

利用相移片实现激光自准直的新方法*

杜春雷

(中国科学院光电技术研究所, 微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

R. E. Kunz J. Söchtig

(PSIZ, Badernerstrasse 569, CH-8048 Zurich, Switzerland)

G. Hausler

(Phys. Inst. Univ. Erlangen, Germany)

摘 要 介绍两种实现激光自准直的方法和实验. 阶梯相移片法的特点在于巧妙地利用相移片对入射光进行调制, 实现高精度激光自准直和角度的测量; 微点相移片法是比较入射光与反射光通过相移点的衍射图形, 达到激光自准直的目的. 用夫琅和费标量衍射理论分析和计算了激光经过两种相移片调制后的光能分布, 并对制作公差进行了讨论.

关键词 相移片, 自准直.

1 引 言

在很多光学测量实验中, 都希望准确知道入射激光与被测样板表面的角度关系, 如果入射光与被测样板表面反射光重合, 认为该系统处于自准直状态, 否则入射激光与样板表面法线存在一角度 ψ . 由于一些实验具有特殊要求: 如测量衍射光栅周期, 分析集成光学平面波导传感器结构参数, 测量光学平面波导导模的谐振角等, 对入射光与样板表面法线的角度 ψ 的测量非常重要, 这里, 激光光源是由实验决定的, 不能由其它光源来代替, 因此, 传统的自准直仪是不适用的. 而用目视法直接观察反射光与入射光的重合, 其精度只能到 $2'$ 左右, 无法满足一些高精度测量的要求. 文中研究的阶梯相移片法和微点相移片法, 利用相移片对高斯激光光束的调制, 实现角度和高精度自准直测量. 且方法简单, 对光学系统无影响.

2 阶梯相移片法

2.1 原 理

当入射激光通过一个具有相位差 π 的阶梯相移片时, 由于部分入射光的相位差增加了 π , 使这一部分的电场符号改变, 出射光振幅 E 被调制, 如果调节入射光的中心落到相移片的

* 本课题得到中国科学院留学生基金及中国科学院光电技术研究所所长基金资助。

收稿日期: 1993年10月15日; 收到修改稿日期: 1994年1月4日

阶梯直边上,那么,出射光强度 I 被一衍射极小值分成两个相等部分,而衍射极小值恰好对应阶梯相移片的直边,如图 1(a)所示。调制了的光由样板反射并再次通过相移片,为了测量样板倾角,决定自准直位置,使直边的象与衍射极小值同时在探测器上成象,这里,借鉴了文献[1]的处理方法,角度的变化由线量精确的测量,角度 ψ 为:

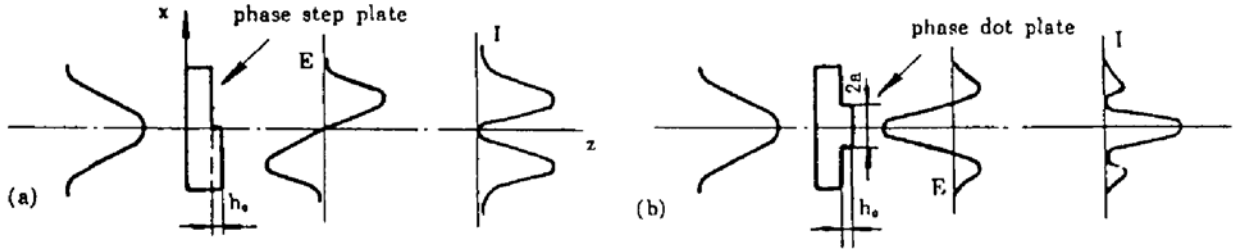


Fig. 1 Phenomena of the laser beam passing through phase shifting plate

$$d = m \times L \times \tan(2\psi) \quad (1)$$

式中 ψ 为样板的倾角, m 为成像系统的放大倍数, L 为相移片到样板的距离, d 为衍射极小值与直边象的位置差。如果反射光的极小值与直边重合,则 $d = 0$, $\psi = 0$,即为系统的自准直状态。相移片对所通过光调制的物理过程可用夫琅和费标量衍射理论模拟,计算了由相移片所调制的强度分布。由于高斯光束的场分布可表示为:

$$U(x, y) = U_0 \exp[-(x^2 + y^2)/D_0^2] \quad (2)$$

当 $x^2 + y^2 = D_0^2$ 时, $U = U_0/e$, D_0 为 $U = U_0/e$ 处的光束直径,相移片的透射函数 $t(x)$ 可以表示为:

$$t(x) = \exp[j\Phi(x)] = \begin{cases} -1 & \Phi(x) = \pi \\ +1 & \Phi(x) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi(x) = 2\pi(n-1)h_0/\lambda = \begin{cases} \pi & x < 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$\Phi(x)$ 为阶梯相移片产生的相位差, h_0 为阶梯相移片的厚度差, n 是透明材料的折射率。经过相移片的光场分布变为:

$$U_1(x, y) = U(x, y)t(x) \quad (5)$$

在观察面的任意点 (x_1, y_1) 的振幅分布 $U_1(x_1, y_1)$ 可表示为(5)式的傅里叶积分^[2]:

$$\begin{aligned} U_1(x_1, y_1) &= K \iint U_0 \exp[-(x^2 + y^2)/D_0^2] t(x) \exp[-2\pi j/\lambda z (xx_1 + yy_1)] dx dy \\ &= U(f_x, f_y) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $f_x = x_1/\lambda z$, $f_y = y_1/\lambda z$ 。图 2 是光通过相位差分别为 $0, \pi, \pi/2, 5\pi/4$ 的相移片的强度分布,图中 $\Phi = 0$ 对应不受调制直接传播的高斯光束; $\Phi = \pi$ 时,强度分布被调制成对称相等的两部分,其极小值对应相移片的直边;当 $\Phi = \pi/2, \Phi = 5\pi/4$ 时,可以看到极小值位置发生偏移,若设相位差偏离 π 的量为 Δ ,则强度分布极小值的偏移量 ΔI 与 Δ 成正比。结果表明,只有当相移片的相位差 π 时,在自准直状态,强度极小值才能准确地与相移片直边相对应,并满足(1)式的关系,利用极小值与直边象之间的相对位置可以精确地测量样板的倾斜角 ψ ,如果相位差为 $\pi \pm \Delta$,由于极小值移动 ΔI ,使对准引起误差。当相位差为 $\pi \pm 2^\circ$ 时,引进的角测量误差为 $\pm 1.5''$,这给阶梯相移片的制作质量提出了一定的公差要求。相移片制作时的刻蚀深

度 h_0 为：

$$h_0 = \lambda\Phi(x)/2\pi(n-1) \quad (7)$$

当 $\Phi(x) = \pi$ 时，则

$$h_0 = \lambda/2\pi(n-1) \quad (8)$$

式中， λ 为激光波长。对(7)式微分，可估算刻蚀深度引起的相位差变化。

$$\Delta\Phi = 2\pi(n-1)\Delta h/\lambda \quad (9)$$

当 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ， $n = 1.62$ ， $\Delta\Phi = \pm 2^\circ$ 时， Δh 的误差应在 $\pm 6 \text{ nm}$ 的公差范围内。

2.2 实验与测量结果

实验装置如图 3 所示，激光光源(632.8 nm)在样板面上的直径为 3 mm。样板被固定在一个精密的转台上，转台由计算机控制实现角度的调节，调整精度为 $\pm 0.5''$ ，驱动用步进电机的分辨率为 $0.1''/\text{step}$ ，角度变化可由安装于轴上的编码器来测量并反馈给计算机，所需的信号由线阵 CCD 元件在象面上探测，敏感元件的尺寸 $7 \times 16 \mu\text{m}$ ，两象元之间距为 $5 \mu\text{m}$ ，经 A/D 转换器将实验数据送入计算机。

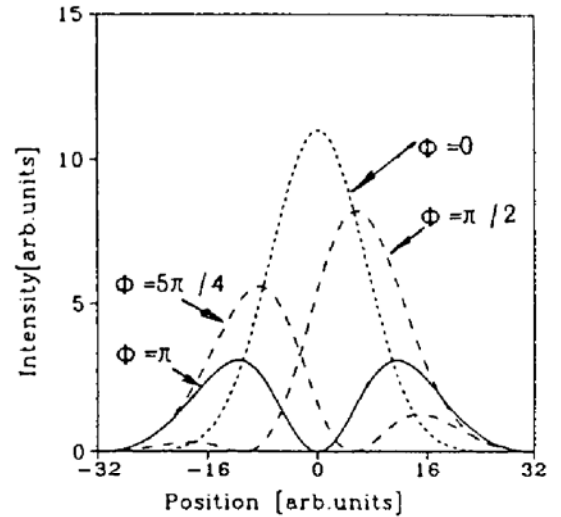


Fig. 2 Intensity distribution modulated by phase step plate

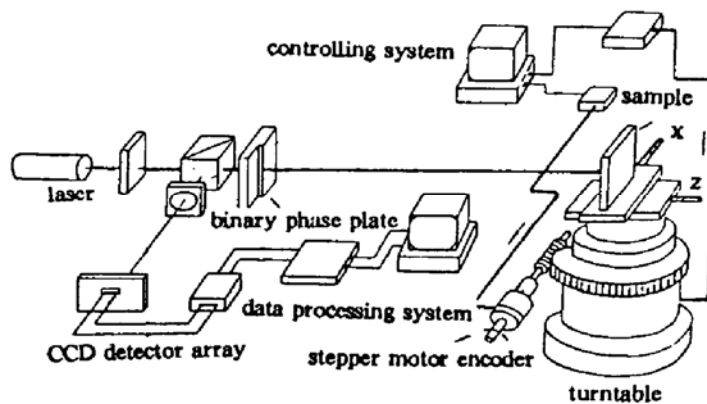


Fig. 3 Setup for laser beam autocollimation

自准直状态和样板的倾斜角 ψ 可由计算机决定。设 ψ' 为相对角系统，测量在 $\psi' = 0$ 处开始。实验步骤为：

- 1) 在样板倾斜时决定出直边象的位置 X'_0 ，见图 4(a)；
- 2) 用正弦模型函数拟合极小值，得到最小峰值点的位置 X' ；
- 3) 计算直边象和最小峰值之差 $d = X' - X'_0$ ，由(1)式可计算样板的倾斜角 ψ ；
- 4) 由计算机控制步进电机驱动转台，改变 ψ' ，找到 $d = 0$ 的位置，即为系统的自准直状态，见图 4(b)。

用上面的过程对角度进行扫描， ψ' 从 0 增加到 ψ^m ，其中有一个角度 ψ'_0 对应 $d = 0$ ，即自准直状态。用该方法测量偏角，在 $\pm 50''$ 的范围内能保证测量精度。图 5 所示的 3 条曲线是用同样的过程在不同的时间下测得的，其重复性 $< \pm 1''$ ，实验发现，相移片在光路中的位置对

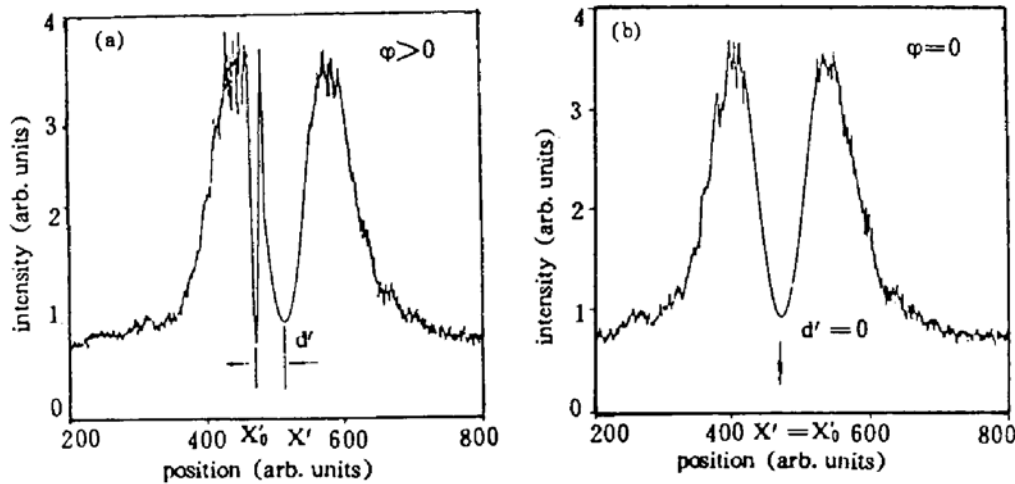


Fig. 4 (a) Minimum is away from the image of the edge, (b) Minimum is coincide with the edge

测量精度影响很小, 如果光束中心偏离直边 $\pm 5 \mu\text{m}$, 由非对称引起的误差在 $\pm 1''$ 的范围。

3 微点相移片法

由于同种阶梯相移片只对一种波长适用, 变换波长, 或存在较大的刻蚀误差都会影响对入射光的相位差, 使极小值位置偏移, 引进测量误差。作者用微点相移片代替系统中的阶梯相移片, 避免了上述缺点得到了一种二维激光自准直方法, 相移点是一直径 $400 \mu\text{m}$ 左右与周围相位差 π 的圆点, 见图 1(b), 实验中, 激光光束通过片子中心的相移点, 并被其衍射形成衍射环, 被调制的光束由样板反射, 光束的中心部分再次经过相移点形成二次衍射图形, 第一次衍射图形与第二次衍射图形之间的位置关系表明了激光束与样板表面法线的角度关系。原则上, 该方法均可用相移型点和振幅型点来实现, 为了比较两种微点对光调制的情况, 仍用夫琅和费标量衍射理论对调制后的光强分布进行了模拟计算。

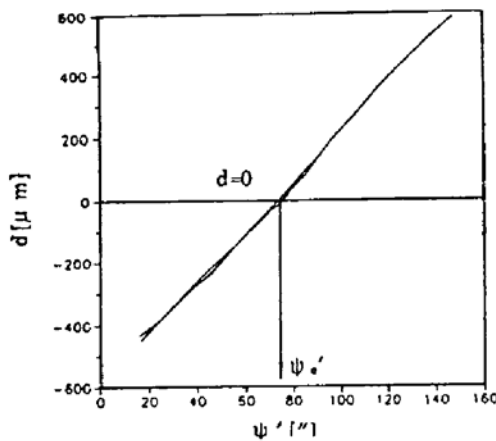


Fig. 5 curves $d \sim \psi'$ at the different time

对于振幅型点, 透射函数由下式表示:

$$t(x, y) = \begin{cases} 0 & x^2 + y^2 < a^2/4 \\ 1 & \text{其它情况} \end{cases}$$

对于相移型点, 透射函数与厚度差 h_0 有关, 即:

$$t(x, y) = \begin{cases} \exp(j\Phi) = -1 & x^2 + y^2 < a^2/4 \\ 1 & \text{其它情况} \end{cases}$$

式中 $2a$ 为点的直径。图 6 给出了经两种微点所调制的光的强度分布, 很明显, 在由相移点调制的衍射能量分布中, 零级与第一级极小之间的对比度很好, 并几乎无其它次峰, 这样, 在零级和一级之间形成特别暗的区域, 从而提高了信号的测量精度和灵敏度, 由振幅型点所调制的光强度的对比度则很差。把两种点分别放到实验系统中, 由于振幅型点的衍射环对比度极差, 无法进行信号比较, 而合适尺寸的相移型点衍射环对比度很好适于信号比较和测量。

相移点的制作方法与阶梯相移片相同。微点的尺寸主要取决于激光束直径, 实验中发现, 微点尺寸可为激光束直径的 $1/12 \sim 1/7$ 之间, 当入射点激光直径 $d_s = 3 \text{ mm}$ 时, 如取相移点直径 $2a = d_s / 7.5 = 0.4 \text{ mm}$, 得到较好的实验结果。在图 3 的实验系统中, 接收面处放一

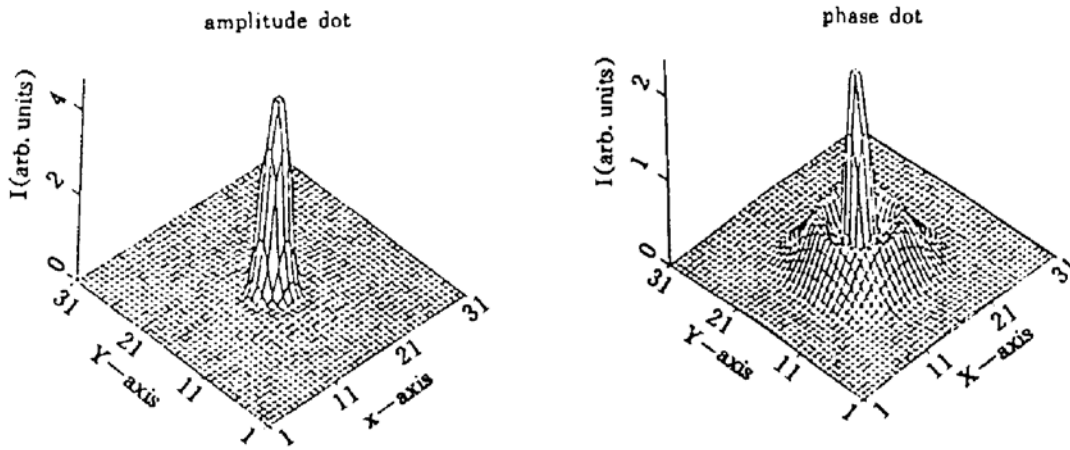


Fig. 6 (a) Intensity distribution modulated by amplitude dot
 (b) Intensity distribution modulated by phase dot

CCD 像机，图 7 是在不同的角位置下，像机得到的两衍射图形的相关结果，目视调节精度优于 10"，也可以用计算机识别法更加准确地测量入射激光与样板表面法线的二维角度值。

相移点相对与入射光直径太小或太大，都会影响衍射环能量分布，使测量精度下降。

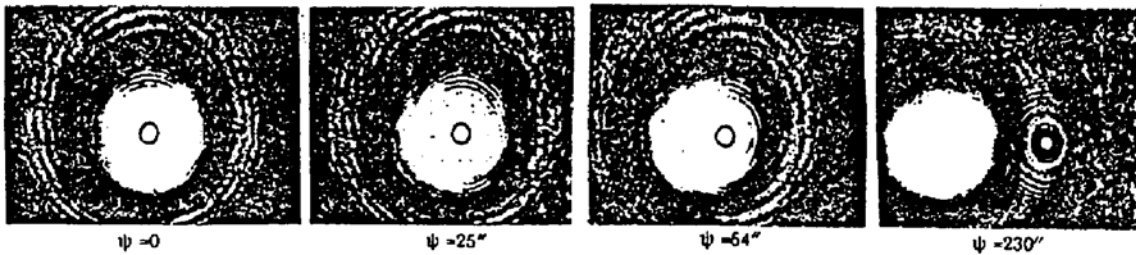


Fig. 7 Results got by phase shifting dot

结 论 本文提出了两种用于激光自准直的新方法，分析了阶梯相移片和微点相移片对高斯光束调制的物理过程并用标量衍射理论计算了光被两种相移片调制的能量分布；两种方法在实验中都得到了很好的应用。阶梯相移片法的优点是结果的数据处理方法简单，工作距离为 500 mm 时，精度可达到±3"，并且对光束直径的变化不敏感，缺点是不适于变化的波长。微点相移片法的优点是适于目视测量，精度可达±10"，对波长变化不敏感并可实现二维测量，对制作公差要求不高；缺点是不适于光束直径的变化，数据处理量大。

致谢：该文介绍的工作得到了微细加工光学技术国家实验室林大键研究员，邬纪泽先生以及瑞士联邦 PSIZ 实验室 C. Appassito, M. T. Gale, G. K. Lang, H. Schutz 和 J. Raynor 等同事的协助。

参 考 文 献

[1] H. Wolter, Die Minimumstrahlkennzeichnung als Mittel zur Genauigkeitssteigerung Optischer Messungen and als methodisches Hilfsmittel zum Ersatz des Strahlbegriffes. *Ann. Phys.*, 1950, 7(6) : 341
 [2] J. W. 顾德门, 傅里叶光学导论. 北京, 科学出版社, 1979 : 68

New Methods for Laser Beam Autocollimation Using Phase Shifting Plate

Du Chunlei

(The State Lab for Optical Technologies on Microfabrication)

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209)

R. E. Kunz J. Sochtig

(PSIZ Badenerstrass 569, CH-8048 Zurich, Switzerland)

G. Hausler

(Phys. Inst. Univ. Erlangen, Germany)

(Received 15 October 1993; revised 4 January 1993)

Abstract Two methods and their experiments for laser beam autocollimation are introduced, the phase step method is based on spatially modulating the incident laser beam by a phase step plate; and the phase dot method, by passing through the phase dot, the diffraction phenomena of both incident beam and reflected beam are utilized. The intensity distribution modulated by both phase shifting plate are analyzed based on Fraunhofer scalar diffraction theory. The experimental results are presented as well.

Key words phase shifting plate, autocollimation.