

# YAG 激光棒光泵浦动态热效应的干涉测试

罗必凯 倪晓武 张 齐 贺安之

(华东工学院应用物理系, 南京 210014)

**提要** 本文研究了脉冲固体激光器的 YAG 激光棒光泵浦动态热效应对激光波面的影响。采用激光干涉测量方法得到了 YAG 激光棒在脉冲光泵浦时的瞬态干涉图和泵浦后的时间序列干涉图, 并用计算机进行图像处理 and 计算, 得到三维时间序列畸变波面图和激光棒的热焦距随时间变化的曲线。

**关键词** YAG 激光棒, 热效应, 干涉测量

## Interference measurement of dynamic thermal effect induced by optical pumping of YAG crystal rod

*Luo Bikai, Ni Xiaowu, Zhang Qi, He Anzhi*

(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology, Nanjing 210014)

**Abstract** The influence of dynamic thermal effect induced by optical pumping of YAG crystal rod in a pulsed solid laser on the wave front of the output laser beam is studied in this paper. A series of time-resolved instantaneous interferograms during and after the pumping are obtained with a Mach-Zehnder interferometer, and three-dimensional time-resolved pictures of the distortion wave surfaces and the curve of thermal focal length of laser rod versus time are gained after the treatment and calculation for interferograms, and the curve is explained.

**Key words** YAG crystal, thermal effect, interference measurement

## 1 引言

固体激光棒吸收光泵辐射能量中一小部分造成粒子数反转, 而大部分变为热量, 使激光棒温度升高; 冷却导致激光棒中心温度高于表面温度, 形成径向温度梯度<sup>[1]</sup>。温度梯度引起介质折射率变化和棒两端局部热膨胀产生热透镜效应<sup>[2,3]</sup>。同时产生热应力双折射效应<sup>[4,5]</sup>。

本文研究 YAG 激光棒脉冲光泵浦动态热效应造成的激光波面的变化和激光棒热焦距的

变化。

## 2 实验装置和测量原理

### 2.1 实验装置

采用 Mach-Zehnder 干涉仪光路,将激光棒置于一个光学臂中,棒轴平行于光的传播方向。实验装置如图 1 所示。

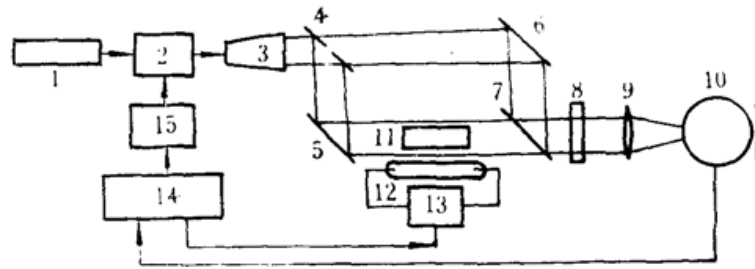


Fig. 1 Diagram of the experimental set-up

1—He-Ne laser; 2—LiNbO<sub>3</sub> electric-optical modulator; 3—beam-expanding system; 4~7—M-Z interferometer; 8—0.63 μm filter; 9—lens; 10—high speed camera; 11—Nd<sup>3+</sup>:YAG rod; 12—pulsed xenon lamp; 13—laser power supply; 14—synchronizer; 15—pulsed power supply

记录 M-Z 干涉图像的高速转鼓(10)转动起来后,送出一个参考脉冲信号给同步控制器(14)。同步控制器输出两个脉冲信号,一个脉冲信号控制脉冲氙灯(12)引燃放电;另一个脉冲信号控制电光开关(2)。激光窄脉冲经扩束望远镜(3)后进入 Mach-Zehnder 干涉仪,则高速转鼓可以记录到等周期的时间序列干涉图。由于高压窄脉冲的宽度和周期均可改变,因此不仅每幅干涉图的曝光时间可调,而且幅与幅的时间间隔也可以调,可获得激光棒热效应变化比较明显的动态过程。

实验参数: Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光棒尺寸为  $\phi 6 \times 70$  (mm),圆柱面为未抛光面;光泵由极间距离为 70 mm 的直管频闪氙灯和椭圆形聚光腔组成;每次输给氙灯的能量为 50 J,重复频率为 1 PPS;氙灯的闪光波形为钟形脉冲,上升时间为 100 μs,下降时间为 150 μs;He-Ne 激光器输出功率为 20 mW,从电光开关(2)输出的序列脉冲激光的脉宽可为 1, 5, 10, 40 μs。

图 1 实验经适当改装可成为纳秒脉冲激光同步诊断实验装置。

### 2.2 测量原理

设长度为  $L$  的激光棒在没有泵浦时的折射率为  $n$ ,泵浦后轴向折射率梯度为零,截面上折射率分布为

$$n = n(x, y) \quad (1)$$

$(x, y)$  点移过的条纹数为

$$\Delta m(x, y) = \int_0^L \frac{n(x, y) - n_0}{\lambda_0} dz = \frac{n(x, y) - n_0}{\lambda_0} L \quad (2)$$

$(x, y)$  点的位相改变为

$$\Delta \varphi(x, y) = \Delta m(x, y) \cdot 2\pi \quad (3)$$

设未受扰动时条纹的空间频率为  $\Omega$ ,  $(x, y)$  点条纹的漂移量为  $\delta(x, y)$ , 则

$$\Delta \varphi(x, y) = \Omega \delta(x, y) \cdot 2\pi \quad (4)$$

$$n(x, y) - n_0 = \lambda_0 \Omega \delta(x, y) / L \quad (5)$$

其中  $\Omega$  和  $\delta(x, y)$  的量纲分别为  $[\Omega] = L^{-1}$ ,  $[\delta(x, y)] = L$ 。  $\delta(x, y)$  可以用参考条纹(未受扰动的干涉条纹)作基准来测量,于是由(4), (5) 两式可求出位相改变和折射率的改变。

为了研究  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$  激光棒的等效热焦距的动态变化,则要根据干涉图求等效热焦距。设棒中心与边缘的波差为  $\Delta P$ (如图 2), 在  $\Delta P \ll r_0$  的情况下, 则可得到等效热焦距的近似表达式

$$f \approx \frac{r_0^2}{2\Delta P} \quad (6)$$

其中  $r_0$  是激光棒的半径。

设棒中心与边缘条纹的相对漂移量为  $\Delta m$ ,

则(6)式可变成

$$f = \frac{r_0^2}{2\Delta m \lambda} \quad (7)$$

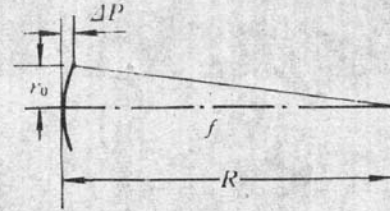


Fig. 2 Relation illustrating of the equivalent thermofocus, wave difference and radius of rod

### 3 实验结果与分析

用光电计数法测得在一次泵浦期间移过小孔光阑(置于照相镜头 9 之后)的条纹数为 5, 从而得知该激光棒在一次泵浦期间光学长度增加了五个波长。

由纳秒脉冲激光同步诊断实验获得的瞬态 M-Z 干涉图如图 3 所示。其干涉条纹没有发生明显畸变, 这说明在泵浦期间热传导作用可忽略。

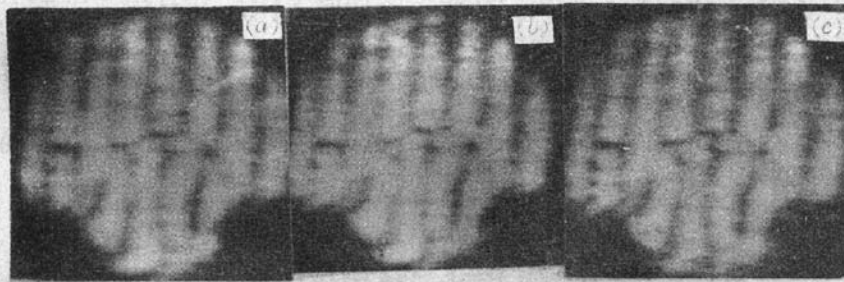


Fig. 3 Instantaneous M-Z interferograms obtained by pulse synchronizing exploration  
(a) First pumping (b) Tenth pumping (c) Fiftieth pumping

由 He-Ne 序列脉冲激光(脉宽为  $40 \mu\text{s}$ )诊断实验获得激光棒在光泵浦后的 M-Z 序列干涉图。图 4 为未泵浦时的 M-Z 干涉图和光泵浦后的前五幅 M-Z 干涉图, 以及用计算机进行图像处理获得的三维波面图。干涉图的条纹用计算机细化, 求出中心与边缘条纹的相对漂移量  $\Delta m_i (i = 0, 1, 2, \dots, 5)$ 。将  $r_0 = 3 \times 10^{-3} \text{m}$ ,  $\lambda = 0.6328 \times 10^{-6} \text{m}$  和  $\Delta m_i$  值代入(7)式, 计算得到等效焦距  $f_T$  值。 $f_T$  随时间的变化如图 5 所示。

未泵浦时激光棒中心与边缘条纹相对漂移量为 0.62, 由(7)式算出  $f_T = 11.5 \text{m}$ , 即此时激光棒相当于焦距为 11.5 m 的正透镜。光泵浦结束后, 由于热传导使激光棒边缘温度低于中心温度, 形成径向温度梯度, 产生热透镜效应, 使激光棒的等效焦距变短, 在大约  $500 \mu\text{s}$  时为最短, 即热透镜效应最大; 在  $500 \mu\text{s}$  之后, 由于冷却水继续带走热量, 激光棒里径向温度梯度逐渐减小, 热透镜效应变小, 等效焦距逐渐增大, 但增大得比较慢。

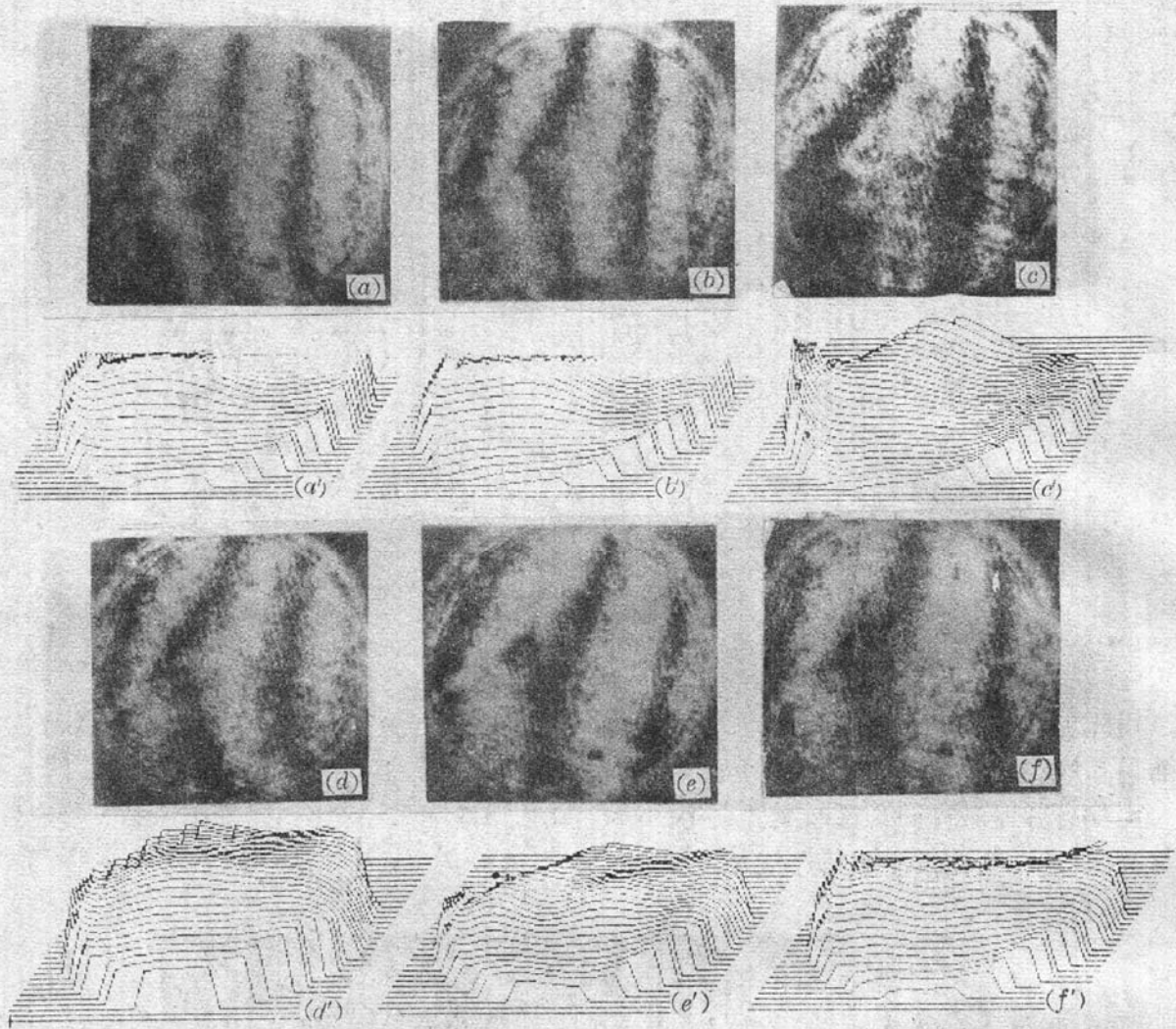


Fig. 4 M-Z interferograms and their corresponding three-dimensional wave surface patterns

(a) No pumping; (b) 250  $\mu\text{s}$ ; (c) 500  $\mu\text{s}$ ; (e) 750  $\mu\text{s}$ ; (f) 1000  $\mu\text{s}$ ; (g) 1250  $\mu\text{s}$

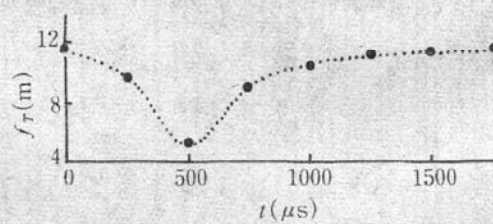


Fig. 5 Curve of equivalent thermal focal length versus time

### 参 考 文 献

- 1 W. Kochner, *Solid-state Laser Engineering*, Springer-Verlag, New York, 1976, 346
- 2 H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.*, **44**, 455(1965)
- 3 W. Koechner, *Appl. Opt.*, **9**, 2548(1970)
- 4 J. F. Nye, *Physical properties of crystal*, Oxford University Press, London, 1964, 112
- 5 J. D. Foster, L. M. Osterink, *Appl. Phys.*, **41**, 3656(1970)