

激活介质内部折射率梯度对 传输波面质量的影响

李锡善 蒋安民*

(中国科学院上海光机所)

提要: 分析了 Nd^{3+} 激活玻璃介质中折射率梯度的生成。实验测定了不同激活状态下的激光棒的折射率梯度。由它产生的激光束平均发散角和畸变波面的等效曲率半径。讨论了折射率梯度对传输激光波面质量的影响和波面补偿的可能性。

Effect of the refractive index gradient in active medium on the wave surface quality of light beam

Li Xishan, Jiang Anmin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: This paper analyses the cause for refractive index gradient in Nd^{3+} glasses. The static and dynamical refractive index gradient, average divergent angle and equivalent curvature radius have been measured. Finally the effect of refractive index gradient on the wave surface quality of laser beam is discussed.

一、引言

激活介质内部折射率梯度分静态和动态两种。对钕玻璃棒来说,静态折射率梯度是在熔炼和退火过程中生成的;动态折射率梯度是在抽运过程中由于光泵和激光加热不均匀产生的。静态折射率梯度分为渐变型和突变型,渐变型的折射率变化约为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级,突变型约为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 量级。

在固体激光器中,光泵作用很难做到完全均匀。光泵在圆柱形激光棒中引起的温度分布近似径向对称,且有 $\Delta T = f(r^2)$ 的关系。

在单脉冲工作条件下,加热过程呈现负透镜效应,冷却过程呈现正透镜效应。在高重复频率或连续工作条件下,当器件达到稳态运转时,呈现正透镜效应。

由于激光的微区加热不均匀所导致的自聚焦效应使局部折射率梯度增大,致使传输光束波面质量劣化,而且这种局部波面畸变是很难补偿的。

二、 $\Delta n(r)$ 和 $\Delta\theta(r)$ 的测量

用 $\Delta n(r)$ 和 $\Delta\theta(r)$ 分别表示激光棒的径

收稿日期:1984年5月30日。

* 参加本工作的还有夏青生同志。

向折射率分布和光束发散角变化,用 Mach-Zender 干涉仪测定 $\Delta n(r)$, 用星点法测定 $\Delta\theta(r)$ 。图 1 是直径 70mm 钽玻璃棒的干涉图。

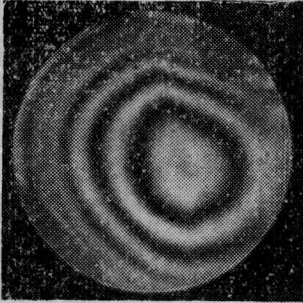


图 1 钽玻璃棒的马赫-陈德尔干涉图
D-1293, N_{306} , $\phi 70 \times 2010$ mm

干涉图和星点图之间有一定关系,由于干涉图可求得棒的平均发散角变化

$$\Delta\theta(R) = \frac{2l_0}{R^2} \int_0^R \frac{d[n(r)]}{dr} r dr \quad (1)$$

l_0 和 R 分别为棒的长度和半径。

计算 $\Delta\theta(R)$ 有两种方法,一种是由干涉图确定 $n(r)$ 的函数形式,代入式(1)进行积分运算,或者采用分段积分法求得。根据光束的波面畸变也可求得 $\Delta\theta(R)$ 。

表 1 $\Delta n_j(R)$ 和 $\Delta\theta_j(R)$ 的测定结果

样 品		$\Delta n_j(R)$ [10^{-7}]		$\Delta\theta_j(R)$ [mrad]	
编号	尺寸(mm)	测量值	计算值	测量值	计算值
1#	$\phi 50 \times 2000$	9.4	8.3	0.09	0.08
2#	$\phi 70 \times 2000$	14.2	14.4	0.11	0.12
3#	$\phi 50 \times 1500$	33.6	31.0	0.25	0.27
4#	$\phi 70 \times 2000$	12.6	12.2	0.10	0.11
5#	$\phi 70 \times 2000$	12.6	15.6	0.15	0.11
6#	$\phi 50 \times 2000$	36.5	42.3	0.46	0.39
7#	$\phi 50 \times 1500$	8.4	15.0	0.12	0.09
8#	$\phi 70 \times 2000$	9.5	15.6	0.12	0.08

表 2 钽玻璃的动态特性测量结果

样 品			光泵密度 100 J/cm^3		激光强度 100 J/cm^2			
型 号	尺 寸 (mm)	$\alpha_{1.03}$ (cm^{-1})	$\Delta n_p(R)$ (10^{-6})	$\Delta\theta_p(R)$ (mrad)	$\Delta n_i(R)$ (10^{-6})	$\Delta\theta_i(R)$ (mrad)	$\Delta n_a(R)$ (10^{-6})	$\Delta\theta_a(R)$ (mrad)
D-865	$\phi 50 \times 2000$	0.15%	2.50	0.20	3.13	0.25	5.63	0.45
A-7134	$\phi 50 \times 2000$	0.22%	2.88	0.23	4.00	0.32	6.88	0.55

$$\Delta\theta(R) = \frac{\omega}{R} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \omega = \frac{[n(R) - n(0)]l_0}{\lambda} = \frac{\Delta n(R)l_0}{\lambda}$$

$\Delta n(R)$ 可由干涉图求出。

表 1 给出若干钽玻璃棒的静态 $\Delta n_j(B)$ 和 $\Delta\theta_j(R)$ 的测量和计算结果。

采用高速照相法和脉冲探测法测定了钽玻璃棒的动态折射率变化和相应的动态发散角的变化。光泵作用引起的动态变化分别用 $\Delta n_p(R)$ 和 $\Delta\theta_p(R)$ 表示,激光作用引起的分别用 $\Delta n_i(R)$ 和 $\Delta\theta_i(R)$ 表示,总的动态效应分别用 $\Delta n_a(R)$ 和 $\Delta\theta_a(R)$ 表示。

三、等效曲率半径测量

根据透镜成像原理和非稳激光谐振腔理论,可以测出具有径向折射率梯度的钽玻璃棒的等效曲率半径。根据曲率半径大小,可对激活介质进行动态畸变补偿,从而可使输出激光波面得到不同程度的改善。图 2 为实验中所用的等效平凸非稳腔的光路图。

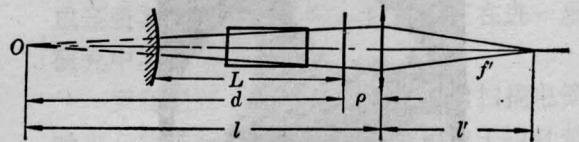


图 2 热透镜效应的等效平凸腔光路

由非稳腔理论知道^[1]:

$$d = L \left(1 + \frac{R}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{L} [(l - \rho)^2 - L^2] \quad (4)$$

式中, $d = l - \rho$, ρ 为常数, L 为等效平凸腔长,

l 为物距,即“发光中心” O 到成像透镜的距离。 l 可由牛顿公式求得:

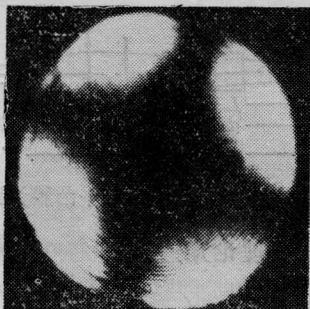
$$l = \frac{l' f'}{f' - l'} \quad (5)$$

l' 为像距, f' 为成像透镜焦距。

由于棒存在径向折射率梯度,致使平面平行谐振腔等效平凸非稳腔,我们把等效平凸腔的曲率半径定义为激光棒的等效(畸变)曲率半径。表3给出若干钽玻璃棒的等效曲率半径。

表3 等效曲率半径 R^* 的测量结果
玻璃棒 ($\phi 30 \times 1500\text{mm}$)

编号	型号	l' (m)	l (m)	R^* (m)
1	N ₃₁₂	6	-27.89	48.32
2	N ₃₁₂	5.7	-37.10	93.46
3	N ₃₁₂	6.1	-26.00	40.50
4	N ₇₁₂	5.9	-30.28	58.98
5	N ₇₁₂	5.95	-29.10	53.61
6	N ₇₁₃	6	-27.89	48.32
7	N ₈₁₂	6	-27.89	48.32
8	N ₈₁₂	6.3	-22.84	28.60
9	N ₉₁₂	5.9	-30.28	58.98
10	N ₉₁₂	5.98	-28.50	50.97



(a) 静态(正交等倾线)



(b) 动态(光泵第5ms)出现4条等色线

图3 钽玻璃棒的应力分布图

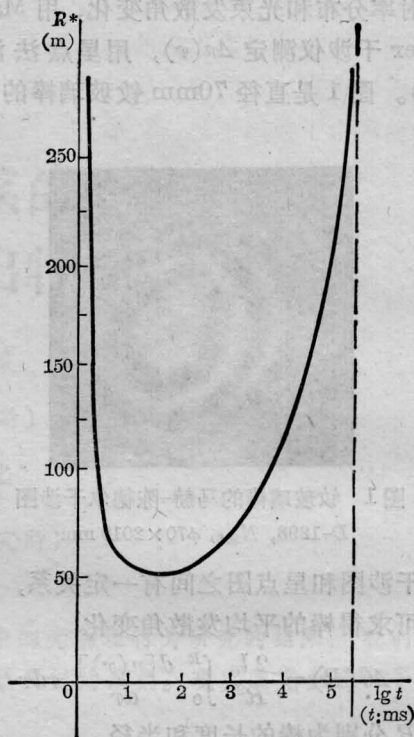


图4 等效曲率半径随时间的变化关系

钽玻璃棒的动态折射率变化呈现明显的径向对称性。图3是在正交偏振光下拍摄的动态应力干涉图。

图4给出 $\phi 30 \times 1500\text{mm}$ 钽玻璃棒的等效曲率半径 R^* 随时间的变化关系。随着光泵作用延续, R^* 很快从极大值[与 $\Delta n_r(R)$ 有关]降为极小值; 几分钟之后, 又恢复到初始值。在此过程中, 激光棒呈现出明显的负透镜效应。经过极短时间的动态平衡, 棒又表现出正透镜效应。大约经过一小时左右时间, R^* 又恢复到原始值, 棒内部温度分布基本达到平衡。

四、讨 论

激活介质内部存在折射率梯度, 使输出激光波面产生畸变。这种畸变大致可分为两类: 一类是较平滑的容易补偿的畸变; 另一类是无规畸变。前者对输出激光束的亮度影

响不大;后者则会带来很大影响。

对于用作等离子体研究的高功率激光系统来说,要求输出激光束的发散角达到或接近衍射极限,因而对激活铍玻璃质量要求很高,必须使其静态和动态光畸变控制在一定范围之内。静态折射率梯度应控制在 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 以内,不允许局部折射率起伏存在。

1. 造成波面畸变诸因素

对于优质激光棒来说,静态折射率不均匀,一般导致激光波面平缓变化。在多数情况下,光泵作用也只引起径向分布的平滑折射率改变,很少出现局部折射率突变。激光作用所引起的介质折射率起伏是无规则的,往往出现许多局部折射率突变,很难进行光学补偿。表4列出两根铍玻璃棒的畸变特征参数的测量结果。氙灯光泵脉冲宽度5ms,光泵体能密度 100 J/cm^3 ,行波激光密度 100 J/cm^2 。

实验结果分析表明:(i)对直径50mm、长2m左右的优质铍玻璃棒来说, $\Delta n_j \leq \pm 2 \times 10^{-6}$,它所引起的发散角变化不大于0.2 mrad。随着棒长度的减小, $\Delta n_j(R) \sim \Delta \theta_j(R)$ 近似呈线性关系下降。(ii)在脉冲宽度5ms、与光泵密度 100 J/cm^3 ,激光强度 100 J/cm^2 的条件下,优质铍玻璃棒的静态折射率不均匀性是动态折射率不均匀性的五分之一左右。当然随着光泵脉冲宽度、光泵能量密度和激光强度的减小,动态折射率梯度也相应下降。所以在各类大能量和高功率铍玻璃激光系统中,设法抑制或减小动态折

射率梯度的发生是降低输出光束波面畸变的重要措施。

2. 光程补偿和波面修整

激活介质内部存在折射率梯度是不可避免的。对于有平滑折射率分布的铍玻璃棒来说,静态光畸变的补偿比较容易,一种办法是修磨棒端面,以实现等光程传输;另一种方法是等效谐振腔补偿。要得到好的补偿效果,棒中静态折射率分布应当精确测定。

利用全息成像原理,可以实现通过像差介质的无像差成像。把存在折射率梯度的激光介质视为像差介质,通过它制作一张全息图,再现全息图时,将原激光介质放入原位,这样便可得到一束无像差的光束。这里的关键技术问题是要获得一种光学均匀的且能承受一定功率密度的全息记录介质^[2]。

动态光程补偿是比较困难的,因为随着光泵过程的推移,棒内动态不均匀性是随时间发生变化的,因而不能用一个固定的参量去进行光程补偿或波面修整。采用自适应光学补偿技术可以解决这一困难。目前,降低动态光畸变的主要措施是改善光泵系统的均匀性、采用空间滤波技术以获得较均匀的激光强度分布、提高激光介质的热光稳定性和降低非线性折射系数。

参 考 文 献

- [1] R. L. Sanderson; *Appl. Opt.*, 1969, 8, No. 10, 2129.
- [2] J. Woodman; "Introduction to Fourier Optics", 8th Chapter McGraw-Hill, 1968.

表4 畸变特征参数测定结果

铍玻璃棒	$\Delta n_j(R)$	$\Delta n_p(R)$	$\Delta n_t(R)$	$\Delta \theta_j(R)$	$\Delta \theta_p(R)$	$\Delta \theta_t(R)$	$\Delta n_{\Sigma}(R)$	$\Delta \theta_{\Sigma}(R)$
	10^{-6}			mrad			10^{-6}	mrad
1*($\phi 50 \times 2000$)	1.80	2.50	3.13	0.15	0.20	0.25	7.03	0.60
2*($\phi 50 \times 2000$)	2.80	2.88	4.0	0.28	0.23	0.32	9.68	0.83