

文章编号: 0253-2239(2008)04-0722-04

# 激光二极管抽运单/双增益模块的 液体激光系统性能对比

李 密 许 正 陈兴无 苏 毅 李春领

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 单增益模块的无机液体激光体系在通过流动循环散热时,也导致抽运区域的增益介质在流动方向上产生了热梯度。而双增益模块的液体激光系统既能有效地散热,同时也避免了流动方向的热梯度,具有较好的性能。采用数值计算方法模拟了同样增益长度的单、双增益模块系统的热特性和输出激光的远场光斑分布,并进行了对比分析。结果表明双增益模块液体激光系统的性能明显优于单增益模块系统:远场光斑的峰值强度提高一个数量级,能量集中度和光束质量均得到明显的提高。

**关键词** 激光器;液体激光器;单增益模块;双增益模块;远场光斑;数值模拟

**中图分类号** TN248.3<sup>+</sup>2 **文献标识码** A

## Performance Comparison of Laser Diode-Pumped Liquid Laser between Single Gain Host and Double Gain Host

Li Mi Xu Zheng Chen Xingwu Su Yi Li Chunling

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Flowing circulation can emanate heat of liquid laser with single gain host, but it also arises heat gradient in the flowing direction. Double gain host can emanate heat effectively and avoid heat gradient in flowing direction, and possesses better performance. The heat character and far-field facula of liquid laser with single gain host and double gain host at the same gain length were simulated, and then compared. The result indicates the performance of the double gain host is much better than that of the single gain host: the peak intensity of far-field facular is enhanced by ten times, and the energy concentration extent and beam quality are both enhanced evidently.

**Key words** lasers; liquid laser; single gain host; double gain host; far-field facula; numerical simulation

## 1 引 言

激光二极管(LD)技术的迅速发展为液体激光系统提供了优质的抽运光源,极大地降低了抽运光能变成热量的比率,目前该热量比率可以达到 30% 以下<sup>[1]</sup>。液体激光系统最突出的优点在于它可以采用循环流动的方法以有效地将抽运区域的热量转移,使得热量无法长时间累积,不至于出现很大的温度梯度<sup>[2,3]</sup>。但是这一散热方法却导致单增益的液体激光系统在流动方向出现了热梯度:抽运区域里的增益介质的温度沿着流动方向呈线性增长。因此抽运区域里的增益介质同时存在抽运方向和流动方向的热梯度,使得激光系统的性能下降。双增益模块的液体激光系统采用了两个反向流动的增益区域,二者在流动

方向的温度分布趋势刚好相反,经过叠加以后刚好消除了流动方向的热梯度。因而双增益模块的液体激光系统既能有效地消除热累积,又能避免流动方向的热梯度,激光系统性能预计会得到提高。

本文采用数值方法模拟了双增益模块系统的热分布和远场光斑,并与采用同一谐振腔和同样增益长度的单增益系统进行了对比分析,以选择更合理的实验装置。

## 2 单、双增益模块系统的激光强度分布特性

单增益模块和双增益模块系统的示意图分别为图 1 和图 2,两图的区别在于图 2 中采用了两个等

**收稿日期:** 2007-08-07; **收到修改稿日期:** 2007-10-11

**作者简介:** 李 密(1981-),男,湖南人,硕士研究生,主要从事液体激光系统方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

**导师简介:** 陈兴无(1968-),男,湖南人,研究员,硕士生导师,主要从事激光器技术方面的研究。

E-mail: chenxw@caep.com.net

长度的反向流动的增益区域,且两部分的长度之和刚好等于图 1 的增益长度。

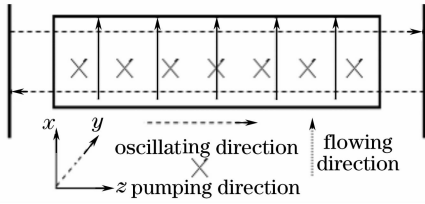


图 1 单增益模块的无机液体激光系统

Fig. 1 Inorganic liquid laser with single gain host

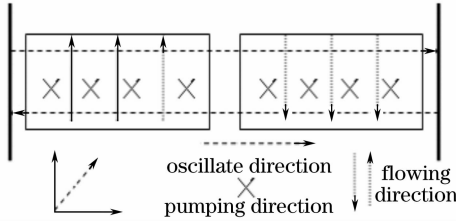


图 2 双增益模块的无机液体激光系统

Fig. 2 Liquid laser with double gain host

假设增益介质的截面尺寸为  $a \times b$  (计算中取  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ), 在采用输出强度均为  $I_0$  的激光二极管 (频率为  $\nu_0$ ) 进行双侧均匀抽运时, 抽运区域里增益介质中的抽运强度的分布满足

$$I(y) = I_0 \times \{ \exp(-\beta y) + \exp[-\beta(b-y)] \}, \quad (1)$$

式中  $\beta$  为增益介质的吸收系数,  $b$  为增益介质在抽运方向的厚度,  $0 \leq y \leq b$ 。

根据  $\text{Nd}^{3+}$  四能级模型, 推导出激光系统的粒子数速率方程和光子密度速率方程<sup>[1,4]</sup>

$$\begin{cases} \partial N / \partial t = \beta I(y) \eta \eta_Q / h\nu_0 - N / \tau_f - c \sigma N \varphi, \\ \partial \varphi / \partial t = c \sigma N \varphi - \varphi / \tau_c + S, \end{cases} \quad (2)$$

其中  $N$  为反转粒子数,  $\varphi$  为光子密度,  $\beta$  为增益介质对抽运光的吸收系数,  $\eta$  为光谱耦合系数,  $\eta_Q$  为量子效率,  $\tau_f$  为荧光寿命,  $\sigma$  为受激发射截面,  $\tau_c$  为光子寿命。

### 2.1 单增益模块系统的输出激光强度分布

对于单增益系统, 在达到阈值之前的粒子数随时间变化的函数关系近似为

$$N(t) = \beta I \eta \eta_Q \tau_f [1 - \exp(-t / \tau_f)] / h\nu_0, \quad (3)$$

式中  $t = x/u$ ,  $u$  为流速。初始段增益介质接受的抽运时间很短而未能达到阈值, 因此单增益模块系统的输出光斑小于抽运区域的面积, 输出激光强度的近场空间分布近似为

$$I_{\text{out}}(x, y) = \frac{1-R}{1+R} \frac{\beta I(y) \eta \eta_Q \eta_s - N_{\text{th}} h\nu / \tau_f}{\sigma N_{\text{th}}} \times U \left\{ x + u \tau_f \ln \left[ 1 - \frac{N_{\text{th}} h\nu_0}{\eta_Q \eta \beta I(y) \tau_f} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中  $R$  为输出镜反射率,  $N_{\text{th}}$  为阈值粒子数,  $\eta_s$  为斯托克斯因子, 各参量值见表 1。

$U(t)$  为阶跃函数:

$$U(t) = \begin{cases} 1 & t > 0, \\ 0 & t < 0. \end{cases}$$

表 1 计算参量列表

Table 1 Parameters of calculation

Fluorescence lifetime $\tau_f / \text{s}$	$3 \times 10^{-4}$
Quanta efficiency $\eta$	95%
Excited emission cross section $\sigma / \text{cm}^2$	$9 \times 10^{-20}$
Dynamic loss coefficient $\alpha / \text{cm}^{-1}$	0.5%
Gain length $l / \text{cm}$	15
Specific heat capacity $C / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})]$	$1.302 \times 10^3$
Liquid density $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.80
Heat transfer coefficient $K / [\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{C})]$	0.00067
Spectrum coupling coefficient $\eta$	$\approx 90\%$
Reflectivity of output mirror $R$	0.47

### 2.2 双增益模块系统的输出激光强度分布

假设激光系统中的两部分增益介质对应的反转粒子数分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 其在整个增益长度上的增益为:  $G = \sigma(N_1 l/2 + N_2 l/2)$ , 相应的等效增益系数为:  $g = \sigma(N_1 + N_2)/2$ 。

由于两部分增益介质的流动方向刚好相反, 假设在同一光轴上两部分液体微元接受抽运光源照射的时间分别为  $t_1$  和  $t_2$ , 可知  $t_1 + t_2 = a/u$ 。阈值时刻之前的  $N_1$  和  $N_2$  分别为

$$\begin{cases} N_1(t) = \beta I \eta \eta_Q \tau_f [1 - \exp(-t_1 / \tau_f)] / h\nu_0, \\ N_2(t) = \beta I \eta \eta_Q \tau_f [1 - \exp(-t_2 / \tau_f)] / h\nu_0. \end{cases} \quad (5)$$

根据(5)式可知, 在  $x=0, x=a$  处两部分增益介质中的反转粒子数之和是最小的 (即增益系数最小), 因此只要能够使得  $x=0, x=a$  时系统达到阈值, 就能保证任意位置均能达到阈值。从而推导出整个增益区域达到阈值所需要最小抽运功率

$$I(y) > \frac{2N_{\text{th}} h\nu_0}{\eta_Q \beta \tau_f [1 - \exp(-a / u \tau_f)]}. \quad (6)$$

在抽运功率超过阈值功率且稳定输出时, 双增益系统的近场激光强度为

$$I_{\text{out}}(x, y) = \frac{1-R}{1+R} \frac{\beta I(y) \eta \eta_Q \eta_s - N_{\text{th}} h\nu / \tau_f}{\sigma N_{\text{th}}}. \quad (7)$$

### 3 单、双增益模块系统的热分布特性

假设激光介质与外界不存在热交换, 则热传导方程为<sup>[5]</sup>

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) + \eta' \beta I(y), \quad (8)$$

式中  $\rho$  为液体密度,  $C$  为比热容,  $K$  为热传导系数,  $\eta'$  为热量与吸收的光能之比。

### 3.1 单增益系统的热分布特性

对单增益系统,求解(8)式并进行近似处理后,得到温度改变量的分布为

$$\Delta T(x, y) = \frac{\beta I_0 \eta' x \{ \exp(-\beta y) + \exp[-\beta(b-y)] \}}{\rho u C}, \quad (9)$$

温度改变会导致折射率的改变( $dn/dT = -5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ ),进而引起光程变化。激光在谐振腔中往返一周时由于温度改变而产生的光程差为

$$\begin{cases} \Delta T_1(x, y) = \beta x I_0 \eta' \{ \exp(-\beta y) + \exp(-\beta(b-y)) \} / \rho u C, \\ \Delta T_2(x, y) = \beta(a-x) I_0 \eta' \{ \exp(-\beta y) + \exp(-\beta(b-y)) \} / \rho u C, \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\Delta T_1(x, y)$ 和 $\Delta T_2(x, y)$ 分别为两部分增益介质的温度改变量。因为两部分增益介质的长度均为 $l/2$ ,则此时激光往返一周光程的改变量为

$$\delta_a(x, y) = l \times \Delta T_1(x, y) \times (dn/dT) + l \times \Delta T_2(x, y) \times (dn/dT). \quad (13)$$

将(12)式代入(13)式得到

$$\delta_a(x, y) = l \times \beta a \eta' I(y) \times \frac{dn/dT}{\rho u C}, \quad (14)$$

将(11)式和(14)式进行数值模拟,分别得到单、双增益系统的波面,如图3和图4所示。

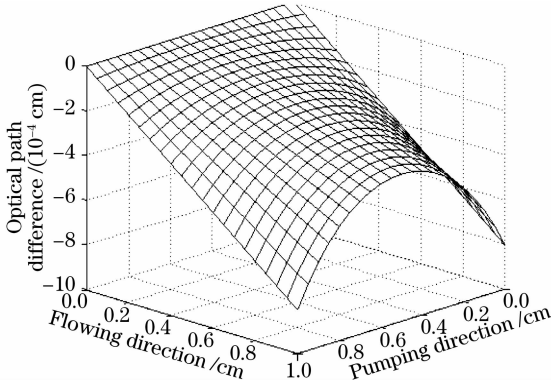


图3 单增益系统的光程差分布

Fig. 3 Optical path difference distribution of single gain host

比较图3和图4可知:单增益系统的光程差分布在抽运方向和流动方向均存在梯度;而双增益系统的光程差分布仅仅在抽运方向存在梯度,而在流动方向没有差异,因此双增益系统的光程差分布均匀性明显优于单增益系统,光束质量很可能得到明显地提高和改善。

为了获得更均匀的光程分布,需要在腔内增加凹透镜以消除热透镜效应。根据单增益模块系统和双增益模块系统的光程差分布特性需要选择不同的凹透镜,其厚度函数为

单增益模块补偿透镜:

$$\delta_s(x, y) = 2l \times \Delta T(x, y) \times (dn/dT), \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式得到

$$\delta_s(x, y) = 2l \times \beta x \eta' I(y) \times (dn/dT) / \rho u C. \quad (11)$$

### 3.2 双增益系统的热分布特性

双增益系统中两部分增益介质的温度变化不同,求解热传导方程并进行近似处理后得到各自的光程差分布为

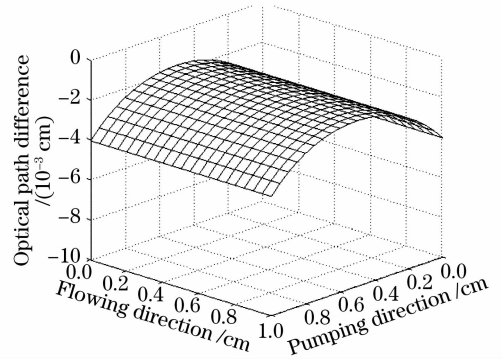


图4 双增益系统的光程差分布

Fig. 4 Optical path difference distribution of double gain host

$$d(x, y) = (a-x)(y-b/2)^2/r, \quad (15)$$

双增益模块补偿透镜:

$$d(x, y) = (y-b/2)^2/r, \quad (16)$$

式中 $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, r$ 为凹透镜曲率半径的绝对值。在谐振腔内往返一周时补偿透镜引起的光程差函数正好为其厚度函数的2倍。

将(11)式和与(15)式叠加得到单增益系统光程差分布函数

$$\delta_s(x, y) = 2l \times \beta x \eta' I(y) \times \frac{dn/dT}{\rho u C} + 2 \times (a-x)(y-b/2)^2/r, \quad (17)$$

将(14)式和与(16)式叠加得到双增益系统光程差分布函数

$$\delta_a(x, y) = l \times \beta a \eta' I(y) \times \frac{dn/dT}{\rho u C} + 2 \times (y-b/2)^2/r, \quad (18)$$

根据(17)式和(18)式表示的  $\delta_s(x, y)$  和  $\delta_d(x, y)$  分布函数均方根误差最小的原则(MSE 准则),求得补偿透镜的最佳曲率半径  $r_b$ ,然后代入(17)式和(18)式得到补偿后的光程差函数。

#### 4 单、双增益模块系统的远场光斑

如果已知激光的近场强度函数  $I(x_0, y_0)$  和最佳补偿后的光程分布函数  $\delta(x_0, y_0)$ ,则根据夫琅禾费衍射理论可以计算得到远场光斑的场分布函数和强度分布函数<sup>[6~8]</sup>

$$A(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z}\right) \times \iint_s \sqrt{I(x_0, y_0)} \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \delta(x_0, y_0)\right] \times \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0, \quad (19)$$

$$I_F(x, y) = |A(x, y)|^2, \quad (20)$$

根据近场强度函数和波面函数,模拟得到单、双增益系统的补偿后的远场光斑相对强度的分布(其中  $\beta=3/\text{cm}$ ,  $I_0=400\text{ W/cm}^2$ ,  $u=20\text{ m/s}$ ,  $l=15\text{ cm}$ ),如图 5、图 6 所示。

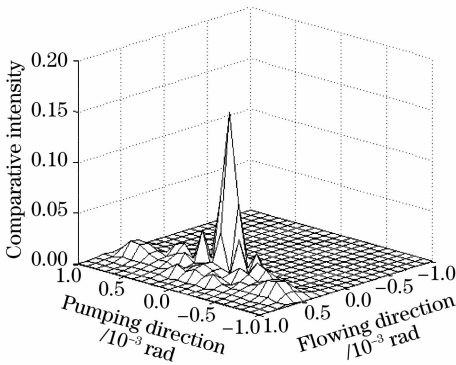


图 5 单增益系统的远场光斑

Fig. 5 Far-field facula of single gain host

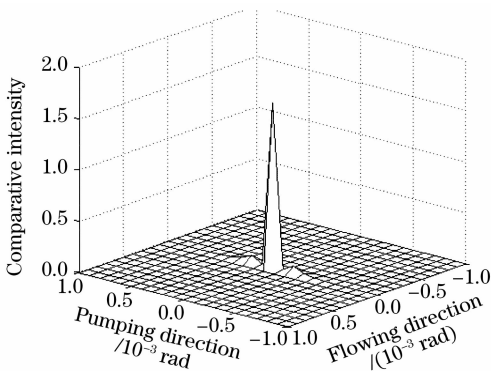


图 6 双增益系统的远场光斑

Fig. 6 Far-field facula of double gain host

由于双增益模块液体激光系统的波面分布更均匀、起伏更小,因此在同样条件下,双增益模块系统的远场光斑峰值强度大约是单增益系统的远场峰值强度的十倍,且能量集中度更高,相应地光束质量也明显提高。

#### 5 结 论

模拟结果表明:双增益系统的远场峰值强度大约比单增益系统远场的峰值强度高一个数量级,而且能量集中度更高,光束质量相应的更优。因此,双增益模块的液体激光系统的性能明显优于单增益模块的液体激光系统,很有潜力发展成为高功率、高光束质量和高重复频率的高能激光系统,具有较好发展前景。

#### 参 考 文 献

- 1 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. 2nd edition, Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: Science Press, 2003. 5~356  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第二版, 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2003. 5~356
- 2 Brian J. Comaskey, Walnut Creek, Eral R. Ault *et al.*. High average power laser gain medium with low optical distortion using transverse flowing liquid host [P]. United States Patent Application Publication, US 2003/0206568A1, 2003. 65~68
- 3 Xu Zheng, Su Yi, Li Chunling *et al.*. Experimental study on diode pumping inorganic liquid laser output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12): 1941~1943  
许正, 苏毅, 李春领等. 二极管抽运无机液体激光器出光实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(12): 1941~1943
- 4 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd: YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581  
张强, 姚建铨, 温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd: YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- 5 Zhen Qiguang, Gu Jianhui. *The Effect Between Laser and Material* [M]. 1st edition, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. 25~27  
郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用[M]. 第一版, 武汉: 华中理工大学出版社, 1996. 25~27
- 6 Su Yi, Wan Min. *High Energy Laser System* [M]. 1st edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 22~25  
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 第1版, 北京: 国防工业出版社, 2004. 22~25
- 7 Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performance simulation of laser diode two-sides-pumped transverse flow continuous liquid laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1653~1657  
李密, 许正, 陈兴无等. 二极管双侧抽运横流连续液体激光系统性能模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1653~1657
- 8 Hongzhan Liu, Ruisheng Liang, Xuguang Huang. Study on the approximate formula for the far-field of a Gaussian beam under circular aperture diffraction and its divergence [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 4~7