

超半口径补偿剪切干涉法测量 脉冲激光波面半径

徐德衍 戴名奎 沈卫星 蒋玉柱
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 针对当前对脉冲激光波面半径测量缺乏有效的测试方法,提出了集大错位与等光程于一体的四平板剪切干涉法,达到对脉冲激光波面半径的高精度测量。 R 值在 30~ 1000 m 的范围内,测量误差小于 $\pm 5\%$ 。

关键词 波面半径, 等光程, 剪切干涉

1 引 言

随着脉冲激光技术,特别是高功率激光技术的发展,对激光波面 R 值的测量技术与精度提出了新的要求。目前的测量方法对测量短脉冲激光存在一些问题。单平板剪切法和双平板剪切法是非等程剪切干涉法,用于测量短脉冲激光时,由于受相干长度的影响使干涉条纹对比度变差,甚至于没有干涉条纹;三板环路剪切干涉法实现了等程剪切干涉,但其剪切量受到分光板和反射镜口径的限制,另外三板调节两路相互干扰,不大方便,使用范围因此受到限制^[1]。

新提出的超半口径补偿剪切干涉法在实现等程剪切干涉的同时,能自由调节剪切量,且保持干涉场的大小不变。该方法所需的平板仅为环路干涉仪的分光板的一半或更小,却能达到同样的测量效果。此干涉仪尤其适用于大 R 值短脉冲激光波面的测量。

2 原 理

超半口径补偿剪切干涉法吸取了双平板自由调节剪切量的优点,采用补偿的方法实现等程干涉。光程补偿四平板剪切干涉法是根据此原理设计的几种方案中的一种,图 1 为它的示意图。

两波面之间的重叠情况见图 2。

重叠的两波面之间的光程差可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{\left[x - x_0 + \frac{s}{2} \right]^2 + (y - y_0)^2}{2R} - \frac{\left[x - x_0 - \frac{s}{2} \right]^2 + (y - y_0)^2}{2R} \\ &= \frac{s}{R}x - \frac{s}{R}x_0 \end{aligned} \quad (1)$$

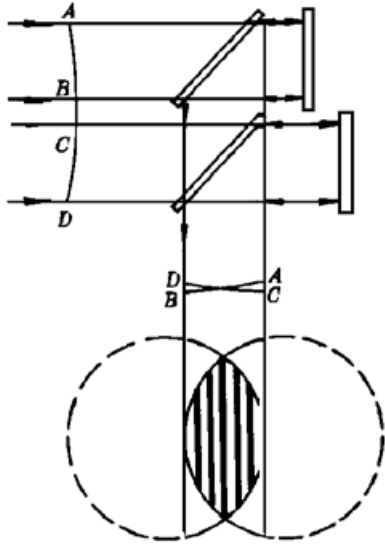


图 1 四平板剪切干涉光学原理示意图

Fig. 1 Optical schematic of a four-plate shearing interferometer

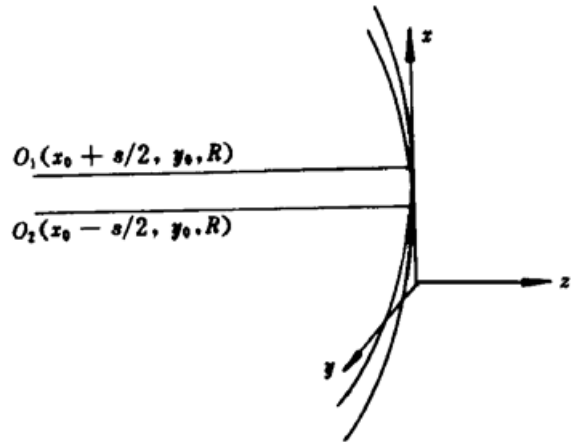


图 2 两波面重叠示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-wavefront overlapping

公式(1)中第二项与干涉条纹疏密无关,仅是光程差常数。由于 s/R 一般小于 0.001,所以该项引入的光程差一般小于 0.1 mm,即使是 1 ps 的脉冲激光也可以干涉。忽略第二项,且令 $x = b$ (b 为剪切干涉条纹间距),则(1)式可改写为

$$R = \frac{sb}{\lambda} \tag{2}$$

3 实 验

围绕着对大 R 值激光波面的高精度测量和实现短脉冲激光的高对比度的干涉,我们用四平板剪切干涉仪展开了以下一些实验工作。

3.1 用 He-Ne 连续激光分析四平板剪切干涉仪测量精度

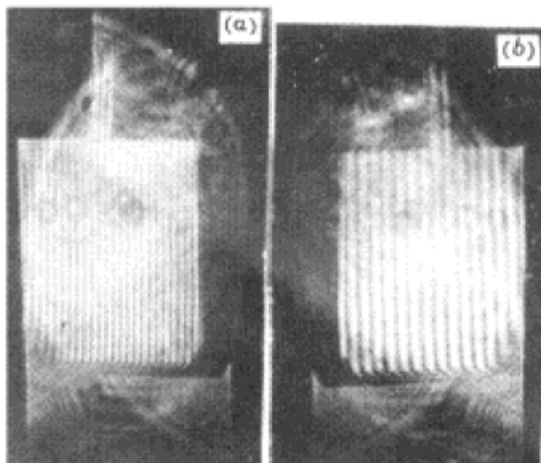


图 3 使用 He-Ne 激光时的剪切干涉条纹
(a) $R = 59.4 \text{ m}$; (b) $R = 95.6 \text{ m}$

Fig. 3 Fringe of shearing interference using a He-Ne laser. (a) $R = 59.4 \text{ m}$; (b) $R = 95.6 \text{ m}$

图 3 (a), (b) 分别是 R 值为 59.4 m 和 95.6 m 激光波面的剪切干涉图。测得图 3 (a) 的条纹间距 $b_1 = 1.082 \text{ mm}$, 图 3 (b) 的条纹间距 $b_2 = 1.795 \text{ mm}$ 。剪切量 $s = 33.2 \text{ mm}$, 激光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。由(2)式可得

$$R_1 = \frac{sb_1}{\lambda} = 56.8 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{sb_2}{\lambda} = 94.2 \text{ m}$$

测量的百分比误差分别为 4.4% 和 1.5%。误差的主要来自于条纹的分辨、零场的调节与判断和剪切量的测量。下面以剪切量 $s = 100 \text{ mm}$, 干涉场宽度为 50 mm, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时的情况为例,分析四平板剪切干涉仪的测量精度。

3.1.1 条纹的分辨误差

在相同宽度的干涉场内, 条纹越少, 由条纹分辨引入的百分比误差越大。对于 $R = 1000 \text{ m}$ 的激光波面, 干涉场内可以观察到 4.7 条干涉条纹, 令可分辨到 $1/5$ 条纹, 则由条纹分辨引入的百分比误差为 4.3%, 如果作 9 次测量平均, 百分比误差为 1.4%。对于 R 小于 1000 m 的激光波面, 则由条纹分辨引入的百分比误差小于 1.4%。

3.1.2 零场的调节与判断误差

如果用 He-Ne 激光调零场, 零场一般可调到小于 $1/5$ 条纹。用调好的干涉仪来测量 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $R = 1000 \text{ m}$ 的激光波面, 由零场的调节与判断引入的百分比误差为 2.6%。对于 R 小于 1000 m 的激光波面, 由它引入的百分比误差小于 2.6%。

3.1.3 剪切量的测量误差

剪切量将采用对线测量, 误差将优于 0.5%。

3.1.4 其它误差

其它误差有条纹间隔测量读数误差及波长变化误差等, 由它们引入的误差小于 0.5%。

综上所述, 该干涉仪的测量误差小于 5%。

3.2 Nd·YAG 脉冲激光分析四平板剪切干涉仪的测量效果

图 4(a), (b) 分别是用 CCD 接收的 R 值为 59.4 m 和 95.6 m 的激光波面剪切干涉图。由于 CCD 没有定标, 不能得到实际的条纹间距, 但对于不同 R 值的激光波面剪切量 s 和 CCD 列阵宽度 L 不变, 则有

$$R = \frac{Ls}{n\lambda} \quad (3)$$

其中 n 为宽度 L 内的条纹数。图 4(a) 的条纹数 $n_1 = 4.2$, 图 4(b) 的条纹数 $n_2 = 2.7$ 。由(3)式可得

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Ls/n_1\lambda}{Ls/n_2\lambda} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{2.7}{4.2} \approx 0.64$$

而两个波面的真实 R 值之比为 0.62, 测量值与它相符。说明该干涉仪可以用于测量脉冲激光波面的 R 值。实际上, CCD 的定标并不困难, 因此得到波面 R 值不成问题。

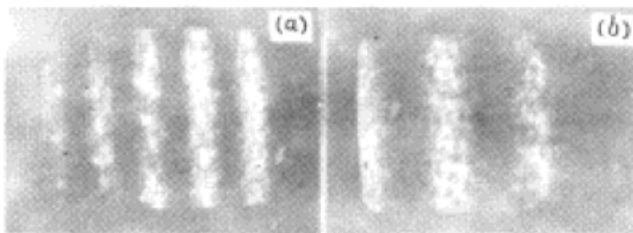


图 4 使用 Nd·YAG 激光时的剪切干涉条纹

(a) $R = 59.4 \text{ m}$; (b) $R = 95.6 \text{ m}$

Fig. 4 Fringe of shearing interference using a Nd·YAG

laser. (a) $R = 59.4 \text{ m}$; (b) $R = 95.6 \text{ m}$

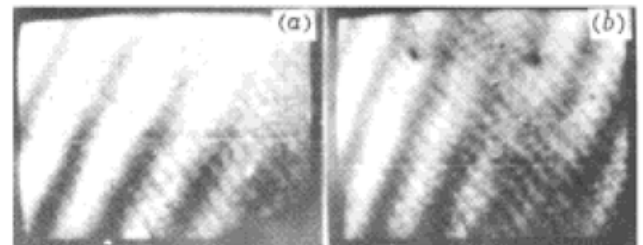


图 5 使用 Q 调制激光时的剪切干涉条纹

Fig. 5 Fringe of shearing interference using a

Q-switched laser

3.3 纳秒级调 Q 脉冲激光 ($\lambda = 1.06 \text{ m}$) 的剪切干涉条纹的对比度研究

图 5(a), (b) 为 CCD 接收的脉宽为 10 ns 的激光波面剪切干涉图, 条纹的对比度还算不错。实际上我们所用的扩束系统中的透镜有霉斑, 扩束的近准直光不够均匀, 而且四块平板的

反射率还不满足匹配要求,影响了条纹的对比度。只要在上述两个方面加以改善,就可以达到更好的剪切干涉条纹对比度。

4 结 论

超半口径补偿剪切法实现了用小口径达到大剪切,用等光程获得高对比度的干涉条纹的目的,满足了对短脉冲激光波面进行高精度测量的要求。用本干涉仪测量激光波面半径,误差小于 $\pm 5\%$ (R 值在 30~ 1000 m 范围内)。此方法还可用来测量透镜及反射镜的焦距。

致谢 本实验工作得到支婷婷、黄奎喜及李永春、顾圣如等同事们的大力支持和热情帮助,在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 徐德衍. 剪切干涉仪及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1989, 165~ 201

Large Shearing Interference in Equal Optical Path Measurement of the Laser-wavefront Radius of Curvature

Xu Deyan Dai Mingkui Shen Weixing Jiang Yuzhu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A novel four-plate shearing interferometer that can adjust shearing distance freely and work in equal optical path is presented. It is used in measuring the laser-wavefront radius of curvature particularly and the interferometric measurement error is smaller than $\pm 5\%$ (R : 30~ 1000 meters). It also can be used in measuring the focal length of optics.

Key words the laser-wavefront radius of curvature, shearing interference, equal optical path