

文章编号: 0253-2239(2008)12-2349-05

# 多增益段串接的液体激光系统特性研究

李 密 苏 毅 宋影松 许 正

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 液体激光系统在抑制热畸变方面具有突出优势,能实现长时间稳定的高能激光输出。在液体激光系统中,常规双侧抽运的激光增益分布呈现边缘很强、中间较弱的特点,难以获得单横模激光输出,限制了光束质量。介绍了一种多增益段串接的液体激光系统,其抽运方式介于侧面抽运和端面抽运之间,然后对其增益分布和激光能量传输效率进行了数值模拟。数值模拟表明多增益段串接的液体激光系统能产生近似于高斯型增益分布,激光光束质量很高;同时该多增益段串接的液体激光系统的腔内传输损耗较小,激光能量转换效率可达 30% 以上。

**关键词** 激光器; 液体激光; 多增益段串接; 增益分布; 光束质量

**中图分类号** TN248.3<sup>+</sup>2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2349

## Research of Multi-Segments Liquid Laser System Connected in Series

Li Mi Su Yi Song Yingsong Xu Zheng

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

**Abstract** Liquid laser system has prominent predominance in restraining heat distortion and can achieve stable high-power laser output in long time. In liquid laser system, the gain distribution by ordinary two-sides-pumping has the characteristic of strong gain at the edge but weak at the center and it is very difficult to achieve single transverse mode output. A kind of multi-segments liquid laser system connected in series, with pumping mode between side-pumping and end-pumping is introduced, and the gain distribution and the transmission loss in the resonator are simulated. The simulated results show that the multi-segments liquid laser system connected in series can achieve approximate Gaussian gain distribution, the laser beam quality is very excellent, the transmission loss is little and the laser energy transmission efficiency is higher than 30%.

**Key words** lasers; liquid laser; multi-segments connected in series; gain distribution; beam quality

## 1 引 言

液体激光系统可通过液体增益介质的横向快速循环流动以有效地抑制热累积,实现长时间稳定的高能激光输出<sup>[1]</sup>,并且在采用反方向双增益模块设计后可以有效消除流动方向上的热梯度,显著地提高激光光束质量<sup>[2]</sup>。液体激光技术发展前景光明,但是由于常规的双侧相对抽运方式的限制,其增益分布在抽运方向上呈现边缘很强而中央较弱的特点,容易产生高阶模振荡,极大地减少了基模的比例,激光光束质量受到严重的限制。

目前常见的抽运方式有侧面抽运和端面抽运。端面抽运能产生较均匀的增益分布,热畸变较小,光束质量较好,但是难以实现高功率激光输出;侧面抽运可以获得很高的激光能量输出,但是增益分布很不理想,光束质量较差,特别是在液体激光器和板条

激光器中仅仅采用双侧相对抽运时热畸变更为严重<sup>[3-5]</sup>。本文介绍了一种多增益段串接的液体激光系统,其抽运方式介于端面抽运和侧面抽运之间,从理论上分析和模拟了多增益段串接的液体激光系统的增益分布、热畸变效应和激光能量传输效率,数值模拟结果表明多增益段串接的液体激光系统能够明显地提高激光光束质量,并且具有较高的激光传输效率。

## 2 增益分布

多增益段串接的液体激光系统横截面示意图如图 1 所示,图中一系列平行四边形为液体通道的横截面,液体密封于石英晶体内部。假设液体流动方向为  $x$  轴,抽运方向为  $y$  轴,激光方向为  $z$  轴,即三个方向相互垂直。液体通道成对出现(图中仅标出

收稿日期: 2008-03-21; 收到修改稿日期: 2008-06-17

作者简介: 李 密(1981-),男,硕士,主要从事激光技术及应用等方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

4 个液体流道,实际设计中可以根据需要增加通道数目),并且相邻两个液体通道流动方向相反(例如  $N_1$  流道中液体流动方向为  $x$  轴正方向,则  $N_2$  流道

中液体流动方向为  $x$  轴负方向,依此类推),则可以很好地消除因为液体流动形成的热梯度,减小输出激光的波前畸变。

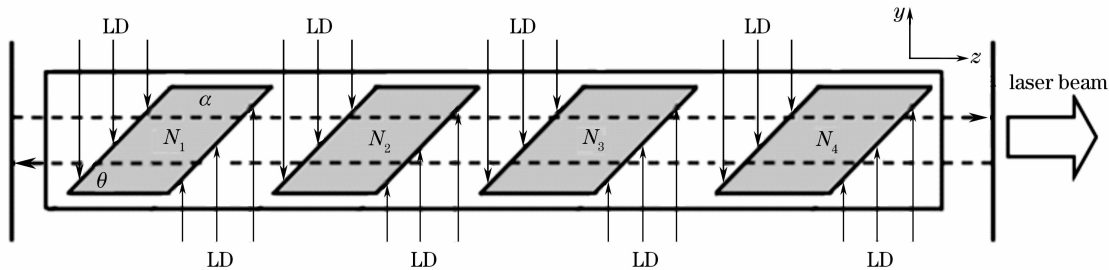


图 1 多增益段串接的液体激光器结构示意图

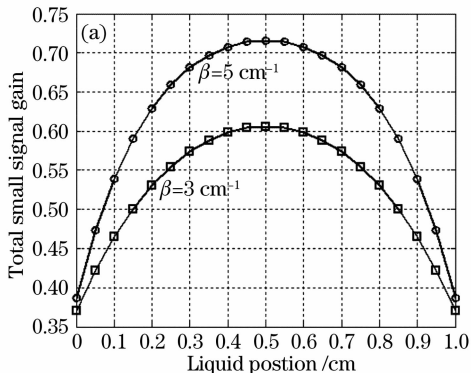
Fig.1 Configuration sketch map of multi-segment liquid laser connected in series

激光增益物质为  $Nd^{3+} : POCl_3 : ZrCl_4$  溶液,其激光发射波长为 1053 nm,抽运光源为激光二极管阵列(输出中心波长为 801 nm),抽运面为液体通道的斜面。由于抽运面与激光发射面重合,而抽运方向与激光方向垂直,此抽运方式介于通常的侧面抽运和端抽运之间,可称为“斜抽运”。激光二极管输出光束有一定的发散角,经微型柱透镜调整后近似为均匀平行光束。

已知激光二极管输出强度为  $I_0$ ,液体通道斜边与底面夹角  $\theta = 45^\circ$ ,底边长度  $a = 1$  cm,高度  $b = 1$  cm,液体通道为 20 个,由于所有通道参数一致,只需分析其中一个通道的增益分布就可得到总增益分布。已知液体介质的吸收系数为  $\beta$ ,则液体内抽运强度分布为

$$I(y, z) = \begin{cases} I_0 \exp[-\beta(z - y)], & 0 < z < a, 0 < y < z \\ I_0 \exp[-\beta(a - z + y)], & a < z < 2a, z - a < y < a \end{cases} \quad (1)$$

根据粒子数速率方程可以得到小信号增益系数与抽运强度的关系:



$$g_0(y, z) = \frac{\sigma \beta \eta \tau}{h \nu_0} I(y, z), \quad (2)$$

其中  $\sigma$  为受激发射截面,  $\eta$  为抽运光源与液体吸收光谱耦合效率,  $\tau$  为  $Nd^{3+}$  上能级的荧光寿命,  $\nu_0$  为抽运光源中心频率。根据小信号增益系数得到总的小信号增益分布函数:

$$G_0(y) = 20 \times \int_y^{y+a} g_0(y, z) dz. \quad (3)$$

将(1)式、(2)式代入(3)式得

$$G_0(y) = 20 \times \frac{\sigma \eta \tau I_0}{h \nu_0} [2 - \exp(\beta y - \beta a) - \exp(-\beta y)]. \quad (4)$$

在同样的抽运强度和增益长度时,若液体通道的横截面为矩形  $a \times b$ ,则此时为常规的双侧相对均匀抽运,根据上述分析方法得到此时总的小信号增益分布函数为

$$H_0(y) = 20 \times \frac{\sigma \eta \beta a \tau I_0}{h \nu_0} [\exp(\beta y - \beta a) + \exp(-\beta y)]. \quad (5)$$

已知  $\sigma = 9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\eta = 0.9$ ,  $\tau = 300 \mu\text{s}$ ,若  $I_0 = 200 \text{ W/cm}^2$ ,  $\beta = 3 \text{ cm}^{-1}$  和  $5 \text{ cm}^{-1}$ ,根据总的小

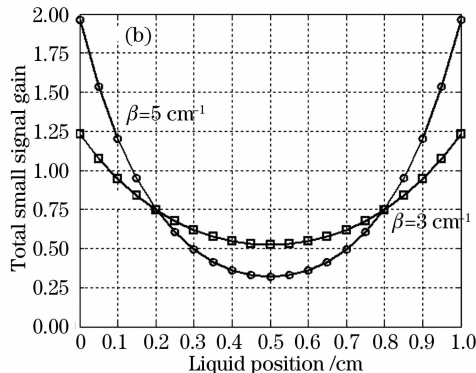


图 2 “斜抽运”(a)和常规侧抽运(b)时总的小信号增益分布曲线

Fig.2 Small signal gain with acclivitous-pumping (a), ordinary side-pumping (b)

信号增益分布函数(4)式和(5)式可分别得到“斜抽运”时总的小信号增益分布曲线和常规的双侧抽运时总的小信号增益分布曲线,如图2所示。

根据图2可知,常规双侧抽运时增益分布呈现边缘很强、中间很弱的特征;如果在多增益段串接的液体激光器中采用“斜抽运”方式,则激光增益分布具有中间略高、边缘稍弱的特征,近似于高斯型增益分布。由于高阶模比基模的束腰宽,因此基模能量主要集中于谐振腔的中部,而边缘则主要是高阶模,故在本文描述的多增益段串接的液体激光系统中采用“斜抽运”方式有利于提高基模输出的能量,便于在腔内限孔以获得更好的光束质量。

### 3 光束质量

在抽运过程中,液体介质吸收的部分抽运能量转化为热量,产生波前热畸变,引起激光光束质量的下降<sup>[3~6]</sup>。由于相邻的通道中液体流动方向相反,因此在 $x$ 轴上任意确定位置处两组液体受到抽运的时间之和是确定的,然后根据抽运光强度分布可以计算出采用“斜抽运”和常规侧抽运时液体激光系统的波前光程畸变量,分别为

$$\varphi_1(x, y) = 10 \frac{dn}{dT} \frac{cI_0 \eta_r}{uC\rho} [2 - \exp(\beta y - \beta x) - \exp(-\beta y)] \quad (6)$$

$$\varphi_2(x, y) = 10 \frac{dn}{dT} \frac{cI_0 \eta_r}{uC\rho} \beta a [\exp(\beta y - \beta x) + \exp(-\beta y)] \quad (7)$$

式中 $dn/dT(-5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C})$ 是液体折射率随温度的变化函数, $c$ 为抽运区域内液体在 $x$ 轴上的长度, $C$ 为液体的比热容, $u$ 为液体的流速, $\rho$ 为液体的密度, $\eta_r$ 为热量的比例。

已知 $u=10$  m/s, $c=1$  cm, $C=1.3$  J/(g·°C), $\rho=1.8$  g/cm<sup>3</sup>, $\eta_r=0.2$ ,激光二极管输出强度 $200$  W/cm<sup>2</sup>,液体吸收系数为 $5$  /cm,根据(6)式和(7)式得到“斜抽运”和常规侧抽运时的波前均方根误差分别为 $0.21$   $\mu\text{m}$ 和 $1.03$   $\mu\text{m}$ 。波前畸变会引起光束质量下降,因此在谐振腔内各自加入焦距为 $f_1$ 和 $f_2$ (以凸透镜的焦距为正数)的热补偿柱透镜,从而可知

$$\varphi'_1(x, y) = \varphi_1(x, y) - (y - a/2)^2 / 2f_1 \quad (8)$$

$$\varphi'_2(x, y) = \varphi_2(x, y) - (y - a/2)^2 / 2f_2 \quad (9)$$

根据波前均方根误差最小的原则分别得到最佳焦距 $f_1=18.5$  m, $f_2=-3.7$  m,此时二者的波前均方根误差分别为 $0.024$   $\mu\text{m}$ 和 $0.120$   $\mu\text{m}$ ,可见热补

偿透镜明显减小了热畸变。

激光光束质量可以用光束质量因子 $\beta'$ ,环围功率比PIB,斯特列尔比 $R_s$ 和 $M^2$ 因子等来衡量<sup>[7]</sup>。如果以 $R_s$ 值来衡量激光光束质量,则根据 $R_s$ 与波前均方根误差 $\sigma_e$ 的关系式:

$$R_s = \exp[-(2\pi\sigma_e/\lambda)^2] \quad (10)$$

可知经过热补偿后,“斜抽运”和常规侧抽运对应的 $R_s$ 值分别为 $0.98$ 和 $0.60$ (基模高斯光束的 $R_s$ 值为 $1$ )。因此在多增益段串接的液体激光系统中采用“斜抽运”方式能够明显提高光束质量,在插入合适的热补偿透镜以后其光束质量能够接近衍射极限。

### 4 传输损耗

由于多增益段串接设计存在较多的界面,可能会存在较大的传输损耗。激光谐振腔的损耗决定了激光工作的阈值,其中一部分损耗转化为有效的激光输出,如果增益物质与石英界面的传输损耗过大,则会在界面上造成比较严重的热沉积和热畸变,导致光束质量和输出功率下降。由于每个液体通道与石英晶体均有两个接触界面,此外还有石英晶体与空气间的两个界面,因此必须认真考虑众多界面累积后的传输损耗。若激光从液体介质(折射率为 $n_1$ )以入射角 $\theta_1$ 入射到石英晶体(折射率为 $n_2$ ),折射角为 $\theta_2$ ,根据折射定律可知

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (11)$$

根据电磁波在界面上的边界条件可以求得入射波、反射波和折射波的振幅关系,然后根据反射波与入射波能流密度的比值关系求得激光单次经过固-液界面的传输损耗为<sup>[8]</sup>

$$\delta_{\perp} = 1 - \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)^2} \quad (12)$$

$$\delta_{\parallel} = 1 - \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)^2 \cos(\theta_1 - \theta_2)^2} \quad (13)$$

式中 $\delta_{\perp}$ 表示激光的电场分量与入射面垂直时的传输损耗, $\delta_{\parallel}$ 表示激光的电场分量与入射面平行时的传输损耗,根据(12)式和(13)式可知前一种情况的传输损耗较大。激光的电场分量可以分解为平行与垂直于入射面的分量叠加,故在固-液界面的单次传输损耗不会超过(12)式对应的传输损耗,现在以(12)式来计算激光单次传输损耗。

已知 $1053$  nm激光在液体和石英中的折射率分别为 $n_1=1.49$ 和 $n_2=1.46$ ,并且入射角为 $\theta_1=$

45°(激光与液体底面平行),则折射角  $\theta_2 = 46.2^\circ$ ,由(12)式知  $\delta_{\perp} = 0.04\%$ ,已知固体-液体界面共有  $20 \times 2$  处,则激光在增益区域内部的单程传输损耗  $\delta_1 = 1.6\%$ 。

液体增益介质对 1053 nm 波长激光的吸收损耗系数为  $0.05\%/cm$ ,液体介质单程总长度为 20 cm,因此激光在液体中的吸收损耗: $\delta_2 = 1.0\%$ 。此外石英晶体与空气界面也存在传输损耗,如果在石英晶体表面很好地镀上 1053 nm 波长激光的增透膜,则可以忽略此两个界面的传输损耗。综合上述传输损耗,得到激光在谐振腔内总的单程损耗  $\delta_i = \delta_1 + \delta_2 = 2.6\%$ 。

## 5 光-光转换效率

根据能量守恒定律,液体吸收的抽运能量用于维持荧光发射、腔内传输损耗和激光发射,其中荧光发射能量包含抽运区内液体介质和离开抽运区液体介质的荧光发射,而在谐振腔内传输损耗的能量与激光发射能量之比就是它们的损耗系数之比。

若输出耦合镜的反射率为  $R$ ,在获得稳定输出时,液体介质内反转粒子数的平均密度为  $N_{th} = (2\delta_i - \ln R)/40a\sigma$ 。已知液体流速为  $u$ ,流道截面积为  $a \times b$ ,抽运区在  $x$  轴上的长度  $c = 1$  cm,则抽运区内液体总体积为  $abc$ ,时间  $t$  以内流过抽运区的体积为  $abut$ ,刚刚离开抽运区的液体介质反转粒子数密度为  $2N_{th}$ ,因此在时间  $t$  以内产生的荧光数目为

$$N_1 = 20(abut \times 2N_{th} + abctN_{th}/\tau). \quad (14)$$

液体介质吸收的抽运能量占抽运总能量的比例为  $\eta_1 = 1 - [1 - \exp(-\beta a)]/\beta a$ ,即液体吸收的能量  $20 \times 2ac\eta_1 I_0 t$ ,可以将  $20 \times 2ac\eta_1 \eta I_0 t/h\nu_0$  粒子抽运到激发态。已知谐振腔内往返传输损耗为  $2\delta_i$ ,激光输出损耗为  $-\ln R$ ,则激光能量占传输损耗与激光输出总和的比例为

$$\gamma = -\ln R / (2\delta_i - \ln R). \quad (15)$$

已知激光发射频率为  $\nu$ ,则  $t$  时间以内的激光输出能量为

$$E_{out} = \gamma h\nu [20 \times 2ac\eta_1 \eta I_0 t/h\nu_0 - 20(abut \times 2N_{th} + abctN_{th}/\tau)]. \quad (16)$$

已知  $t$  时间以内的抽运能量为  $20 \times 2acI_0 t$ ,则激光能量与抽运能量之比即为光-光转换效率:

$$k = \gamma h\nu \left( \frac{\eta_1 \eta}{h\nu_0} - \frac{bN_{th}}{2I_0 \tau} - \frac{ubN_{th}}{cI_0} \right). \quad (17)$$

根据(17)式可知,流速  $u$  上升会使光-光转换效率下降,激光二极管输出强度  $I_0$  上升会使光-光转

换效率提高。若  $\beta = 5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $u = 10 \text{ m/s}$ ,根据(17)式以  $I_0$  为参变量得光-光转换效率随输出反射率  $R$  变化的曲线,如图 4 所示。根据图 4 可知当  $I_0 = 200 \text{ W/cm}^2$ ,  $R = 85\%$  时,光-光转换效率可达  $30\%$ ;当  $I_0 = 400 \text{ W/cm}^2$ ,  $R = 80\%$  时,光-光转换效率可达  $35\%$  以上。因此,多增益段串接的液体激光系统具有较高的光-光效率,在抽运光功率足够高时可实现高功率激光输出。

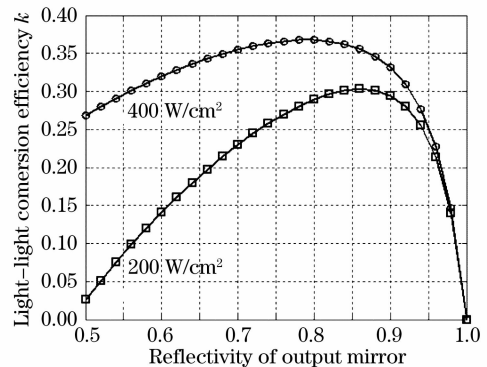


图 3 多增益段串接的液体激光系统的光-光转换效率  
Fig. 3 Light-light conversion efficiency of multi-segments liquid laser connected in series

## 6 结 论

介绍了一种多增益段串接的液体激光系统,并对该激光系统的增益分布、波前畸变、传输损耗和光-光转换效率进行了理论分析和数值模拟。结果表明,在多增益段串接的液体激光系统中采用“斜抽运”方式后,其波前畸变明显减小,如果加入合适的热补偿透镜则有可能实现近衍射极限的稳定激光输出。同时该多增益段串接的液体激光系统传输损耗较低,光-光转换效率可达  $30\%$  以上。因此采用“斜抽运”的多增益段串接的液体激光系统可能是获得高光束质量和高功率激光输出的有效技术途径。

## 参 考 文 献

- 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
- Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performances compare of laser diode-pumped liquid laser between single gain host and double gain host[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 722~725  
李 密,许 正,陈兴无等. 二极管抽运单/双增益模块液体激光系统性能对比[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 722~725
- Li Jindong, Guo Mingxiu, Fu Wenqiang *et al.*. Thermal distortion influence on single-slab heat capacity laser output[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 45~49  
李劲东,郭明秀,付文强等. 热畸变对单板条热容激光器输出的

- 影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 45~49
- 4 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Kilowatt class laser diodes-pumped solid state heat capacity laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 153~156
- 蔡 震, 胡 浩, 蒋建锋等. 千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(2): 153~156
- 5 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang *et al.*. Kilowatt laser diode-pumped solid-state heat capacity slab laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 280~286
- 郭明秀, 李劲东, 付文强等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 280~286
- 6 Shenjin Zhang, Shouhuan Zhou, Xiaojun Tang *et al.*. Investigation of laser diode face-pumped high average power heat capacity laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 658~660
- 7 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 327~332
- 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, **A24**(4): 327~332
- 8 Guo Shuohong. *Electrodynamics* [M]. 2<sup>nd</sup>, Beijing: Higher Education Press, 1995. 143~150
- 郭硕鸿. 电动力学[M]. 第二版, 北京: 高等教育出版社, 1995. 143~150

## 2008 年度“大珩杯”《光学学报》优秀论文名单

论 文 题 名	作 者	发表时间
采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器	周 军; 楼祺洪; 朱健强 等	2006
光纤型光学相干层析成像系统的研制	俞晓峰; 丁志华; 陈宇恒等	2006
基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术	尉迟亮; 顾济华; 刘 薇等	2006
基于二代 curvelet 变换的图像融合研究	李晖晖; 郭 雷; 刘 航	2006
部分抽运的板条激光器的热效应分析	程小劲; 牛金富; 徐剑秋	2006
激光二极管端面抽运 Nd:YVO <sub>4</sub> 实现 1386nm 连续波激光输出	李海峰; 周 睿; 赵 璞等	2006
基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪	陈全胜; 赵杰文; 张海东等	2006
两根大芯双包层光纤激光器获得 60W 相干输出	何 兵; 楼祺洪; 周 军等	2006
基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法	王泽锋; 罗洪; 熊水东等	2007
高精度数字图像相关测量系统及其技术研究	杨 勇; 王琰蕾; 李 明等	2006