

文章编号: 0253-2239(2007)09-1653-5

二极管双侧抽运横流连续液体激光系统性能模拟

李 密 许 正 陈兴无 李春领 苏 毅

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为解决无机液体激光系统的热效应问题, 采用激光二极管双侧抽运横向流动的 $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ 溶液以很好地减小热效应, 实现液体激光系统高功率高光束质量输出。建立了液体激光理论模型, 分析了工作参量对系统能量转换效率与介质热效应的影响; 模拟了系统在不同吸收系数和不同流速下的能量转换效率, 远场光斑分布以及激光束亮度分布。模拟结果表明: 采用二极管作为抽运源可以获得很高的能量转换效率, 而且光束质量较好; 在给定抽运体积和抽运强度为 800 W/cm^2 时, 介质的吸收系数位于 $2.5\sim 3.0 \text{ cm}^{-1}$, 流速约为 25 m/s 时, 输出功率与光束质量实现最佳匹配, 激光束亮度最高, 系统性能达到最佳。

关键词: 激光技术; 液体激光器; 激光二极管; 激光束亮度

中图分类号: TN248.3⁺2 文献标识码: A

Performance Simulation of Laser Diode Two-Sides-Pumped Transverse Flow Continuous Liquid Laser

Li Mi Xu Zheng Chen Xingwu Li Chunling Su Yi

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

Abstract: The laser diode (LD) two-sides-pumped transverse flow $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ solution is adopted to eliminate the thermal effects in an inorganic liquid laser system. The theoretical model for a liquid laser is established, the influence of working parameters on the energy conversion efficiency and medium thermal effect is analyzed, and the energy conversion efficiency, the far field intensity and the laser beam luminance distributions at different absorbing coefficient and different velocity of flow are simulated. The simulation shows that the energy-conversion efficiency is very high and the light beam quality is excellent with a laser diode pump source. The output power and laser beam quality match best and the laser beam luminance reaches a peak value when the absorbing coefficient is about $2.5\sim 3.0 \text{ cm}^{-1}$, the velocity of flow is about 25 m/s and the unilateral pump intensity is 800 W/cm^2 at a determined pumping volume.

Key words: laser technology; liquid laser; laser diode; laser beam luminance

1 引 言

20 世纪 60~70 年代国内外对掺 Nd^{3+} 无机液体激光技术进行了大量的研究^[1], 当时均采用闪光灯作为抽运源, 由于闪光灯发射光谱很宽, 而液体介质只在几个特定波长区域内对光源产生强烈而有效的吸收, 因此系统的能量转换效率很低。另外, 当时该类液体介质均选用轴向流工作方式, 且流速很低, 液体吸收的热量不能被迅速带走, 故在液体里形成很大的温度梯度, 光束质量不高。2003 年, 美国利

弗莫尔(Livermore)实验室报导了采用激光二极管抽运掺 Nd^{3+} 无机液体激光系统^[2]。由于二极管输出谱线宽度很窄(约几个 nm)且可调, 可实现光源与液体介质吸收光谱的高效耦合; 同时, 将介质的循环方式改为横向流, 相比轴向流, 横向流可以使得液体介质迅速流经抽运区域, 降低抽运区域里的温度梯度。因此采用激光二极管抽运横向流液体激光系统能够得到更高的能量转换效率, 同时提高光束质量, 从而改善激光系统性能。

本文选择二极管双侧抽运横向流动的液体激光体系,分析了介质吸收系数和介质流速对激光系统性能的影响,通过数值模拟寻找出使系统性能达到最佳参量的条件,为开展实验研究提供依据。

2 液体激光系统理论模型

液体激光系统的工作示意图如图 1 和图 2 所示。图 1 表示轴向流系统:液体在抽运区域的流动方向与激光光轴的方向一致;图 2 表示横向流系统:抽运方向,液体流动方向和激光光轴三者相互垂直。横向流的流速比轴向流高得多,具有更高的循环效率,故选择横向流循环方式。图 2 中定义液体流动方向为 X 轴,抽运方向为 Y 轴,激光光轴为 Z 轴,图 2 中抽运区域里面液体体积为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 15\text{ cm}$,单侧抽运功率密度设定为 800 W/cm^2 。

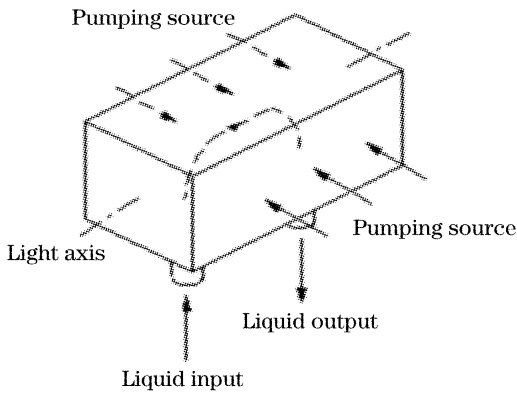


图 1 轴向流系统示意图

Fig. 1 Sketch map of axial flow system

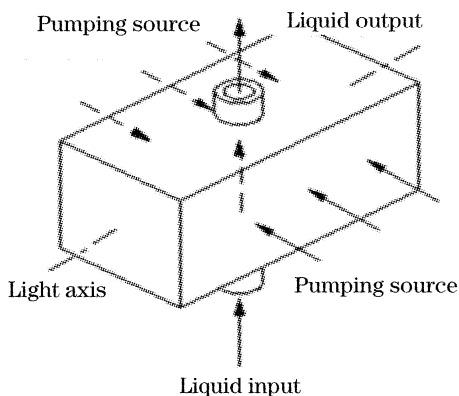


图 2 横向流系统示意图

Fig. 2 Sketch map of transverse flow system

液体激光工作介质为 $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ 溶液,其吸收谱线如图 3 所示。从吸收谱线可知吸收峰为 801 nm ,故可采用该波长的激光二极管面阵作为抽运源。根据玻尔兹曼热分布:热平衡状态位于下能级的粒子数与基能级的粒子数比为 $\exp(-\Delta E/kT)$,位于激光下能级的粒子数仅为基能级粒子数的 10^{-7} 量级^[3],同时下能级向基能级的无辐射跃迁非常迅

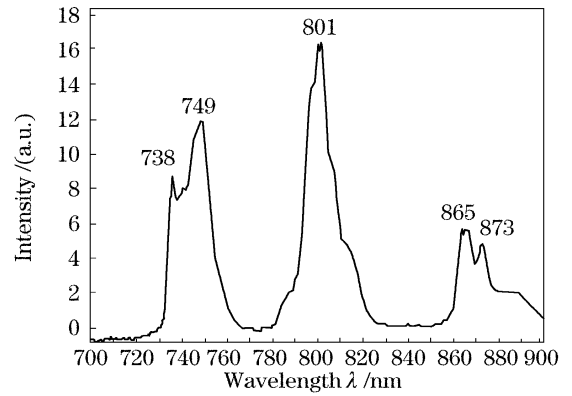


图 3 $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ 溶液的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectrum of $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ solution
速,仅几个纳秒^[3],因此可认为下能级粒子数始终保持为零,反转粒子数就等于上能级 $^4F_{3/2}$ 的粒子数。根据该近似可得到粒子数速率方程和光子通量密度方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\eta_Q P_{\text{abs}} \lambda_p}{hc} - \sigma N \phi - \frac{N}{\tau_f}, \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} = \sigma N \phi + A - \frac{\phi}{\tau_c}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 N 为反转粒子数 (cm^{-3}), ϕ 为光子通量密度 (cm^{-3}), P_{abs} 为单位体积液体有效吸收的功率 (W/cm^3), A 为自发发射项,远小于受激发射项, λ_p 为抽运波长, σ 为受激发射截面, η_Q 为量子效率, τ_f 为荧光寿命, 谐振腔光子寿命:

$$\tau_c = 1 / \{c[\alpha - \ln(R_1 R_2)] / 2l\},$$

模拟时采用两束强度均为 $I_0 = 800\text{ W/cm}^2$ 的恒定光束进行双侧相对抽运,可知

$$P_{\text{abs}} = \beta I_0 \eta \{ \exp(-\beta y) + \exp[-\beta(y_0 - y)] \}, \quad 0 \leq y \leq y_0 = 1\text{ cm} \quad (2)$$

式中 β 为液体吸收系数,在浓度较低时, β 与 Nd^{3+} 的浓度成正比关系;光谱耦合系数 η 可根据抽运光源的输出光谱和介质的吸收光谱分析得到,计算中所用参量如表 1 所示。

根据(1)式可计算光子通量密度 $\phi(x, y, t)$,并进行积分得到输出激光能量:

$$E_{\text{out}} = \iiint_{\substack{0 \leq x \leq 1\text{ cm}, \\ 0 \leq y \leq 1\text{ cm}}} \frac{1 - R_2}{1 + R_2} chv\phi(x, y, t) dx dy dt. \quad (3)$$

因为系统输入的能量为 $E_{\text{in}} = \int 2I_0 S dt$,其中 S 为抽运面积,则系统能量转换效率

$$k = \frac{\iiint_{\substack{0 \leq x \leq 1\text{ cm}, \\ 0 \leq y \leq 1\text{ cm}}} \frac{1 - R_2}{1 + R_2} chv\phi(x, y, t) dx dy dt}{\int 2I_0 S dt}, \quad (4)$$

在抽运过程中,由于:1) Nd³⁺ 抽运带与上能级的能量差;2)下能级与基态之间的能量差;3)激光跃迁过程中的量子效率小于 1 以及杂质因素等,会导致介质吸收的能量不能完全转换为激光能量,部分能量将会变为热量^[4~6]。因此,假设产生的热量与介质吸收抽运光能的比例为 η' ,考虑到二极管抽运产生的热量仅为闪光灯抽运时的 1/3^[3],因此可合理地认为采用二极管抽运时 $\eta'=0.1\sim 0.3$ 。假设激光介质与外界不存在热交换,热量仅仅是由抽运光源造成的,那么液体中的热传导方程为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \eta' \beta I(t) \{ \exp(-\beta y) + \exp[-\beta(y_0 - y)] \}. \quad (5)$$

因采用 Y 向双侧均匀抽运,可知 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ 。解热传导方程(5)可知经过抽运时间 t 之后,介质的温度上升幅度为

$$\Delta T(x, y) = [\exp(\beta^2 Kt/\rho C) - 1] I_0 \eta' \{ \exp(-\beta y) + \exp[-\beta(y_0 - y)] \} / K\beta. \quad (6a)$$

液体进入抽运区后流经 x 处时,接受抽运的时间为 $t = x/u$,因为抽运时间短而且液体的热传导系数小,因此可知: $\beta^2 Kt/\rho C \ll 1$,将展开 $\exp(\beta^2 Kt/\rho C) - 1$,并且取一级近似可以得到: $\exp(\beta^2 Kt/\rho C) - 1 \approx \beta^2 Kx/\rho uC$ 。这样 x 处液体微元温度上升的幅度如下:

$$\Delta T(x, y) = \beta x I_0 \eta' \{ \exp(-\beta y) + \exp[-\beta(y_0 - y)] \} / \rho uC. \quad (6b)$$

介质的折射率会随着温度的上升而减小:

$$dn(T)/dT = -500 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad [2].$$

折射率的变化会导致光程的改变,一个往返过程中的波前相差为 $2l \times \Delta n(x, y)$,代入折射率的改变量 $\Delta n(x, y)$ 得

$$\varphi(x, y) = 2l \times [dn(T)/dT] \times \Delta T(x, y). \quad (7)$$

根据夫琅和费衍射理论,假设近场振幅分布为: $E(x, y)$,则可计算出远场 z 处的激光振幅分布 $E(x', y')$:

$$E(x', y') = \frac{\exp(i2\pi z/\lambda)}{i\lambda z} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x'^2 + y'^2}{2z}\right) \times \iint_{x, y \in R} E(x, y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \varphi(x, y)\right] \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (xx' + yy')\right] dx dy. \quad (8)$$

从而得到远场衍射光斑的光强分布 $I(x', y') = |E^2(x', y')|$,远场光斑光强的空间分布可以直观地反映出光束质量:如果光斑绝大部分能量集中于中央位置附近,则光束质量很好。对于无波前相差且强度均匀的理想光斑,其中央亮斑能量占总能量 84% 以上,可定义光束质量为实际光斑与理想光斑在同样环围功率比(取 84%)时的尺寸比。

衡量激光系统性能的最终标准是远场能量(或功率)集中度,通常以束亮度来表述。假设输出激光功率为 P ,衍射极限角为 θ_0 ,实际光束的远场发散角: $\theta = \theta_0 \times M^2$ (M^2 为光束质量因子),则束亮度 $B = 0.84P/\pi\theta^2$ ^[7],因为输出功率正比于能量转换效率,

表 1 计算所用参量

Table 1 Parameters in the calculation

Fluorescence life time τ_f/s	3×10^{-4}
Quantum efficiency η_0	95%
Excited emission cross-section σ / cm^2	9×10^{-20}
Dynamic loss coefficient α / cm^{-1}	0.5%
Gain length l / cm	15
Specific heat volume $C / (\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	1.302×10^3
Liquid density $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.80
Heat conduction coefficient $K (\text{J}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$	0.0067
Spectrum coupling coefficient η	$\approx 90\%$
Reflectivity of output mirror R_2	0.47

故通过数值计算得到束亮度 B 的分布图,从图中读出使得亮度最大的吸收系数 β 和流速 u ,此时系统性能达到最佳。

3 数值模拟结果与分析

根据不同吸收系数和液体流速来模拟能量转换效率和远场光斑以及激光束亮度曲面分布,采用数值迭代求解超越方程(1)并代入(4)式和(8)式,模拟结果如图 4~图 6 所示。

图 4 反映的是不同的吸收系数和介质流速下的能量转换效率,在流速较低而吸收系数等于 4 cm^{-1}

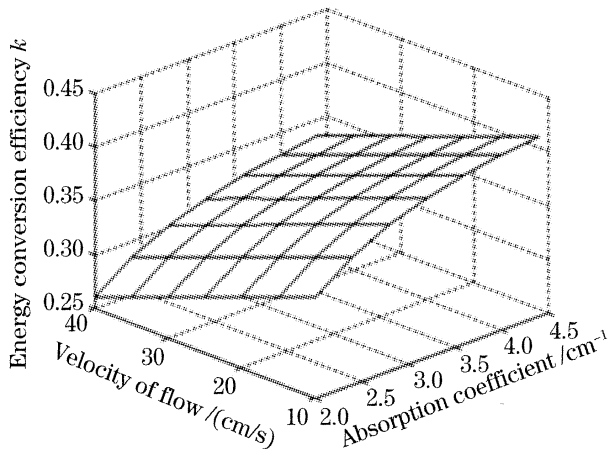


图 4 不同吸收系数和不同流速下的能量转换效率

Fig. 4 Energy conversion efficiency at different absorbing coefficient and different velocity of flow

时, 能量转换效率可达40%以上, 远远高于闪光灯

抽运时的效率; 从中还可以看出增大吸收系数和降低流速会提高能量转换效率。图 5 反映的是理想光束(无强度起伏且无波前相位畸变)远场光斑和不同吸收系数对应的实际光斑相对强度分布(流速设定为 25 m/s)。理想光束远场光斑的能量非常集中, 而对于实际光束: 吸收系数变大, 光斑能量变得发散。在吸收系数较小时, 能看到明显的中央亮斑, 光束质量很好, 但吸收系数达到 4 cm^{-1} 后, 就会呈现双峰分布, 不再有明显的中央亮斑, 这是因为此时相位分布 $\varphi(x, y)$ 梯度过大造成的。同样, 可以先设定介质吸收系数, 然后作出远场光斑和流速的关系图, 因为减小流速同样会使得相位分布 $\varphi(x, y)$ 梯度变大, 可知此时光束质量也会变差。因此要提高光束质量, 必须要减小吸收系数或提高介质流速。

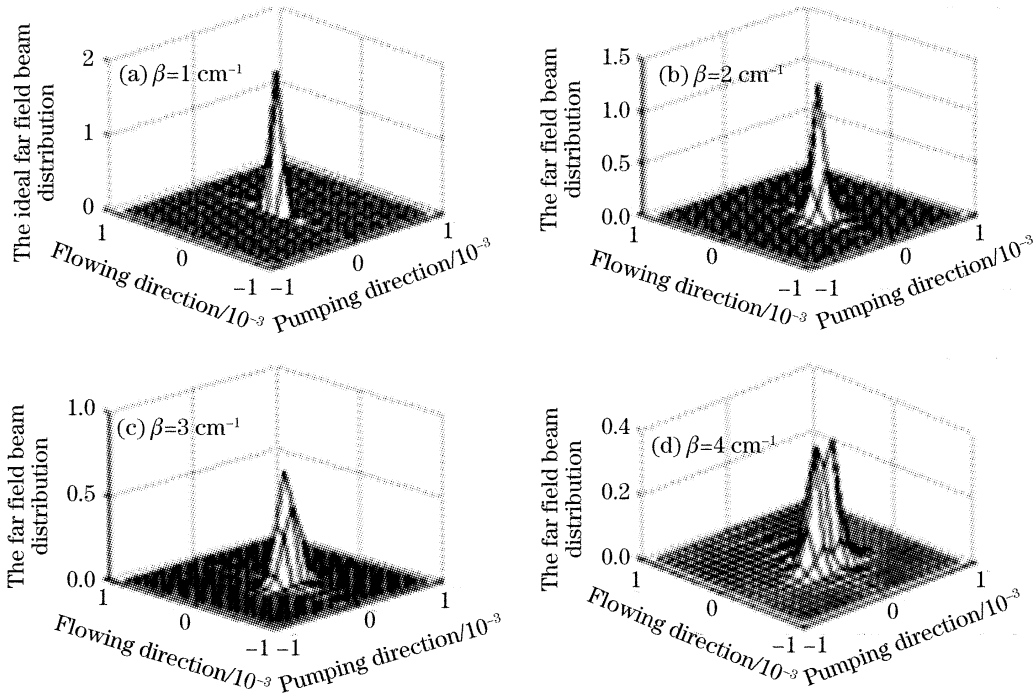


图 5 不同吸收系数下的远场光斑强度分布

Fig. 5 Far field intensity distribution of spot at different absorbing coefficient

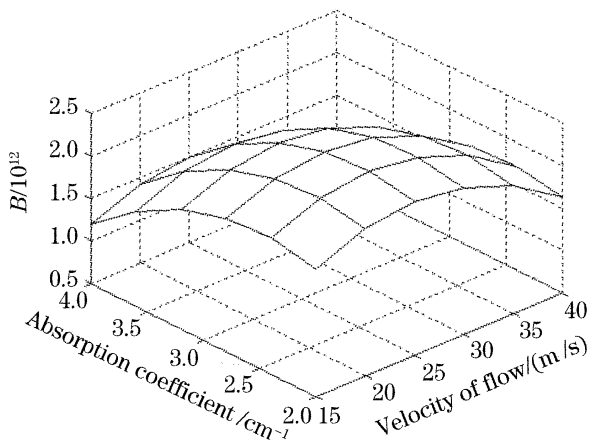


图 6 激光束亮度分布

Fig. 6 Laser beam luminance distribution

另外根据(8)式可知, 影响实际光斑远场分布的因素包含近场的强度因子 $E(x, y)$ 和相位因子 $\varphi(x, y)$, 二者的分布梯度会影响光束质量。但是比较而言, 相位起伏对光束质量的影响要比强度起伏的影响大得多, 因此改善光束质量的工作主要是减小波前畸变。

综合介质吸收系数和流速对能量转换效率的影响, 需要合理地选择介质的吸收系数和流速, 以实现激光输出功率和光束质量的最佳匹配, 使系统性能达到最佳。

图 6 是激光束亮度与介质吸收系数和流速的关系曲线, 可以非常直观地反映出激光系统的性能。

从图中可知:吸收系数介于 $2.5 \sim 3.0 \text{ cm}^{-1}$ 之间,流速大约为 25 m/s 时,输出功率和光束质量实现最佳匹配,激光束亮度最高,此时系统的性能达到最佳。

4 结 论

模拟结果表明,采用激光二极管双侧抽运的横流连续液体激光系统可有效解决系统的热效应,从而在获得较高能量转换效率的同时,也保证了较好的光束质量;在给定抽运体积 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 和抽运强度为 800 W/cm^2 时,当吸收系数介于 $2.5 \sim 3.0 \text{ cm}^{-1}$,流速约为 25 m/s 时,激光输出功率与光束质量实现最佳匹配,系统性能达到最佳。综合该系统的模拟输出特性,可知它在解决热效应方面的效果很明显,可以为发展新型高功率高光束质量的激光器提供有益的借鉴,有着很好的应用前景。

参 考 文 献

1 Marvin J. Weber. *CRC Handbook of Laser Science and Technology* [M]. 1st, Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc.,

1982. 399~421

2 Brian J. Comaskey, Walnut Creek, Eral R. Ault *et al.*. High average power laser gain medium with low optical distortion using a transverse flowing liquid host [P]. United States Patent Application Publication, 2003, **2**: 65~68

3 W. Kocher. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Chinese version, 2nd, Beijing: Science Press, 2003. 5~356 (in Chinese)
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

4 Ji Jianguhua, Qi Yunfeng, Zhu Xiaolei *et al.*. High-power quasi-continuous-wave Nd:YAG ceramic laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 415~418 (in Chinese)

纪江华, 漆云凤, 朱小磊等. 大功率准连续 Nd:YAG 陶瓷激光器研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 415~418

5 Hu Hao, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. Numerical simulation of laser characteristics for heat capacity laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1485~1488 (in Chinese)

胡浩, 蒋建峰, 涂波等. 热容激光器激光输出特性的数值模拟[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1485~1488

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 Su Yi, Wan Min. *High Energy Laser System* [M]. 1st ed., Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 22~59 (in Chinese)

苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 第1版, 北京: 国防工业出版社, 2004. 22~59