

一种新型横向剪切发生器

刘晓军¹ 章明² 周莉萍¹ 李柱¹

(1 华中理工大学机械学院 武汉 430074)

(2 中原大学机械系 台湾中市)

摘要 介绍一种新型横向剪切发生器,它利用各向异性晶体的双折射特性研制而成,能实现完全共光路、分步相移和剪切量的连续可调。实验测试结果及其成功应用证明了其理论设计的正确性。

关键词 剪切干涉 横向剪切 发生器

1 前言

横向剪切干涉原理在光学测试领域占有重要地位,并已被广泛应用于光学元件、光学系统、气体和液体扩散流动现象等方面的测试,在自适应光学、光学扰动分析以及激光波前分析等方面的应用研究越来越多。剪切干涉的主要优点在于它是原待测波与其自身产生一横向剪切后的波相干涉,不需另外引入参考波,因而不需配备高精度参考镜。同时剪切干涉解决了其它干涉测量方法中,待测波前与参考波面间偏离大时,干涉条纹过密而使测量分辨率低的问题。

剪切干涉中的核心元件是剪切发生器,因此,剪切干涉测量研究的关键就是剪切发生器的研制。已有的剪切发生器有 Fresnel Lens, Double grating Lateral Shearing Generator, Birefringent Lens 和平行平板等等。本文介绍一种新型横向剪切发生器,它利用各向异性晶体的双折射特性研制而成,使干涉仪能实现完全共光路和分步相移干涉,结构简单,有较好的抗干扰性、稳定性和可靠性。

2 横向剪切干涉原理

横向剪切干涉是将待测波前分成两束,其中一束光波为待测波侧移一小量而成,作为参考

光波;另一束即待测光波。这两束光波相互干涉产生干涉条纹,此即为横向剪切干涉。图 1 示出了横向剪切干涉原理。当带有被测面形信息的光波由剪切发生器横向剪切分开成距离为 s 的两束光 B_1 和 B_2 时,这两束光将在重叠区产生干涉。设原始光波 B_1 波前为 $w(x, y)$, B_2 波前为 $w(x - s, y)$, 重叠区干涉强度为

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos(k \Delta w(x, y) + d);$$

其中, $\Delta w(x, y) = w(x, y) - w(x - s, y)$; $k = 4\pi/\lambda$; d 为剪切产生过程中,两束光的光程差。 $I_0(x, y)$, $I_1(x, y)$ 分别是平均光强和调制光强。

事实上, $\Delta w(x, y)$ 是被测波前 $w(x, y)$ 在剪切方向的斜率,一旦通过对剪切干涉图的分析确定了 $\Delta w(x, y)$, 则 $w(x, y)$ 可由下式确定:

$$w(x, y) = \frac{1}{s} \int \Delta w(x, y) dx$$

从而测得待测波前。

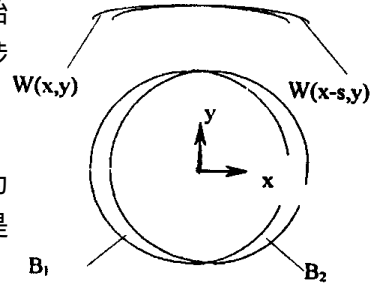


Fig. 1 Principle of shear interference

3 新型横向剪切发生器设计

与光通过玻璃时不同,光在通过冰洲石、石英等各向异性晶体时,有两条折射光线。这就是各向异性晶体的双折射特性。各向异性晶体产生双折射,是由于任意方向的入射光进入晶体后,其振动面相互垂直的两个偏振分量在晶体内有着不同的传播速度,从而有着不同的折射率,于是原入射光分成两束偏振方向相互垂直的出射光。

折射率面能很好地表示晶体的双折射特性。晶体的折射率面是将其双折射率值直接在入射波波法线方向上以一定长度的线段表示出来的双壳面。图 2 为单轴晶体的折射率面,它由一个球和一个以 x_3 为轴的旋转椭球面构成:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = n_0^2$$

$$\frac{x_1^2}{n_0^2} + \frac{x_2^2}{n_0^2} + \frac{x_3^2}{n_e^2} = 1$$

第一式所表示的半径为 n_0 的球面,说明在单轴晶体中,沿任一方向入射光束的两个偏振分量中,总有一个分量的折射率与方向无关,其值为 n_0 ,这就是 o 光, o 光的折射率曲面是个球面。第二式所表示的旋转椭球面,说明另一个分量的折射率与波法线方向和 x_3 轴的夹角有关,这就是 e 光, e 光的折射率曲面是个以 x_3 为旋转轴的椭球面。当光线沿椭球面旋转对称轴 x_3 入射时, o 光和 e 光折射率都为 n_0 , 不分开。这个方向称为晶体的光轴。沿光轴方向传播的光线只有一个折射率,光轴方向允许任何偏振态的光以同样的折射率 n_0 传播。其它方向 o 光和 e 光折射率则不同。

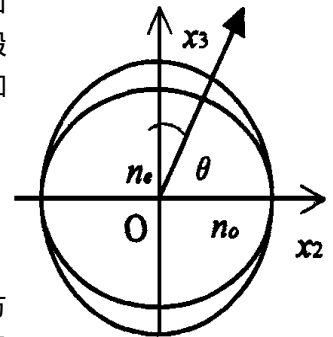


Fig. 2 Refraction index ellipsoid for crystal

由上所述,一束光入射晶体时其偏振方向相互垂直的两个偏振分量,将分别以不同的折射

率折射, 从而分成两束。据此我们可以很方便地实现带信息光波的横向剪切。

为实现剪切量 0 到较大范围内的连续可调, 并尽可能提高入射角与剪切量的线性关系, 我们采用负单轴冰洲石晶体, 其 n_o 与 n_e 差值较大, 并将发生器结构设计成这样一种形式: 如图 3 所示, A、B 为晶体的两互相平行的工作面, h 为晶体厚度, 晶体光轴方向垂直于纸面平行于工作面。

当一束光以 θ 角从 A 面入射晶体时, 根据冰洲石的折射率椭球特性, 这束光沿垂直和平行纸面方向振动的两个偏振分量将分别以大小为 n_o 和 n_e 的折射率折射 (n_o 和 n_e 分别为冰洲石晶体折射率椭球的长半轴和短半轴), 在晶体内分成两束, 即 o 光和 e 光, 当此两束光从 B 面射出时, 则成为振动方向互相垂直, 传播方向互相平行的两束平行光, 两束光平行距离为 s :

$$n_o \sin \theta_o = \sin \theta$$

$$n_e \sin \theta_e = \sin \theta$$

$$s = h(\tan \theta_o - \tan \theta_e) \cos \theta \quad (1)$$

s 即为剪切发生器产生的剪切距离。由(1)式可以看出, s 不但跟晶体设计厚度 h 有关, 同时与入射角 θ 有关。在应用剪切发生器过程中, 可通过调整其工作面与传输轴的夹角 θ 来调整剪切量, 达到调整干涉仪灵敏度的目的。

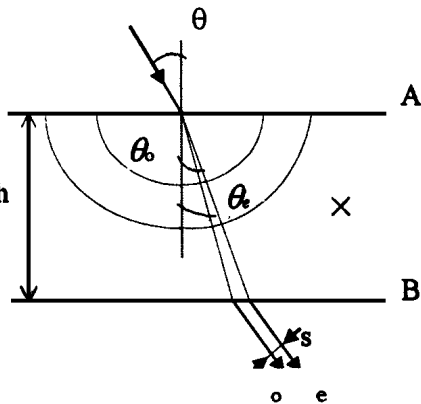


Fig. 3 Principle of generator

4 剪切量测量结果

图 4 是横向剪切发生器剪切量测试装置。激光器发出的光经扩束准直, 进入旋转三透镜(Axicon), 成为一束高准直度、光束直径小于 $5\mu\text{m}$ 的无衍射光, 此光束经剪切发

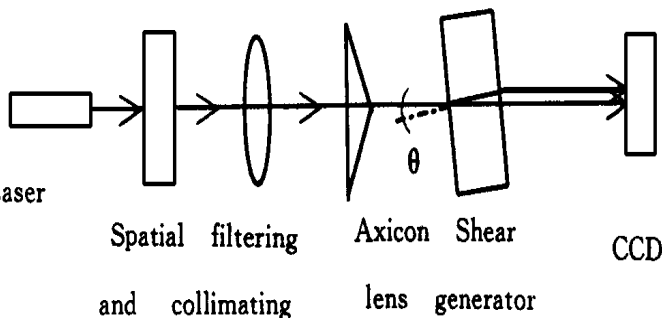


Fig. 4 Measuring device for shear generator

生器分成相互平行的两束剪切光, 由 CCD 探测两束光的间距。

调整剪切发生器倾角 θ , 分别测出两束光剪切间距, 将实际测量结果与理论计算值相比较。如表 1 示, 可以看出, 误差小于 8%, 表明理论设计是正确的。

Table 1

| θ | 5° | 10° | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° |
|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| theory data | 78.51 | 156.80 | 234.56 | 311.31 | 386.22 | 458.10 | 525.16 | 584.96 |
| actual data | 83 | 168 | 231 | 322 | 420 | 462 | 532 | 564 |

5 新型剪切发生器在剪切干涉中应用

(1) 新型剪切发生器的相移实现

由双折射晶体剪切发生的两束剪切光,是振动方向互相垂直的两束线偏振光,在其后面放置一检偏器,即可实现剪切干涉。

采用相应于偏振干涉的相移法,在剪切发生器 SP 与检偏器 P_1 之间加入 $1/4$ 波片,通过驱动 P_1 绕轴线旋转与垂直振动方向的夹角 α ,即能实现多步相移调制,原理如图 5。

由剪切发生器剪切产生的两偏振态正交的剪切波面经 $1/4$ 波片后形成两旋转方向相反的圆偏光:

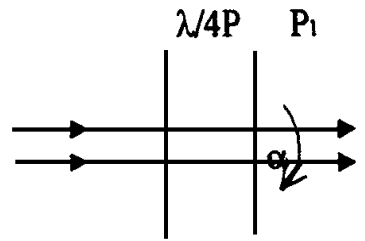


Fig. 5 Principle of phase shifting

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} A_1 \exp[ik\omega(x+s, y)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} A_2 \exp[ik\omega(x, y)] \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix}$$

再经过透光轴与 x 轴成 α 角的检偏器 P_1 , 则

$$E'_1 = e^{i\alpha} \frac{1}{\sqrt{2}} A_1 \exp[ik\omega(x+s, y)] \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

$$E'_2 = e^{i\alpha} \frac{1}{\sqrt{2}} A_2 \exp[ik\omega(x, y)] \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

于是,通过检偏器后合成光振幅

$$E = E'_1 + E'_2$$

$$= \left\{ e^{i\alpha} \frac{1}{\sqrt{2}} A_1 \exp[ik\omega(x+s, y)] + e^{i\alpha} \frac{1}{\sqrt{2}} A_2 \exp[ik\omega(x, y)] \right\} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

令

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} A_1, a_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} A_2$$

则

$$E = \left\{ a_1 \exp[ik\omega(x+s, y)] + a_2 \exp[ik\omega(x, y)] \right\} e^{i\alpha} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

$$I = E \cdot E^* = a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \cos[k\Delta\omega - 2\alpha]$$

$$\Delta\omega = \omega(x+s, y) - \omega(x, y) = \frac{\partial \omega}{\partial x} s$$

故通过调整 α 角可实现相位调制。

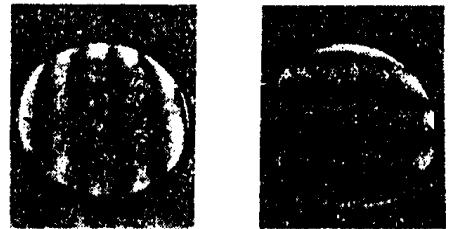


Fig. 6 Shearing interference graphs in x, y direction

(2) 新型剪切发生器应用

利用此横向剪切发生器对一球面镜进行面形测量, 得到 x, y 两方向的剪切干涉图如图 6 示, x 方向四步相移干涉图如图 7 示。图 8 为波前拟合重建后得到的球面镜轮廓图。

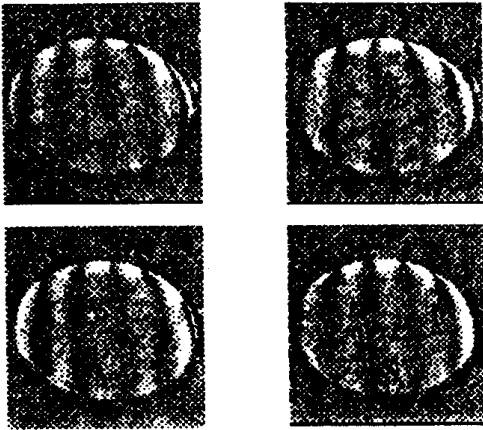


Fig. 7 Phase shifting interfering graphs in x direction

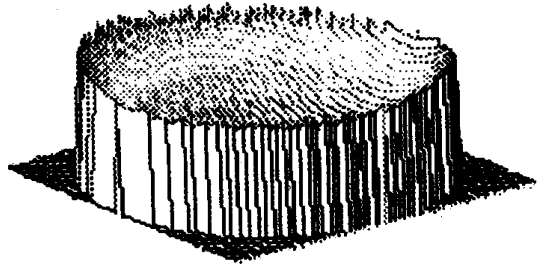


Fig. 8 Contour of measured lens

6 结 论

本文介绍的新型横向剪切发生器, 利用各向异性晶体的双折射特性研制而成, 能实现完全共光路、分步相移和剪切量的连续可调, 以此为剪切发生器的剪切干涉仪结构更为简单, 性能更为稳定, 抗干扰性更强。

参 考 文 献

- 1 Leibbrandt G W R, Harbers G, Kunst P J. Wavefront analysis with high accuracy by use of a double grating lateral shearing interferometer. *Applied Optics*, 1996, 35(31): 615
- 2 Cho Woo Jong, Kim Seung Woo. Stable lateral shearing interferometer for production line inspection of lenses. *Opt Eng*, 1997, 36(3): 890900
- 3 廖延彪编. 物理光学. 北京: 电子工业出版社, 1986
- 4 Malacara D. Common path interferometers. in *Optical Shop Testing: 2nd ed.* Wiley, New York: Wiley interscience, Publication, 1992
- 5 Kot hiyal M P, Delisle C. Shearing interferometer for phase shift interferometry with polarization phase shifting. *Applied Opt*, 1985, 24: 44394442
- 6 Hiroshi Kadono, Nobukatsu Takai. New common path phase shifting using a polarization technique. *Appl Opt*, 1987, 26: 898904
- 7 Harbers G, Kunst P J, Leibbrandt G W R. Analysis of lateral shearing interferograms by using of Zernike polynomials. *Applied Optics*, 1996, 35(31)
- 8 张青, 赵斌, 范光照, 李柱. 无衍射光束在直线度误差测量中的应用. *华中理工大学学报*, 1997, 25(9): 1~3

A New Lateral Shearing Generator

LIU Xiao Jun¹, ZHANG Ming², ZHOU Li Ping¹, LI Zhu¹

(1 *School of Mechanical Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)
(2 *Department of Mechanical Engineering, Zhongli, Taiwan*)

Abstract

A new lateral shearing generator is introduced, which is developed in view of dual refraction character of some crystal. It can make the shearing interferometer achieve common optical circuit, phase shifting interfering and continuous adjusting in sensitivity. The design is proved to be correct in theory by measuring results.

Key words: Shearing interference, Lateral shearing, Generator

刘晓军 男, 1968年2月出生, 1990年哈尔滨工业大学精密仪器专业毕业, 1996年获华中理工大学测试技术及仪器专业硕士学位, 现为该专业在职博士生, 主要从事测试技术及仪器的研究工作。