

# 激光场相位分布的高精度测量\*

贾淑英 楼晓燕  
(中国科学院高能物理研究所)

赵润乔 叶桂木 唐仕稳 戴立盛  
(中国科学院电子学研究所)

## 提 要

本文介绍利用位移法测定光场的相位分布,测量精度可达 $1.5^\circ$ 。该法适合于高精度光学元件的无接触测量和其他特殊光场相位分布的测量。

## 一、位移法原理简述

图1为一个以激光为光源的双缝干涉装置。利用双缝干涉原理可立刻得到在第3点的合成光强

$$I = 4E_0^2 \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

而

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda D} x - (\theta_2 - \theta_1), \quad (2)$$

式中 $d, D, x$ 分别示于图1; $\theta_2, \theta_1$ 分别表示光场在点1和点2处的初相位。

当 $\theta_2 - \theta_1 = 0$ 时,零级干涉亮纹出现在原点处。

当 $\theta_2 - \theta_1 \neq 0$ 时,要得到干涉极大值,必须满足 $\delta = 0$ ,此时极大值位置为 $x_m$ 。

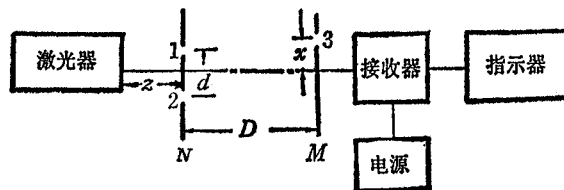


图1 位移法装置示意图

光源为 He-Ne 激光器,工作在  $TEM_{00}$  模,其输出功率为 2.5mW,功率稳定度为  $\pm 1\%$ ;双孔(孔1,孔2)的直径各为 0.03mm,间距为 0.06mm;孔3的直径为 0.02mm;接收器为 R562 型光电倍增管;光源为 FH-462B 高压直流电源;指示器为 AC15-1 型直流复射式检流计,灵敏度为  $3 \times 10^{-10}A/格$ 。

\* 1984年3月1日收到,1985年4月15日修改定稿。

$$x_m = \frac{\lambda D}{2\pi d} (\theta_2 - \theta_1).$$

也就是说,当存在初相位差时,干涉极大值的位置将发生位移,位移量  $\Delta x$  的大小为

$$\Delta x = x_m - 0 = x_m = \frac{\lambda D}{2\pi d} (\theta_2 - \theta_1). \quad (3)$$

当测量装置确定之后,则  $(\theta_2 - \theta_1)$  前面的系数为一常数  $\beta$ . 那么(3)式就可写成

$$\Delta x = \beta \Delta \theta \text{ 或 } x_m = \beta \Delta \theta. \quad (4)$$

(4) 式表明,初相位差的大小正比于干涉极大值的位移量. 如果能精确地测量出这个位移量,就可以精确地得到点 1 和点 2 的初相位差. 例如,适当选取结构参数  $d$  和  $D$ , 使系数  $\beta = 1\text{mm}$ , 这样,位移量的大小为  $0.01\text{mm}$  时,就表示  $\Delta\theta = 0.01\text{rad}$ , 即约为  $0.57^\circ$ . 测量相位差有这样的精度,是相当高的. 连续地改变点 1 和点 2 的位置就可以精确地确定光场在平面  $N$  上的相位分布. 这就是位移法测定光场相位分布的原理.

## 二、实际测量

**1. 原光束相位分布的测量** 利用图 1 的实验装置,首先测量工作在  $\text{TEM}_{00}$  模 He-Ne 激光束的相位分布. 选定被测截面  $N$  的位置之后(测量中取  $Z = 55\text{cm}$  的面),那么高斯光束在此平面上的相位分布就可以根据激光器的结构参数,等效共焦腔长的数值(实验中等效共焦腔长  $L = 30\text{cm}$ ) 计算出来. 计算方法是:把已知的  $Z$  和  $L$  代入高斯球面波半径公式,便可求出在  $Z$  处的球面波半径  $R^*$ ; 再通过简单的数学计算即可求得光束在  $N$  平面上的相位分布. 结果如图 2 的实线所示. 再利用位移法逐点测量该光束的相位分布. 结果如图 2 的虚线所示. 值得指出的是,位移法中确定干涉条纹极大值的位置,若采用直接测极大值点的方法,会引入较大的测量误差(约为  $5-6^\circ$ ),所以通常采用确定斜率变化最大点,即确定  $\delta/2 = \pi/4$  的位置来确定位移量  $\Delta x$ , 这是因为干涉极大值的位移量和斜率变化最大点的位移量是完全相等的,此法引入的测量误差仅为  $0.3^\circ$ .

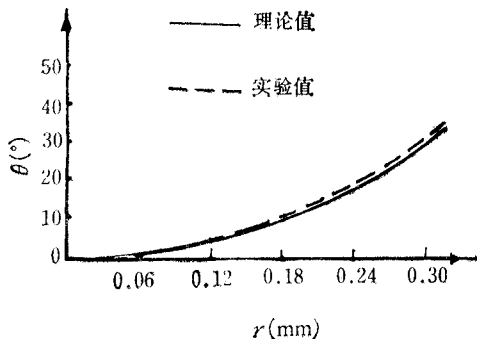


图 2 原光束相位分布

表 1

相位差 \ r(mm)	0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30
理论值	$0^\circ$	$1.4^\circ$	$5.7^\circ$	$12.8^\circ$	$21.5^\circ$	$35^\circ$
实验值	$0^\circ$	$1.8^\circ$	$6.1^\circ$	$13.8^\circ$	$23^\circ$	$36^\circ$

图 2 中的两条曲线是根据表 1 绘制的, 曲线表明, 理论计算值与实际测量值基本一致. 二者之间最大相差只有  $1.5^\circ$ , 相当于程差只有  $\lambda/240$ . 这样的测量精度可算是现有检测手段所获得的最高精度了. 如果测量装置再配备上精度更高的坐标系统、自动补偿

和微处理机, 则测量精度还可进一步提高。

**2. 标准平晶平面度的测量** 原则上可以利用已知相位分布的原光束去检测任意光学元件或组件的光学性质。特别是要求测量精度高, 并且要求非接触测量的场合, 利用本文介绍的方法更为适合。具体步骤如下: 测量时, 把被测样品插入光路(可以是透射形式, 也可以是反射形式), 这将使光场的相位分布发生变化。然后, 采用与测量原光束相位分布同样的方法, 便可精确地测量出发生变化后的光场相位分布。把测得的相位分布与原光束的相位分布相比, 其差就表示被测样品的光学质量。

平面度是标准平晶的重要光学性质, 我们利用上述方法测量了两块标准平晶的平面度。实验中, 样品都以反射形式插入光路。测得结果如图 3 所示。

通常是用光圈数来表示平面度。根据光圈数定义, 程差为  $\lambda$  时, 光圈数为 2。程差为  $\lambda$  即相位差为  $360^\circ$ 。因此, 平晶 1 的最大相位差为  $12.5^\circ$ , 就表示其光圈数为  $1/14.4$ ; 平晶 2 的最大相位差为  $18^\circ$ , 其光圈数为  $1/10.0$ 。利用平面干涉仪测量, 结果为: 平晶 1 的光圈数为  $1/12-1/15$ ; 平晶 2 的光圈数为  $1/8-1/10$ 。

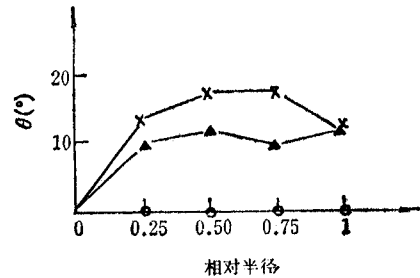


图 3

x — 平晶 2  
 ▲ — 平晶 1  
 ○ — 平面光束

### 三、测量误差分析

位移法公式(4)表明相位差  $\Delta\theta$  仅决定于测得的位移量  $\Delta x$ , 而  $\Delta x$  的测量误差又决定于下列参量: (在  $\beta \approx 0.96\text{mm}$  的实验条件下)

- (1) 由于光强读数不准( $\pm 0.5$  格)引入的误差  $\Delta_I \approx \pm 0.2^\circ$ 。
- (2) 光强读数的零点漂移( $\pm 1$  格)引入的误差  $\Delta_0 \approx \pm 0.4^\circ$ 。
- (3) He-Ne 激光器输出功率稳定度引入的误差  $\Delta_L \approx \pm 0.25^\circ$  (在稳定度为  $\pm 1\%$  的条件下)。
- (4) 坐标读数不准( $\pm 0.005\text{mm}$ )引入的误差  $\Delta_x \approx \pm 0.29^\circ$ 。
- (5) 双孔屏的晃动引入的误差  $\Delta_a \approx \pm 0.3^\circ$ 。

$$\text{系统的总误差 } \Delta = \sum_i \Delta_i \approx 1.5^\circ.$$

其他误差, 如  $Z$  值测量误差可忽略不计。值得指出的是, 在位移法测量中, 所测量的物理量是相对的相位差, 这样, 当  $N$  平面不完全垂直于光束而带有一小夹角  $\alpha$  时, 由于每次测量都含有角  $\alpha$ , 在求差值时都被消去, 所以不会引入测量误差。这一点对实际操作来说有着重要的意义, 因为不这样就要求严格的垂直, 或是引入较大误差, 都将使这一方法不能实用。为了提高测量精度, 误差分析中的第 1 项可以采用数字显示来消除人为读数误差; 还可以增强信号来改善读数的相对误差, 即信号越强读数误差引入的  $\Delta_I$  就越小; 误差分析中的第 2, 第 3 两项可以通过自动补偿系统使之大大降低; 第 4, 第 5 两项可以采用读

数更加精密、稳定性更好的坐标移动装置来改善。

#### 四、小 结

位移法测定相位分布有以下特点:

- (1) **高精度** 现有装置的测量精度达到  $1.5^\circ$ , 比常规的强度法<sup>[1]</sup>测量精度高 1—2 倍。
- (2) **可测量光场的二维相位分布** 本测量装置若配以微处理机不仅可以完成上述一维相位分布测量, 而且可以测量二维相位分布, 所以这一方法是检测光学系统的有力手段。
- (3) **无接触测量** 位移法测量光场相位分布时, 不需要接触被测元件, 是一种无损测量方法。对测量  $\lambda/16$  阶梯变化场、 $\lambda/4$  相位补偿器、突变相位区交界处的渐变情况等来说是非常重要的。
- (4) **应用范围广** 它可以测量透明和不透明材料的表面光学性质, 也可以测量透明材料整体的光学性质(包括界面和材料本身)。
- (5) **装置简单, 使用方便, 成本低廉** 该装置配备上微处理机后, 更适合于在高级光学加工方面应用, 如用于测量光学天文望远镜、高级显微镜、标准样板和标准平晶等, 还适合于在科研工作中用来快速、自动、准确地测量各种光场相位分布等。

#### 参 考 文 献

- [1] Н. К. Бергер и А. Дерюгин и А. В. Михеенко *ПТЭ*, №1, 1978, стр.197—198.

### A HIGH PRECISION MEASUREMENT OF PHASE DISTRIBUTION FOR LASER FIELDS

Jia Shuying, Lou Xiaoyan

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

Zhao Runqiao, Ye Guimu, Tang Shiwen, Dai Lisheng

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

The phase distribution of laser fields is measured by displacement process. The precision of measurement is within  $1.5^\circ$ . This method is also available for uncontact measurement of precision optical elements.