

文章编号: 1001-3806(2011)04-0543-04

双侧对称抽运横流液体激光器的光束质量分析

马再如^{1,3}, 魏泳涛², 冯国英³

(1. 西华大学 理学院, 成都 610039; 2. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610064; 3. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 为了提高横流液体激光器的光束质量, 采用 ANSYS 软件分析了双侧抽运液体激光器的液体介质的温度分布, 对不同流速条件下的非稳腔光场分布和光束质量 M^2 因子进行了数值计算。结果表明, 存在一个使光束质量 M^2 因子较优的液体流速, 并针对该类激光系统中增益和折射率梯度分布都关于抽运方向对称分布的特点, 采用柱透镜补偿波前畸变效应, 将光束质量因子由 24 降低到 12.5, 说明柱透镜补偿位相畸变能有效地提高液体输出光束质量。

关键词: 激光光学; 液体激光器; 光束质量 M^2 因子; 数值计算

中图分类号: TN248.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.025

Theoretical analysis of the beam quality of two-side-pumped symmetrically transverse flow liquid lasers

MA Zai-ru^{1,3}, WEI Yong-tao², FENG Guo-ying³

(1. Institute of Applied Physics, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. College of Architecture and Environmental, Sichuan University, Chengdu 610064, China 3. College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to improve the beam quality of a two-side-pumped symmetrically transverse flow continuous liquid laser, the output beam quality M^2 factor and light intensity distribution at different flow velocities were simulated on the condition of the liquid laser pumped symmetrically with two sides diode lasers, the heat distribution in the liquid medium was analyzed by means of ANSYS software. Simulation results show that is an optimum flow velocity for best beam quality. For both the gain and refractive index in the laser system distribute symmetrically with the pumping direction, after compensation for the wavefront error with cylindrical lenses, the M^2 factor was decreased from 24 to 12.5.

Key words: laser optics; liquid laser; beam quality M^2 factor; numerical simulation

引言

介质中的热效应是制约激光器运行在高平均功率状态的巨大障碍^[1-4]。基于液体激光介质在发展高功率激光技术上的诸多优势及近年来激光二极管技术的迅速发展, 高功率液体激光器的研究受到了高度的重视^[3-5]。对单侧抽运的液体激光器而言, 增益和热致折射率分布既不均匀也不对称, 因此, 该类液体激光器的输出光束质量较差^[4]。当前, 人们提出了双侧抽运、斜抽运等工作方式来改善输出光场, 提高其光束质量^[6-10]。

对于高功率激光器而言, 要求其输出光束有较高功率, 同时有高光束质量, 这里采用光束质量 M^2 因子

来表征激光器的输出光束质量。非稳腔的激光器具有大的可控模体积、可控的衍射输出耦合等优点^[11], 在高功率激光器中得到较为广泛的应用, 因此, 作者以工作介质为 $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ 体系的非稳腔的液体激光器为例, 对双侧对称抽运横流液体激光器输出光束质量进行理论分析。

1 物理模型

对于双侧对称抽运横流液体激光器而言, 需要考虑介质中的热分布、增益分布和增益饱和效应等因素对输出光场产生影响, 进而探讨这些因素对光束质量 M^2 因子的影响。

1.1 双侧对称抽运横流液体激光器模型

图 1 是非稳腔的示意图, 其中液体流向、抽运光和光轴分别平行于 x, y 和 z 轴, 腔长为 L , 曲率半径分别为 R_0 和 $R_0 + L$, 凸面镜与凹面镜的口径分别为 $2a_1$ 和 $2a_2$ 。横截面内坐标系如图 2 所示, 坐标原点在液体介质的中心位置。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10976017)

作者简介: 马再如(1972-), 男, 副教授, 主要从事光纤通信和新型激光器设计、分析和制造方面的研究。

E-mail: simzairu@sina.com.cn

收稿日期: 2010-09-16; 收到修改稿日期: 2010-11-29

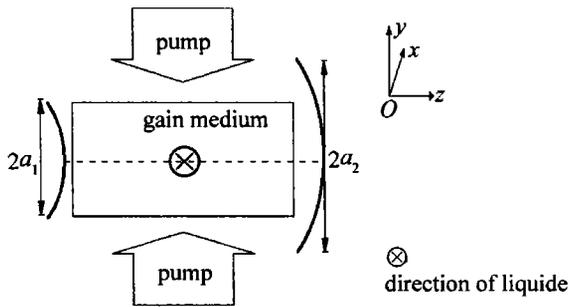


Fig. 1 Sketch of the transverse flow cavity laser system with unstable oscillator cavity

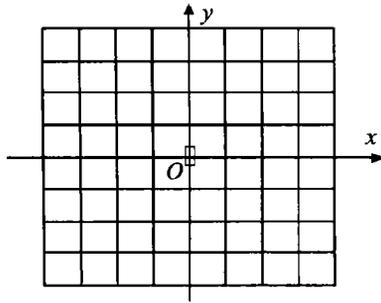


Fig. 2 The reference frame of the transverse

作者采用光束传播算法来分析激光器的本征场,用该方法分析本征场要用到快速傅里叶变换算法,要求输入和输出光波函数的空间取样网格的间距相等。非稳腔中的传播光束为发散波(或汇聚波)时,需采用扩张(或收缩)坐标系使网格间距相等,通常将横截面内的坐标变换为线性空间,其具体变化与步骤见参考文献[11]和参考文献[12]。

1.2 流体介质在双侧对称抽运下的热分布

在石英器皿中流动的 $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ 体系的工作介质,其温度分布服从对流-扩散方程^[13]:

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T_f \right) = \kappa_f \nabla^2 T_f + 2\mu_0 \mathbf{S} : \mathbf{S} + Q_f \quad (1)$$

式中, ρ_f 是流体密度, c_f 为流体的比热容, T_f 为液体温度, \mathbf{u} 为速度矢量, κ_f 为流体的热导率, $\mathbf{S} = 0.5 [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]$ 是应变率张量, Q_f 为流体内的体热源。

在双侧对称平面波抽运的情况下,其体内热源形式为:

$$Q_f = \begin{cases} \eta_{\text{heat}} \alpha I_0 \{ e^{-\beta(d/2-y)} + e^{\beta(d/2-y)} \}, & (nT \leq t \leq nT + \tau) \\ 0, & (nT + \tau \leq t \leq (n+1)T) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $n=0,1,2,\dots$; η_{heat} 为抽运光被介质吸收后转化为热的比例; β 为液体激光介质吸收系数; I_0 为激光二极管抽运输出强度; d 为介质沿 x 方向的长度, $-d/2 < y < d/2$; τ 和 $1/T$ 分别是抽运脉冲脉宽和重复频率^[14]。将流体-固体耦合边界简化为空气对流边界,则有:

$$k_s (\nabla T_s) \cdot \mathbf{n}_s = -h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

式中, k_s 是固体和液体界面的表面传热系数,下标 S 为流体和空气间的边界, \mathbf{n}_s 为指向空气的单位法向矢量, h 为空气的传热系数, T_∞ 为冷却空气的温度。

(1)式和(3)式是非线性的耦合方程组,通常采用数值解法分析液体和界面的温度分布。作者借助 ANSYS 软件来分析流体介质中的热分布。

1.3 激光光场的传播放大模型

研究激光谐振腔的工作很多,这些工作能适应不同的要求^[14-16]。在本文中,由于热梯度的存在,导致增益介质横截面内存在折射率梯度,在液体工作物质温升较小的情况下,其折射率改变量 $\Delta n = \Delta T dn/dT_f$,该项导致光束的位相滞后,在光束传播方程中唯象的引入该项。光场 $E(x,y)$ 在谐振腔中满足方程^[17]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{j}{2k} \nabla_\perp^2 E + \frac{g}{2} E + \frac{\alpha}{2} E - jk \frac{n_2}{n_0} |E|^2 E - jk \frac{\Delta n}{n_0} E \quad (4)$$

式中, k 是介质中的波数, n_2 是克尔系数, n_0 为液体介质折射率, j 是虚数单位。右边第1项 $\nabla_\perp^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 为衍射项,第2、第3项分别为增益和损耗项,第4、第5项分别为克尔效应和热透镜效应项。

在激光器中,克尔效应通常较弱,因此(4)式可简化为:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{j}{2k} \nabla_\perp^2 E + \frac{g + \alpha}{2} E - jk \frac{\Delta n}{n_0} E \quad (5)$$

激光在振荡放大过程中,其增益系数与反转粒子数之间存在关系^[17]:

$$g = \sigma N \quad (6)$$

σ 为粒子受激发射界面, N 为反转粒子数。在稳态条件下,反转粒子数为: $N_e = [\beta I \eta / (h\nu_0)] / [(1/\tau_f) + c\sigma\phi]$ 。其中, ϕ 为谐振腔中的光子通量密度, I, η, τ 和 ν_0 分别为抽运光强度、光谱耦合效率、 Nd^{3+} 上能级荧光寿命和抽运光中心频率。由此可知,在系统未出光时,即 $\phi=0$ 条件下,其上能级粒子数最多,相应地,增益系数最大,该状态下的增益系数为小信号增益系数:

$$g_0 = \sigma \beta I \eta \tau / (h\nu_0) \quad (7)$$

当激光器中由于自发辐射而逐渐产生振荡时,系统中的 $\phi \neq 0$, 反转粒子数就会逐渐下降,相应地,增益也会变小,此时的增益系数称为饱和增益系数:

$$g = \frac{\sigma \beta I \eta \tau / (h\nu_0)}{(1 + c\sigma\phi\tau)} \quad (8)$$

此时,激光器中的光强为 $I = c\phi h\nu$, 并定义饱和光强 $I_s = h\nu / (c\sigma\tau)$, 则饱和增益系数为:

$$g = \frac{g_0}{(1 + I/I_s)} \quad (9)$$

2 数值分析结果

在数值计算中,工作介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ 体系的参量见表 1。非稳腔的结构参量分别为 $a_1 = a_2 =$

Table 1 Parametrics of the medium^[9]

τ_f	$3 \times 10^{-4} \text{ s}$
α	5%
σ	$9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
u	1 m/s ~ 10 m/s
a	3/cm
c_f	$1.302 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
ρ_f	$1.80 \text{ g}/\text{cm}^3$
κ_f	$0.0067 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ	801 nm
η	90%
L	15 cm
d	10 cm
w	10 cm

5 mm,前腔曲率半径 $R_0 = 20 \text{ cm}$,腔长 $L = 15 \text{ cm}$,抽运光为二极管激光,对称分布,沿 y 轴正和负方向,其光强 $I_0 = 600 \text{ W}/\text{cm}^2$,抽运时间 1 ms,抽运周期 10 ms,抽运频率 100 Hz,考虑双侧对称抽运情况。本节中采用软件 ANSYS 进行热分布计算,进而得到液体工作介质的折射率梯度分布,采用光束传输模型,进行迭代数值运算,对稳定分布后的光场进行光束质量 M^2 因子计算。

图 3a、图 4a 和图 5a 中给出了在双侧抽运条件

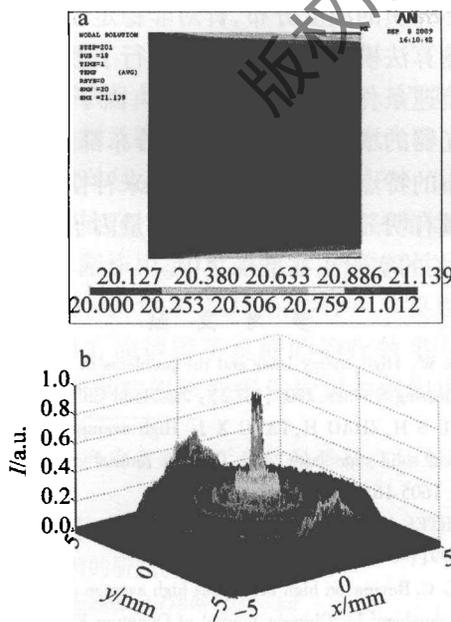


Fig. 3 The temperature distribution calculated by means of ANSYS software and the output laser field under flow velocity $u = 1 \text{ m/s}$

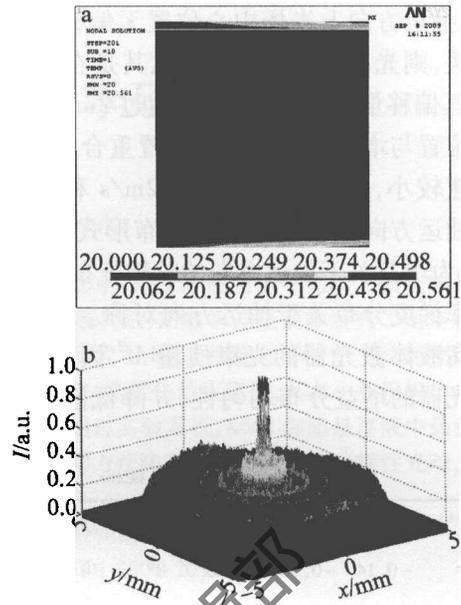


Fig. 4 The temperature distribution calculated by means of ANSYS software and the output laser field under flow velocity $u = 2 \text{ m/s}$

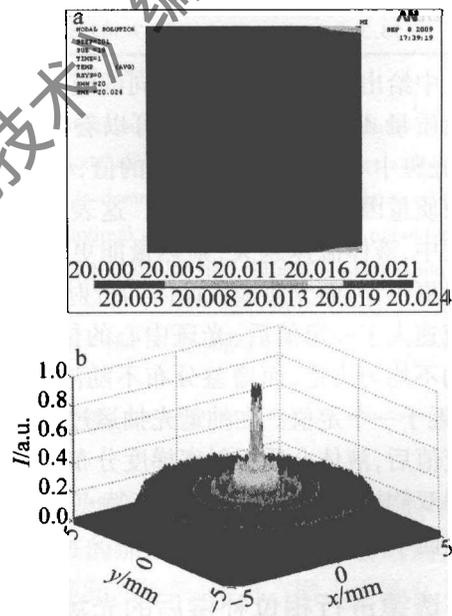


Fig. 5 The temperature distribution calculated by means of ANSYS software and the output laser field under flow velocity $u = 10 \text{ m/s}$

下,液体流速分别为 1 m/s, 2 m/s 和 10 m/s 条件下,液体介质沿液体流动方向(图 3a、图 4a 和图 5a 的左边为液体入口,右边为液体出口)的温度分布。从温度分布可得,液体流速越快,则在增益区中心位置处的温度梯度越小;液体介质边缘温度显著大于其中心部分温度,原因主要在于液体与器壁之间的粘滞效应,使得该部分的液体流速较慢,因而其沉积的热量较多。与单侧抽运的液体温度分布比较,在双侧抽运的情况下,液体温度分布在抽运方向上具有明显的对称性,另外,在液体激光工作介质的中心位置,光学均匀性良好。

图 3b、图 4b 和图 5b 中给出的是相应液体流速情况下的输出光场。从图中可以看出,双侧对称抽运条

件下,在抽运方向上光场中心位置无偏移;另外,液体流速越快,则光场的中心位置(尤其是在液体流速方向上),其偏移量越小,当其流速超过 2m/s 后,光场峰值强度位置与增益介质的中心位置重合,参见表 2;当液体流速较小,如流速分别为 0.2m/s 和 0.5m/s 时,光场在抽运方向上呈现轴对称分布形式,其产生原因有二:一为增益关于抽运方向的对称分布;二为热致液体折射率梯度分布关于抽运方向对称。这表明,要进一步提高液体激光器的光束质量 M^2 因子,需要提高液体激光器的增益分布均匀性,并降低液体折射率梯度分布。

Table 2 Beam quality M^2 factor

$u/(m \cdot s^{-1})$	0.2	0.5	1	2	5	7.5	10
x_{mid}/mm	-0.14	-0.10	-0.08	0	0	0	0
y_{mid}/mm	0	0	0	0	0	0	0
M_x^2	59.80	35.9	23.49	16.59	24.1	24.1	24.1
M_y^2	23.3	32.7	23.5	23.7	23.7	23.7	23.7

表 2 中给出了工作物质在不同的流速下,相应的输出光束质量 M^2 因子。从该表可以看出,随液体流速增大,光斑中心趋近于一个固定的值, x 方向和 y 方向的光束质量因子也趋近于相等。这表明,在抽运光抽运过程中,液体流速越大,则热量能更快地被带走,沉积热量更少,因而介质横截面内的折射率梯度变小;当液体流速大于一定值后,光斑中心的位置主要由增益分布的不均匀决定,而增益分布不随液体流速而改变,故趋近于一个定值。在抽运光抽运过程中,当流速大于一定值后,液体介质折射率梯度分布更均匀,而增益分布因双侧抽运而呈现对称分布特点,因此光斑中心位于腔面中心。

3 用柱透镜进行相位补偿后的光场分布

在采用双侧对称抽运液体激光器中,工作物质温度分布和输出光场在抽运方向上有对称的特点。因此,本节中考虑采用柱透镜进行位相补偿,以提高输出光束质量,降低 M^2 因子。在流速小于一定值时,可以通过增大流速来获得很好的光束质量。但是流速增大到一定的值后,光束质量 M^2 因子改变很小,趋于一个定值。在液体流速较大情况下主要是增益分布的不均匀导致的相位畸变,可以在光路上增加补偿透镜来补偿相位畸变。假定用柱透镜进行相位补偿,其位置靠近前腔镜处。其分布关于抽运方向(即 y 轴)对称,具体形式为 $\delta(x, y) = \exp(-y^2/R_b)$, R_b 为补偿透镜的曲率半径。

图 6 为 $u = 1m/s$ 时,采用曲率半径 $R_b = -4.5m$

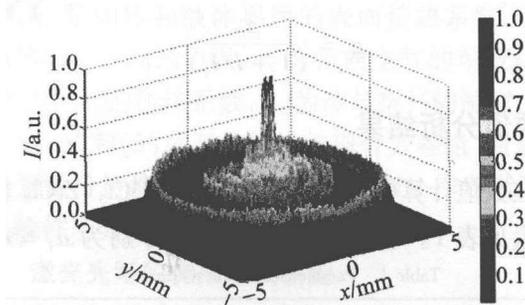


Fig. 6 The output laser field compensated with cylindrical lenses

时柱透镜补偿后的输出光场。从该图可见输出光场具有对称性。表 3 中给出了 $u = 1m/s$ 时,不同曲率半径的柱透镜对光束质量 M^2 因子的改善。

Table 3 Beam quality M^2 factor after phase compensation

R_b/m	x_{mid}/mm	y_{mid}/mm	M_x^2	M_y^2
-4	-0.04	0	16.8	26.8
-4.5	-0.06	0	12.5	25.4
-5.5	-0.05	0	16.9	21.8
-6	-0.05	0	23.1	23.0
-6.5	-0.05	0	25.3	24.2
-7	-0.05	0	25.8	24.9

由表 3 可以知,在 $R_b = -4.5m$ 时,与单侧抽运和双抽运时光束质量相比取得了很大的改善,其光束质量 M^2 因子由补偿前的 24 降低到 12.5。由于腔内温度分布的不均匀,导致的热致折射率梯度分布的不均匀,以及增益分布的不均匀,因此,采用柱透镜难以得到完全的补偿。

4 结论

采用 ANAYS 软件分析了对称抽运横流液体激光器内液体介质的温度分布,针对非稳定腔型结构,采用光束传输算法模型,对输出光场进行了数值求解,考虑在不同流速条件下的光束质量 M^2 因子;并根据该类液体激光器的增益和折射率梯度分布都关于抽运方向对称分布的特点,提出采用柱透镜来补偿波前畸变,其光束质量有明显的改善,其光束质量因子由 24 降低到 12.5,相关的实验正在准备之中。

参考文献

- [1] DU X W. High energy laser and the problems of applied optics[J]. Engineering Science, 2001, 13(2): 21-24 (in Chinese).
- [2] ZHOU S H, ZHAO H, TANG X J. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618 (in Chinese).
- [3] DUARTEF J. High-power dye lasers[M]. New York: Springer-Verlag, 1991: 45-89.
- [4] TANG C. Review on high brightness high average power solid-state laser technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 488-496 (in Chinese).

(下转第 550 页)

3 结论

在氧丰富的组织中,组织中的光动力剂量与光剂量和光敏剂浓度成正比,在氧含量相对缺少的组织中,如果增加光功率密度与光敏剂浓度,那么组织中光漂白也迅速增加,消耗的单线态氧($^1\text{O}_2$)也增加,与肿瘤细胞作用的单线态氧会减少,就不会收到良好的治疗效果,所以在相对缺氧的组织中存在一个最佳的光动力剂量,组织中光动力剂量大于或小于该值都不会收到良好的治疗效果。

用激光照射没有药物的培养液时,光剂量少时没有细胞损伤,光剂量大时引起细胞损伤用激光照射留有光敏药物的培养液时,细胞基本上凋亡;没有激光照射时,光敏剂剂量的变化对细胞存活率没有明显的影响。实验结果表明,细胞的存活率随光动力剂量(光剂量和光敏剂剂量的乘积)的增加而减少,当光动力剂量达到某一个阈值以后,其剂量的增加对细胞损伤的影响逐步减少,说明在 PDT 过程中存在最佳的光动力剂量。

此外,由于光敏剂的剂量过大时不可避免地对人体会有损伤作用,因此,在临床中要尽可能降低光敏剂的药物用量,把握好光敏剂剂量与光剂量的关系。

本次实验结果只是一个初步的结果,虽然在一定

程度上能够验证理论模拟的正确性,但临床中的最佳光动力剂量还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] WANG Sh, RUAN J, HE Q L. Study on photo-damage selectivity in photodynamic therapy[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2):184-186 (in Chinese).
- [2] LI Zh M, ZHANG Zh X. Description of dosage on photodynamic therapy effect[J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5):91-92(in Chinese).
- [3] WANG K K, LUTZKE L, BORKEN H G, *et al.* Photodynamic therapy for Barrett's esophagus: does light still have a role? [J]. *Endoscopy*, 2008, 40(12):1021-1025.
- [4] SVAASAND L O, WYSS P, WYSS M T, *et al.* Dosimetry model for photodynamic therapy with topically administered photosensitizers[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1996, 18(2):139-149.
- [5] DeROSA M C, CRUTCHLEY R J. Photosensitized singlet oxygen and its applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2002, 233/234:351-371.
- [6] DIMOFTE A, ZHU T C, HAHN S M, *et al.* In vivo light dosimetry for motexafin lutetium-mediated PDT of recurrent breast cancer[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2002, 31(5):305-312.
- [7] WANG L H, JACQUES S L, ZHENG L Q. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multilayered tissues[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, 47(2):131-146.
- [8] PATTERSON M S, WILSON B C, GRAF R. In vivo tests of the concept of photodynamic dose in normal rat liver photosensitized by aluminum chlorosulphated phthalocyanine[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1990, 51(3):343-349.

(上接第 546 页)

- [5] REN G G. New tactical high energy liquid laser[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4):418-421 (in Chinese).
- [6] HASSAUN J B. Flowing neodymium offers high-power lasers[J]. *Laser Focus World*, 2004, 40(3):15-20.
- [7] HUANG K. Thermal management with gost flow of high-average-power inorganic liquid laser[D]. Changsha:National University of Defence Technology, 2006:34-38 (in Chinese).
- [8] LI M, XU Z, CHEN X W. Performance simulation of laser diode two-sides-pumped transverse flow continuous liquid laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9):1653-1657 (in Chinese).
- [9] XU Z, SU Y, LI C L. Experimental study on diode pumping inorganic liquid laser output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(12):1941-1943 (in Chinese).
- [10] LI M, XU Z, CHEN X W. Performancason compare of laser diode-pumped liquid laser between single gain host and double gain host [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4):722-725 (in Chinese).
- [11] LI M, SU Y, SONG Y S. Research of multi-segments liquid laser system connected in series[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12):2349-2353 (in Chinese).
- [12] YUAN Y K, XU Z, LI M. Effect of flow field characteristics in liquid laser system on thermally induced distortion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(9):1342-1345 (in Chinese).
- [13] YANG S M. Heat transfer[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing High Education Press, 1987:123-135 (in Chinese).
- [14] LIU J G, LÜ Zh W, WANG Y L, *et al.* A new method to study laser propagation in inhomogeneous medium[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4):441-444 (in Chinese).
- [15] YAN T G, LI Y D, XIAO F X, *et al.* Near-field analysis of misaligned CO₂ laser of two-dimension axisymmetric-fold combination cavity[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4):402-405 (in Chinese).
- [16] HUANG Y, FENG G Y, LI W, *et al.* Matrix expression for 2-D misalignment sensitivity of complex astigmatic resonator[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):460-464 (in Chinese).
- [17] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003:41-43, 176-203 (in Chinese).