。

## 2 理论模型

MOPA 系统中,激光的放大如图 1 所示。放大级中的晶体是端面有未掺杂部分的复合晶体,可有效减小热效应及端面形变<sup>[7,8]</sup>。晶体被双端抽运,输入激光单程通过。考虑了热效应、增益导引效应及增益饱和效应后,要精确计算激光在折射率和增益系数均与空间坐标有关的非均匀介质中传播是一项非常复杂的工作。为此提出薄片式模型来解决这个问题。

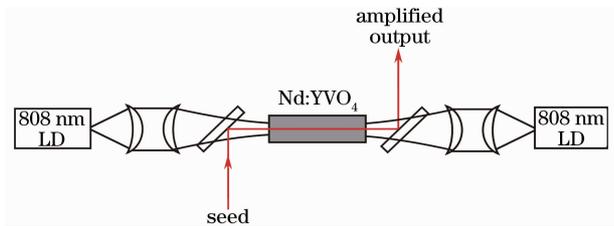


图 1 MOPA 系统激光放大示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the power amplifier in MOPA system

沿着激光传播方向,将晶体分为  $n$  个薄片,每个薄片长为  $\Delta z$ ,在每个薄片的  $\Delta z/2$  处有个不计厚度的平面  $M$ ,具体如图 2 所示。

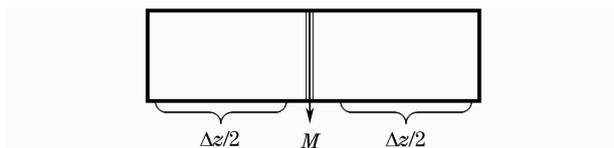


图 2 薄片示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sheet

设初始激光电场分布为  $\psi_0(x, y, 0)$ , 经过长度为  $\Delta z/2$  的折射率为  $n_0$  的均匀介质到达  $M$  平面的电场分布为  $\psi_1(x, y, \Delta z/2)$ 。 $M$  平面相当于一个相位变换平

面,集中了整个  $\Delta z$  上的增益及折射率梯度的效果,其前后相位差为  $\Delta z\Phi$ , 其中  $\Phi = \frac{1}{2k}(2k^2\beta + ik\alpha)$ <sup>[9]</sup>,  $k$  为波数,包含有增益系数  $\alpha$  及折射率梯度  $\beta$ , 当激光经过  $M$  平面后,其电场分布为  $\psi_1(x, y, z)\exp(-i\Delta z\Phi)$ 。激光再通过长度为  $\Delta z/2$  的折射率为  $n_0$  的均匀介质后,完成一个  $\Delta z$  距离上的传播,此时输出光电场为  $\psi_2(x, y, \Delta z)$ 。对其余薄片进行类似计算后便可得到激光在整个晶体中传播后的输出光。在  $n$  足够大的情况下,该模型能较准确地反映激光在非均匀晶体中的传播<sup>[9]</sup>。下面解决模型中的传播问题、折射率梯度  $\beta$  及增益系数  $\alpha$ 。

激光在折射率为  $n_0$  的均匀介质中传播  $\Delta z/2$  的距离,利用衍射的角谱理论<sup>[10]</sup>可快速得到传播后的结果,

$$\psi(x, y, \Delta z/2) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[\psi(x, y, 0)] \times \exp[ik(\Delta z/2)\sqrt{1 - \lambda_1^2 f_x^2 - \lambda_1^2 f_y^2}]\}, \quad (1)$$

式中  $\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$  分别为傅里叶变换与逆变换,  $\lambda_1^2$  为激光在介质中的波长,  $f_x, f_y$  是变换后的频谱坐标。

在双端抽运下,晶体内部与边界上的温度差分布为<sup>[11]</sup>

$$\Delta T(r, z) = T(r, z) - T_0 = \Delta T_0(z) \begin{cases} 2\ln(R_p/R_0) + 1 - (r/R_p)^2, & (r \leq R_p) \\ -2\ln(r/R_p), & (r > R_p) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $R_0$  为激光晶体半径,  $R_p$  为抽运光半径,  $\Delta T_0(z)$  为晶体中心与边界上的温度差,可表示为

$$\Delta T_0(z) = \frac{\eta P_p [\exp(-az) + \exp(-a)(l-z)]}{4\pi K_c l}, \quad (3)$$

式中  $\eta$  为热产生系数,  $K_c$  为热导率,  $l$  为晶体长度,  $P_p$  为抽运光功率,  $a$  为吸收系数。由温度梯度分布形成的折射率梯度分布可表示为

$$\beta(r, z) = \frac{dn}{dT}\Delta T(r, z), \quad (4)$$

式中  $\frac{dn}{dT}$  为热光系数。

而随着激光功率的不断放大,晶体内的饱和效应明显,其增益分布应由抽运光功率分布和激光功率分布共同决定。通过求解速率方程<sup>[12]</sup>, 晶体内的增益系数分布为

$$\alpha = \frac{1}{I_1(r, z)} \cdot \frac{dI_1(r, z)}{dz} = \frac{G^0(r, z)}{1 + 2sI_1(r, z)}, \quad (5)$$

式中  $I_1(r, z)$  为激光在晶体中的强度分布,  $s = \frac{f\sigma}{h\nu_1}$

为增益饱和参量,其中  $f$  为活跃能级粒子数占总能级粒子数的比率,其值设为 1, $\sigma$  为激光增益截面, $\tau$  为荧光寿命, $h\nu_l$  为激光单光子能量。 $G^0(r,z)$  为小信号增益分布,可表示为

$$G^0(r,z) = \sigma f R r_p(r,z) - N_1^0 \sigma, \quad (6)$$

式中  $N_1^0$  为基态粒子数,由于模型中采用四能级系统,大量粒子集中在上下能级上,基态粒子数为 0; $R$  为抽运速率, $R = \frac{aP_p}{h\nu_p}$ , $h\nu_p$  为抽运光单光子能量; $r_p(r,z)$  为抽运光在晶体中的归一化分布,设以高斯

光为双端抽运光, $r_p(r,z)$  可表示为

$$r_p(r,z) = A \{ \exp(-az) + \exp[(-a)(l-z)] \} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_p^2}\right), \quad (7)$$

式中  $A$  为归一化系数, $\omega_p$  为抽运光束腰半径。

### 3 数值模拟结果及分析

选用的激光晶体为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times (16+1+1) \text{ mm}$  的 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体,相关参数<sup>[7,13]</sup>分别为:热产生系数  $\eta = 0.4$ ,热导率  $K_c = 55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,吸收系数

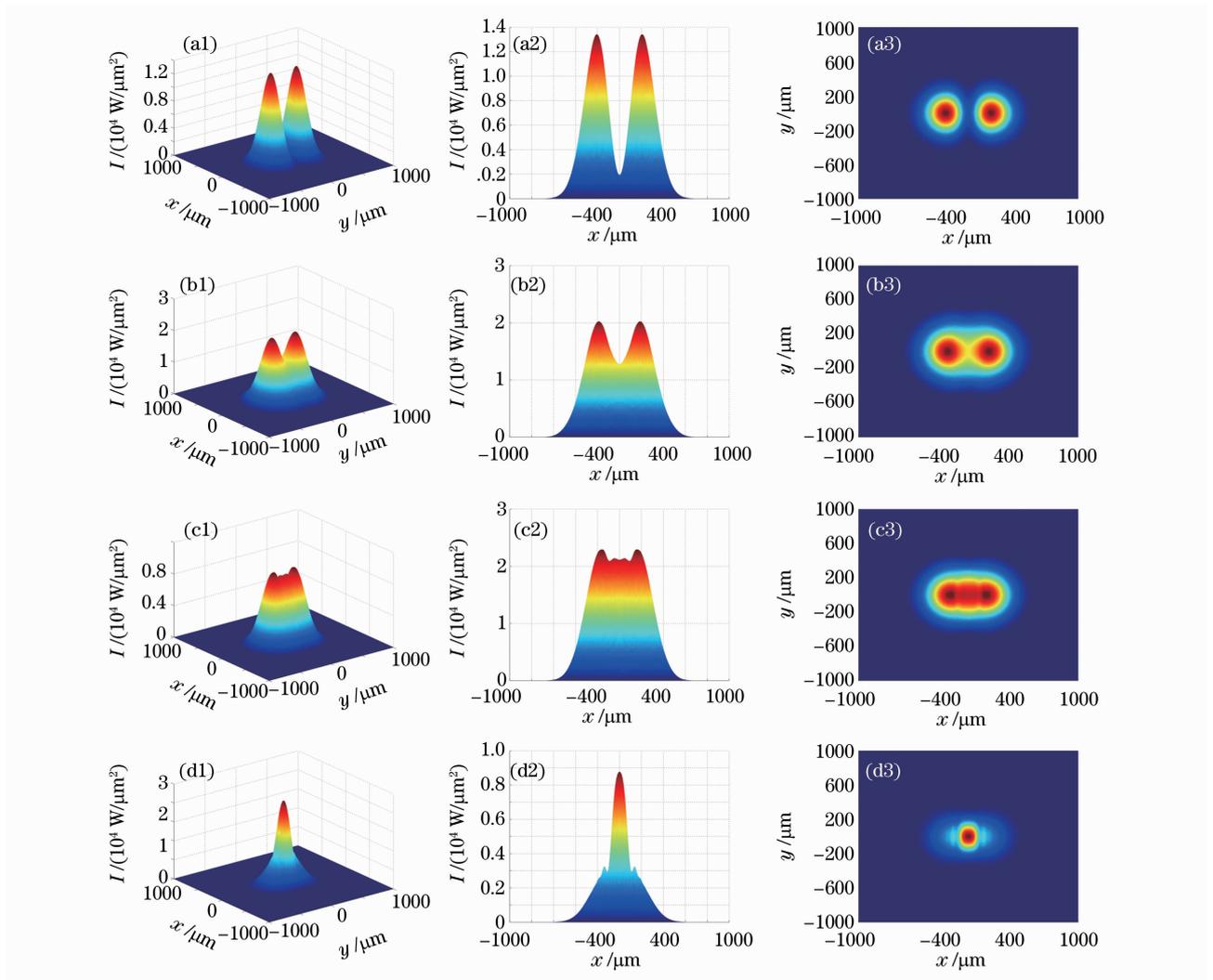


图 3 模拟过程中输入与输出激光的光强分布。a1,a2,a3 分别表示输入激光光强的三维分布, $x$  方向上的分布以及光斑图样;b1,b2,b3 表示抽运光半径  $\omega_p = 500 \mu\text{m}$  时的输出激光分布;c1,c2,c3 表示抽运光半径  $\omega_p = 400 \mu\text{m}$  时的输出激光分布;d1,d2,d3 表示抽运光半径  $\omega_p = 270 \mu\text{m}$  时的输出激光分布

Fig. 3 Power distribution of input and output laser in simulation. a1, a2, a3 represent 3D distribution of input laser power, distribution in  $x$  direction of input laser power and input laser spot respectively; b1, b2, b3 represent power distribution of output laser when radius of pump light is  $\omega_p = 500 \mu\text{m}$ ; c1, c2, c3 represent power distribution of output laser when radius of pump light is  $\omega_p = 400 \mu\text{m}$ ; d1, d2, d3 represent power distribution of output laser when radius of pump light is  $\omega_p = 270 \mu\text{m}$

$\alpha = 14.8 \text{ cm}^{-1}$ , 热光系数  $\frac{dn}{dT} = 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 激光增益截面  $\sigma = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 荧光寿命  $\tau = 10^{-4} \text{ s}$ , 晶体主折射率  $n_0 = 2$ 。输入激光如图 3(a) 所示, 波长  $\lambda_1 = 1064 \text{ nm}$ , 功率  $P_1 = 27 \text{ W}$ , 半径  $w_1 = 300 \mu\text{m}$ , 在晶体端面处的光强分布为

$$I_1(x, y, 0) = P_1 \left\{ \frac{1}{10} \left\{ A_1 \exp \left[ \frac{-2(x^2 + y^2)}{w_1^2} \right] \right\} + \frac{9}{10} \left\{ A_2 \frac{2x^2}{w_1^2} \exp \left[ \frac{-2(x^2 + y^2)}{w_1^2} \right] \right\} \right\}. \quad (8)$$

式中  $A_1, A_2$  分别为高斯基模与  $\text{TEM}_{10}$  模的归一化系数。利用光束质量因子 ( $M^2$ ) 的二阶矩定义计算得到输入激光  $M_x^2 = 2.15$ 。

抽运光波长  $\lambda_p = 808 \text{ nm}$ , 功率  $P_p = 47 \text{ W}$ , 半径  $w_p = 500 \mu\text{m}$ 。激光经晶体放大后, 输出光强分布如图 3(b) 所示。由图可知, 激光能量开始向中间汇聚, 光束质量变好, 其  $M_x^2 = 1.37$ , 输出功率为  $58 \text{ W}$ 。改变抽运光半径, 当  $w_p = 400 \mu\text{m}$  时, 激光进一步会聚, 输出激光光束质量进一步改善, 此时光强分布如图 3(c) 所示, 其  $M_x^2 = 1.3$ , 输出功率为  $65 \text{ W}$ 。对比文献[7]中的实验结果, 模拟结果与其基本符合。继续缩小抽运光半径,  $w_p = 270 \mu\text{m}$ , 光强分布如图 3(d) 所示。由图可知, 其  $M_x^2 = 2.36$ , 光束质量变差, 这主要由于过小的抽运半径, 使输出激光产生了原本没有的旁瓣<sup>[14]</sup>。

图 4 表示在抽运功率  $P_p = 47 \text{ W}$ , 输入激光功率  $P_1 = 27 \text{ W}$  的情况下, 输出激光  $M_x^2$  因子随抽运光半径变化的趋势。曲线中输入激光的参数分别是: 方形  $w_1 = 300 \mu\text{m}, M_x^2 = 2.15$ ; 圆形  $w_1 = 400 \mu\text{m}, M_x^2 = 1.9$ ; 三角  $w_1 = 500 \mu\text{m}, M_x^2 = 1.62$ 。由图可知, 填充因子过小, 抽运过于集中, 波前的热畸变严重, 导致输出光束质量变差。填充因子过大, 抽运光过于分散, 增益导引效应不明显, 也不能很好改善输出光的

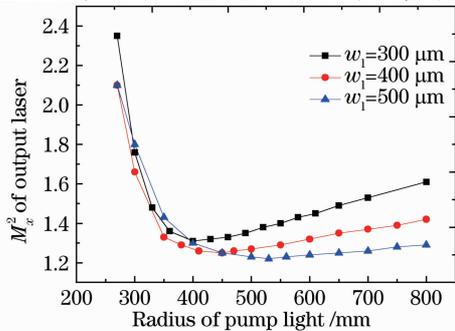


图 4 输出激光  $M_x^2$  因子与抽运光半径的关系  
Fig. 4 Relationship between  $M_x^2$  factor of output laser and radius of pump light

质量。因此在输入激光半径一定的情况下, 存在最佳填充因子 ( $w_1/w_p$ ), 使得输出激光光束质量最好。

图 5 表示输入激光光束质量对增益导引效应的影响。图中输入激光和抽运光的参数为: 输入激光功率  $P_1 = 27 \text{ W}$ , 抽运光半径  $w_p = 400 \mu\text{m}$ , 抽运光功率  $P_p = 47 \text{ W}$ 。当输入激光光束质量较差时 ( $M_x^2 = 2.15$ ), 输出激光光束质量得到明显改善 ( $M_x^2 = 1.3$ ), 说明此时增益导引效应较强。当输入激光光束质量较好时 ( $M_x^2 = 1.2$ ), 增益导引效应较弱, 对输出激光光束质量改善较小 ( $M_x^2 = 1.15$ )。尤其是当输入激光光束近衍射极限时 ( $M_x^2 = 1.02$ ), 增益导引效应最弱, 此时主要由于热效应致使输出激光光束质量变差 ( $M_x^2 = 1.1$ )。

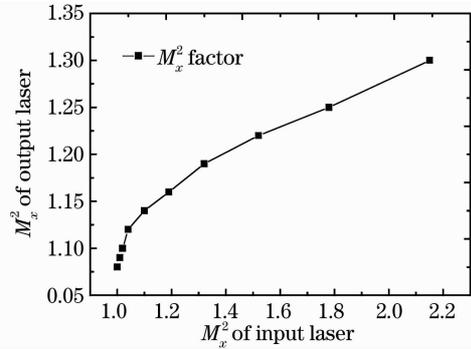


图 5 输入激光光束质量与输出激光光束质量的关系  
Fig. 5 Relationship between  $M_x^2$  factor of input laser and output laser

图 6 表示抽运光功率对输出激光光束质量的影响。图中输入激光和抽运光的参数为:  $w_1 = 300 \mu\text{m}, M_x^2 = 2.0, P_1 = 27 \text{ W}, w_p = 400 \mu\text{m}$ 。图 7 表示相应的放大总增益与输出激光光束质量的关系, 其中放大总增益定义为输出激光功率与输入激光功率之比, 即  $G = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ 。由两图可知, 抽运功率过小, 放大总增益较小, 增益导引作用较弱, 光束质量

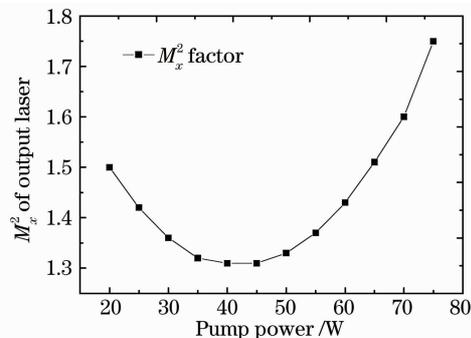


图 6 抽运光的功率与输出激光光束质量的关系  
Fig. 6 Relationship between  $M_x^2$  factor of output laser and the power of pump light

难以得到改善；而抽运功率过大，放大总增益较大，热效应导致输出激光光束质量快速恶化。因此也存在最优抽运功率和放大总增益，使输出激光光束质量最好。

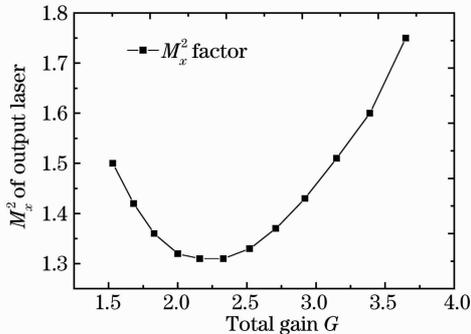


图7 放大总增益与输出激光光束质量的关系

Fig. 7 Relationship between  $M_x^2$  factor of output laser and the full gain

## 4 结 论

模拟了MOPA系统中激光的放大。结果表明，增益导引效应能有效改善输出激光的光束质量，并指出填充因子( $\omega_1/\omega_p$ )和抽运光功率都对输出激光光束质量产生影响，在一定条件下都存在最优值，使输出激光光束质量最好。另外还指出热效应大小和增益导引效应强弱是输出激光光束质量好坏的深层原因。模拟结果与已有的实验结果符合较好，对进一步利用增益导引效应改善光束质量具有指导意义。

## 参 考 文 献

- Pan Sunqiang, Liu Chong, Zhao Zhigang *et al.*. Thermal effects and thermal focal length measurement of laser diode end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2445~2450  
潘孙强, 刘崇, 赵智刚等. 激光二极管端面抽运固体激光器的热效应和热透镜焦距测量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2445~2450
- Dong Yantao, Zhao Zhigang, Liu Chong *et al.*. Influence of thermal effects on polarizability and output character of TEM<sub>00</sub>-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
- Zhao Zhigang, Cui Lingling, Tong Lixin *et al.*. All-solid-state high pulse repetition rate high pulse energy single-longitudinal-mode MOPA laser system with solid-state phase conjugating mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2949~2953  
赵智刚, 崔玲玲, 童立新等. 带固体相位共轭镜的全固态脉冲抽运高重复频率大能量单纵模MOPA激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 2949~2953
- J. Limpert, H. Zellmer, A. Tunnermann. Suppression of higher order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management(GLM)[C]. Proc. of the Advanced Solid-state Lasers Conference, Quebec city Canada, OSA, 2002. 112~114
- A. E. Siegman. Propagating modes in gain-guided optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1617~1628
- Qiang Liu, Xingpeng Yan, Xing Fu *et al.*. 183W TEM<sub>00</sub> mode acoustic-optic Q-switched MOPA laser at 850 kHz [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5636~5644
- Xingpeng Yan, Qiang Liu, Xing Fu *et al.*. Gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> MOPA lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(6): 1286~1290
- Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. Investigation on LD double-end-pumped high power Q-switched YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> fundamental mode solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2409~2414  
赵智刚, 董延涛, 潘孙强等. LD双端抽运YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub>复合晶体的高功率调Q基模固体激光器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2409~2414
- J. A. Fleck, J. R. Morris, E. S. Bliss. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(5): 353~363
- Li Junchang. Information Optic Theory and Calculation [M]. Beijing: Science Press, 2009  
李俊昌. 信息光学理论与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- Jan K. Jabczynski, K. Kozopynski, A. Szczesniak. Thermal lensing and thermal aberration investigations in diode-pumped lasers[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(12): 3572~3578
- W. Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(7): 1412~1423
- Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007  
姚建铨, 徐德刚. 全固体激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Influence of spherical aberration of the thermal lens on the mode profile of a large-volume TEM<sub>00</sub>-mode resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1704~1708  
刘崇, 葛剑虹, 项震等. 热透镜的球差效应对大基模体积激光谐振腔模式的影响[J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1704~1708