文章编号: 0253-2239(2009)12-3413-06

纵向抽运液体激光介质热效应研究

王墨戈 许晓军 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院 定向能技术研究所,湖南 长沙 410073)

摘要 大的热折射率系数和热膨胀系数使得染料激光介质的热效应远大于固体激光介质。对抽运时间内增益区 液体介质的热效应进行研究,可以为更高功率液体激光器的设计研制和光束质量控制提供参考。根据流动液体能 量方程,在抽运光功率由 5.9 W 增加至 12.4 W时,理论计算了纵向抽运时间尺度染料激光器增益区温度场分布, 并给出了由温度梯度而引起的信标光波前畸变。信标光的斯特雷尔比由 0.9133 下降至 0.6174。应用波前曲率传 感原理,实验测量了染料激光介质罗丹明 6 G(Rh6G)乙醇溶液的热效应,采用理论计算相同的抽运功率条件下,增 益区内参考光的斯特雷尔比由 0.9464 下降至 0.4883,光束质量下降明显。

关键词 激光技术;热效应;液体激光介质;光束质量

中图分类号 TN248.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092912.3413

Thermal Effect Research of Longitudinally Pumped Liquid Laser Media

Wang Moge Xu Xiaojun Lu Qisheng

(Institute of Directed Energy Technology, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The big thermal refractive index coefficient and the thermal expansion coefficient make the thermal effect of liquid laser media greater than those of the solid laser media. Therefore, it is important to study thermal effects of liquid media in gain area during pumping time. According to the energy equation, the wavefront disfortion of the beacon beam induced by the temperature gradient is calculated theoretically in the longitudinal pumping geometry. When the pumping power is increased from 5.9 W to 12.4 W, the Strehl ratio of beacon beam drops from 0.9133 to 0.6174. With the application of wave-front curvature sensing theory, the thermal effect of Rh6G is studied experimentally. Under the same pumping condition with those of theoretical calculation, the Strehl ratio of beacon beam drops from 0.9133 to 0.6174. The beam quality becomes worse seriously.

Key words laser technology; thermal effect; liquid laser media; beam quality

1 引 言

热效应是制约高能激光器发展的重要因素之一。随着具有高效率和高光谱匹配的二极管激光阵 列的应用,液体介质的循环结构以及增益区结构的 合理设计^[1],液体激光器的热效应已经大大降低。 其低廉的成本和较高的系统集成度吸引了科研人员 的注意^[2~7],美国利弗莫尔实验室(LLNL)千瓦级 染料激光器^[2]的成功研制,显示了液体激光器在高 能激光领域的发展潜力。美国于 2003 年计划研制 一套高能液体激光区域防御系统^[3](HELLADS), LLNL 已经设计了二极管激光抽运的 20 kW 掺 Nd 的无机溶液激光器^[4],并申请专利,但未见后续具体 实验报道。李密等^[5~6]数值模拟了横向抽运时单-双模块的液体激光系统的性能,认为通过适当的液 体吸收系数和液体流速的选择,双模块液体激光系 统具有较好的输出特性,但未进行实验研究。

作者简介: 王墨戈(1979一), 男, 博士研究生, 主要从事液体激光技术方面的研究。E-mail: kow79@sina.com

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-03-19

导师简介:陆启生(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用、非线性光学等方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

一般认为,通过快速更迭液体激光介质避免了 热量在增益区内的累计,可以消除热效应对激光输 出性能的影响^[8~10]。但是液体激光介质的热折射 率系数和热膨胀系数一般比固体激光介质大 2~3 个数量级,其较差的热光性能决定了在抽运时间内 增益区介质存在较强的热效应,且随着抽运光强度 的增加,其热效应也会愈发明显。因此对抽运时间 内增益区介质的热效应进行研究,可以为更高功率 液体激光器的设计研制和光束质量控制提供参考。

2 理论基础

2.1 增益区流动抽运结构

图1为理论模拟和实验中采用的纵向抽运增益 区流动结构。增益区为薄片状,液体激光介质的流 动方向与激光出射方向垂直,抽运光与激光反向或 同向。这种抽运流动结构可以减少在横向抽运结构 中因为激光介质对抽运光的强吸收而引起的激光横 截面上的热量分布不均匀。增益区内激光的波前畸 变,只与抽运光的空间分布相关,利于提高抽运 效率。



图 1 增益区抽运流动结构 Fig. 1 Geometry of pumping and flowing in the gain area

同时,可以便捷的通过增大增益区横截面积,以 增大增益区体积,提高激光器的输出功率,避免了横 向抽运结构中为提高激光提取效率而对抽运光横纵 比的设计^[11]。

2.2 温度场及相位分布计算

温度场变化引起折射率分布的变化是影响液体 激光器输出光束质量的主要原因之一。其变化情况 由多个因素构成,从流动液体的能量方程出发分析 影响温度变化的主要因素。流动液体能量方程的微 分表达式为

 $\rho \frac{de}{dt} = -p \nabla \cdot u + \tau : \nabla \cdot u + Q - \nabla \cdot q$, (1) 式中为 ρ 介质密度, e 为介质单位质量内能, p 为流体静压强, u 为流体速度, \tau 为偏应力张量, Q 表示由 于辐射或化学能释放等因素而产生的系统内单位体 积流体热量的增量,q为热通量。(1)式中等式左边 表示单位体积流体内能的变化率。等式右边第一项 表示由于系统体积变化而导致的压力做功,称作压 缩功;第二项为流体粘性力做功,称作耗散功;第四 项则是外间传入单位体积流体的热量,主要为温度 梯度导致的热传导现象。对于实际液态流体而言, 可压缩性很小,粘性力作用也非常有限。因此在数 值模拟中忽略了压缩功和耗散功的影响,将液体流 体看作理想的不可压缩流体。同时,若抽运光脉宽 大于激光的上能级寿命,热传导现象的弛豫时间通 常在 0.1 s 的量级^[12],当液体流过增益区的时间远 小于上述时间尺度时,对于温度场的分析可以忽略 热传导的影响。但是当激光器在介质流速很慢的情 况下热传导对温度场分布的影响是不可忽略的。

综合上面的分析可以看出,在流体快速流动的 连续波或高重复频率(抽运脉宽大于介质的能级寿 命)工作状态下,抽运光的辐照生热是影响温度场分 布的最主要因素。则能量方程可以简化为

$$\rho \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \, \boldsymbol{u} \cdot \nabla e = \boldsymbol{Q}. \tag{2}$$

将内能表示成温度的函数:

$$t = CT$$
, (3)

式中 C 为液体定容比热,T 为温度。应用(3)式,则 可以将能量方程转换为流体的温度场方程,表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \frac{Q}{\rho C}, \qquad (4)$$

假设液体的流动方向为 y 方向,没有其他方向的速 度分量,xoy 面为抽运面,z 为激光或参考光的传播 方向。温度场方程可以进一步简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u_{y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{Q}{\rho C}, \qquad (5)$$

通过对(5)式的求解可以得到增益区内温度场分布。

温度场的变化将引起激光介质的折射率变化以 及热膨胀效应,改变了激光在增益区内的光程,进而 影响输出激光的光束质量。在实际工作中,通常增 益区内液体介质在激光方向上尺寸受到液体池的限 制,其长度变化主要由液体池的热膨胀性决定,而液 体的热膨胀系数比固体介质热膨胀系数大 2~3 个 数量级,因此在研究液体增益区的光学长度变化中 可以忽略热膨胀性的影响,而主要考虑温度变化对 折射率分布的影响。

定义热折射率系数 α,,其表达式为

$$\alpha_n = \frac{1}{n_0} \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T},\tag{6}$$

式中 n₀ 为初始折射率。对于已知的温度场温升分布 $\Delta T(x,y,z)$ 通过增益区后激光横截面上的相位分 布为

$$\varphi(x,y) = kr(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{0}^{d} n(x,y,z) dz = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{0}^{d} [n_{0} + \Delta n(x,y,z)] dz = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{0}^{d} [n_{0} + \alpha_{n} n_{0} \Delta T(x,y,z)] dz, \quad (7)$$

式中 λ 为激光或参考光波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数,d为 z方向的尺度。

2.3 格林函数波前重构算法

格林函数算法是利用波前的曲率信号求解光强 传递方程重构波前的方法之一,具有计算速度快、抗 噪声能力强等特点。实验采用习锋杰等^[13]设计的 光栅型波前曲率传感器获得信标光的曲率信号,如 图 2 所示。



图 2 光栅型波前曲率传感器结构示意图 Fig. 2 Structure of phase grating wave-front curvature sensor

信标光的相位分布为 $\varphi(x,y)$,通过光栅G和透镜L的组合后,在透镜焦平面M上得到离焦量同为 l的焦前与焦后大小相同的光强分布 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)。其坐标原点都为各自光斑的几何中心。离$ 焦量<math>l等于光栅级与透镜的组合焦距 F_G 和透镜焦距 距 f_L 之差:

$$l = |F_{\rm G} - f_{\rm L}| = \frac{f_{\rm L}^2}{f_{\rm g}},$$
 (8)

式中 fg 为光栅焦距。则相位的曲率信号为

$$S(x,y) = \frac{I_2(-x,-y) - I_1(x,y)}{I_2(-X,-Y) + I_1(x,y)}.$$

根据格林函数波前重构算法的原理,由曲率信号的分布 *S*(*x*,*y*),得到信标光的相位分布为

$$\varphi(x,y) = -\frac{k}{z} \iint_{A} S(x',y') G(x,y,x',y') dx' dy',$$
(9)

式中 $z = f_L^2/l$ 为传输距离,实验中应用的波前曲率 传感器的传输距离z = 3.6 m, A为光瞳,G(x, y, x', y')为 Neumann 边界条件的广义格林函数,文 献[14]中给出了各种光瞳形状的格林函数表达式。

3 数值模拟及实验结果

图 3 为实验布局示意图,一束扩束准直的 He-Ne 信标光正入射通过染料池,液体激光介质为 Rh6G 的乙醇溶液,浓度为 5×10⁻⁴ mol/L,染料池 中激光介质自下而上流动。信标光波前受抽运影响 产生畸变,经过矩形孔阑后,由衰减片、滤波片等光 学元件对抽运而产生的荧光进行过滤,进入波前曲 率传感器,由 CCD 采集焦前及焦后光斑。采用矩形 域的格林函数算法重构波前。数值模拟和实验的参 数由表1给出。



图 3 测量相位分布的实验结构图

Fig. 3 Experimental layout of measuring

phase distribution

表1 数值模拟及实验参数

Table 1 Parameters for calculation and experiment

Pump light	Power /W	5.9,12.4
	Radius /mm	2
Scale of pupil	x direction /mm	11.3
	y direction /mm	8
Probe light	Wavelength /nm	632.8
	Absorption coefficient $/ cm^{-1}$	100
	Density /(g/cm ³)	0.78
Liquid laser	Specific heat $/Jg^{-1}K^{-1}$	2.2
media	Velocity / (m/s)	0.22
	Refractive index	1.36
	Heat refractive coefficient /K ⁻¹	-4.1×10^{-4}

抽运光由一台倍频的 Nd:YAG 激光器提供,其 脉冲重复频率为 10 kHz,脉宽 500 ns。由于光瞳的 尺寸大于抽运光的尺寸,所以在数值模拟中先恢复 光瞳面上的相位分布,然后再截取抽运区域上的相 位分布,用以分析液体抽运光产生的热效应对信标 光相位分布的影响。

3.1 系统标定

激光介质的流动时,由于增益区结构和粘性力 的影响,信标光的波前产生一定的畸变。为消除这 种系统误差,首先应对流动时信标光的相位分布进 行测量,在后续抽运实验中测量到的相位分布减去 3416

流动时的相位分布就可以得到因抽运光生热而引起 的相位变化。同时系统标定过程也可以得到液体因 为流动而带来的波前畸变。

图 4 和图 5 分别给出了未抽运时,静止和以速度 为 0.22 m/s 流动时波前曲率传感器所测量的信标光 焦前及焦后光斑。为保证侧量光斑的完整性,将 CCD 旋转了 90°。图 6 和图 7 分别给出了采用格林函数算 法恢复的相位分布,图 8 为两者的相位差分布。



图 4 无抽运静止时焦前及焦后光斑 Fig. 4 Faculae before and after the focus without pumping and flowing



图 5 无抽运流动时焦前及焦后光斑 Fig. 5 Faculae before and after the focus with flowing and without pumping



图 6 无抽运静止时信标光相位分布 Fig. 6 Phase distribution of beacon beam without pumping and flowing

采用斯特雷尔比评价光束质量,其定义式为[15]

$$\theta_{\rm SR} = \left| \left\langle \exp[ik\phi(x,y)] \right\rangle \right|^2, \qquad (10)$$

式中 $\phi(x,y)$ 为测量的信标光波前分布。未抽运时,静止和流动时的斯特雷尔比分别为 0.9555 和



图 8 流动所引起的相位分布变化 Fig. 8 Phase difference induced by flowing 0.9319,流动所引起的相位变化(PV)值为 0.038λ。 可见因流动引起的光束质量变化不大。同时为了验 证流动引起的相位分布的稳定性,计算了 30 frame 各点相位的均方根值,如图 9 所示。各点最大均方 根值小于 0.03,相位起伏较小。其中在 x=0.4 cm 附近均方根值小于 0.005λ,应将该处作为抽运区 域,以减小系统误差带来的影响。





- Fig. 9 Stability of phase distribution with flowing
- 3.2 经过抽运后的信标光相位分布数值模拟及实验结果

实验中分别测量了抽运光功率 P 为 5.9 W 和 12.4 W 时,信标光波前的相位分布,减去因流动引 起的系统误差后,得到了抽运时由生热而引起的波 前畸变。并与数值模拟结果进行比较。由于抽运激 光器采用稳定腔结构,因此,数值模拟的抽运光强分 布为半径为2mm的高斯光束。

图 10 和图 11 分别给出了数值模拟和实验的抽运光区域内信标光通过染料池的相位分布,在抽运光功率分别为 5.9 W 和 12.4 W 时,数值模拟结果表明

信标光的 PV 值分别为 1.09 rad(0.1729λ)和 2.28 rad (0.3634λ), 光束的斯特雷尔比分别为 0.9133 和 0.6174。实验中,信标光的 PV 值分别为 1.06 rad (0.1690λ)和 2.61 rad(0.4153λ), 光束的斯特雷尔比 为 0.9464 和 0.4883。



图 10 抽运流动时信标光相位分布数值模拟。(a)P=5.9 W; (b)P=12.4 W







Fig. 11 Experimental results of phase distribution with pumping and flowing. (a) P=5.9 W; (b) P=12.4 W

从上述结果可以看出,随着抽运功率的增加,信 标光光束质量下降严重,当抽运功率进一步增加时, 相位畸变将超过曲率传感器的响应范围。因此,在 此种流速下,液体流动热管理对光束质量的改善效 果并不明显,抽运区域内激光介质仍然存在较大的 折射率梯度分布。欲提高光束质量应选取热容更 大,效率更高的激光介质体系。

比较数值模拟和实验结果可以看出:在理想状况下,信标光通过染料池的相位分布只与抽运光的 光强分布相关,区别在于 PV 的大小不同。且与实 验结果的差距不大。相位分布与实验结果也大体近 似。但是由于没有考虑抽运区域内介质流动速度分 布的不均匀和抽运光的空间分布随时间的起伏,因 此,造成光束斯特雷尔比的结果在高功率抽运条件 下相差甚大,难以反应真实的相位分布,需在进一步 工作中加以改进。

4 结 论

本文采用理论和实验的方法对纵向抽运 Rh6G

乙醇溶液的热效应研究。在未抽运时,液体激光介质的流动不会产生大的波前畸变,与静止的介质相比染料池范围内信标光的斯特雷尔比由 0.9555 下降至 0.9319。当抽运光功率由 5.9 W 增加至 12.4 W时,信标光的光束质量下降明显,在抽运区域内,信标光的斯特雷尔比由 0.9464 下降至 0.4883,流动热管理的效果有限,应采用更高热光效率的激光介质体系。

参考文献

- 1 F. J. Duarte. High-Power Dye Laser[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1992, 1
- 2 I. L. Bass, R. E. Bonanno, R. P. Hackel *et al.*, High-averagepower dye laser at LLNL[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31** (33): 6993~7006
- 3 T. Tether. statement before the house armed service committee[EB/ OL]. http://www.house.gov/hasc/openingstatementsandp ressreleases/108 Thcongress, 2003
- 4 E. R. Ault, B. J. Comaskey, T. C. Kuklo. High average power laser using a transverse flowing liquid host[P]. US Patent, 6600766, 2003
- 5 Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performance simulation of laser diode two-sides-pumped transverse flow continuous liquid

光

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

- 6 Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performance 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. 激光二极管抽运单/双增益模块的液体激光系统性能对比[J]. 光学学报,2008, 28(4): 722~725
- 7 Yuan Yongke, Xu Zheng, Li Mi *et al.*. Effect of flow field characteristics in liquid laser system on thermally Induced distortion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1342~1345 袁永轲,许 正,李密等. 液体激光系统流场特性对热畸变的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1342~1345
- 8 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Progress of rare-earth-doped liquid laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): $45 \sim 50$

叶云霞,范滇元. 掺稀土离子液体激光器的研究进展[J]. 激光与 光电子学进展,2007,44(1):45~50

9 Ren Guoguang. New tactical high energy liquid laser[J]. Laser Technology, 2006, **30**(4): 418~421

任国光. 新型战术高能液体激光器[J]. 激光技术,2006, 30(4):

418~421

报

- 10 F. J. Duarte. Organic dye lasers[J]. Optics & Photonics News, 2003: 20~25
- 11 F. J. Duarte. High-Power Dye Laser [M]. New York: Springer-Verlag Press, 1992, 161~163
- 12 Huang Ke. Thermal Management with Host Flow of High-Average-Power Inorganic Liquid Laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2006, 34~38 黄 珂. 高平均功率无机液体激光器的流动热管理研究[D]. 长 沙:国防科学技术大学,2006, 34~38
- 13 Xi Fengjie, Xu Xiaojun, Wang Tiezhi et al.. Phase grating wave-front curving sense [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (2): 377~378
 377~378

习锋杰,许晓军,王铁志等.相位型波前曲率传感器[J].光学学报,2007,27(2):377~378

- 14 Seremet. Handbook of Green's Functions and Matrices [M]. New York: WIT Press, 2003, 124
- 15 Su Yi, Wan Min. *High Energy Laser System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004, 47 苏 毅,万 敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2004,47