

偏振条纹扫描干涉仪

伍 树 东

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文用位相物体偏振编码的观点,阐述了位相的偏振测量和干涉条纹的偏振扫描原理。文中指出了两类线偏振编码器的结构,提出了偏振条纹扫描小孔干涉仪,并详细分析了其原理、扫描误差及其修正。所提出的方法都得到实验的证实。

一、引 言

在现代光学检验中,由于精度要求的提高,传统的静态条纹分析已不能满足要求。自1974年J. H. Bruning^[1,2]提出了条纹扫描干涉仪,扫描干涉仪已成为检测高精度波面的重要手段。一般用改变干涉臂的光程来实现条纹扫描。在干涉场中一固定点 (x, y) 的光强随干涉臂的光程 l 的变化成正弦函数 $\{1 + \cos[\phi(x, y) - 2kl]\}$,通过光强的傅里叶分析求得位相 $\phi(x, y)$ 。为得到高精度的测量,必须精确控制 l 的改变。

目前条纹扫描干涉仪都是采用压电晶体改变光程。但由于压电晶体的非线性、滞后等给精确控制扫描带来困难。另一方面对有些干涉仪系统,不能采用这种改变光程的扫描方式。

二、偏振编码和偏振条纹扫描

在普通干涉仪中,位相的分布被编码成光强的分布,以干涉条纹形式表示。这种编码方式有其缺点:1)光强和 $\phi(x, y)$ 没有线性关系,而光强测量的精度并不高,使得 $\phi(x, y)$ 的测量精度不高;2)在光强的极值附近寻找条纹中心的位置,很不准确,故测量精度不会很高。因此强度编码对位相检测并不是最合理的方式。

可以设想,把 $(0, 2\pi)$ 的位相 $\phi(x, y)$ 编码为不同的偏振态,用Poincaré球面上极坐标 $(1, \theta, \psi)$ 表示,其中 θ 范围是 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, ψ 的范围是 $(0, \pi)$,如图1所示。由于偏振角 θ, ψ 均可用椭圆偏振光方法高精度测量^[3],因此可以很精确地确定位相 $\phi(x, y)$ 。例如在偏振方向编码小位移,可以高精度地测量微小位移^[4]。

本文只考虑把 $(0, 2\pi)$ 的位相 $\phi(x, y)$ 作 $\theta=0, \psi=\frac{1}{2}\phi(x, y)$ 的线偏振编码,也就是一个二维位相分布转化为二维的偏振方向分布。每一点的偏振态可用Jones矢量表示

$$\begin{pmatrix} \cos \psi(x, y) \\ \sin \psi(x, y) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

这种编码的特点是: 1) 场振幅分布是均匀的; 2) 各点的偏振角正比于该点的位相。

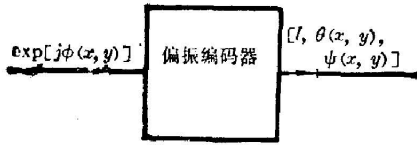


图 1 位相物体的偏振编码

Fig. 1 Polarization encoding of phase object

为检测这个编码场, 需用一检偏器。若检偏器的角度为 θ , 它与编码偏振光的方向的夹角为 $[\psi(x, y) - \theta]$, 按 Malus 定律, 检测的光强为

$$I(x, y, \theta) = \cos^2 \left[\frac{\phi(x, y)}{2} - \theta \right] \\ = \frac{1}{2} \{1 + \cos[\phi(x, y) - 2\theta]\}, \quad (2)$$

这也是干涉条纹形式, 但有一与检偏角有关的相移因子项 2θ 。 θ 的改变将引起干涉条纹的移动。故旋转检偏器即可达到条纹扫描的目的。这就是偏振条纹扫描的原理。

偏振条纹扫描的优点在于: 1) 由于检偏器的角度可以精密控制, 条纹扫描精度原则上可以很高; 2) 对于无法用改变干涉臂光程方法的干涉仪系统也适用。

三、两类线偏振编码器的结构

实现位相物体的线偏振编码的方法可归结为下述两类:

第一类的基本结构示于图 2。激光束经起偏器 P 和半反射膜 B 后, 被偏振光分束器 PBS 分为偏振方向互相垂直的两个分量: 一分量的偏振方向在分束平面上, 另一偏振方向与分束平面垂直, 而分束平面和 B 的入射面重合。两偏振分量经反射镜 M_1 、 M_2 反射回原光路, 再经 B 反射, 进入四分之一波片 Q 和检偏器 A 。偏振元件的方向是这样的, 起偏器 P 的方向使两偏振分量幅度相等, 而 Q 的快慢轴分别与两偏振方向成 45° 。

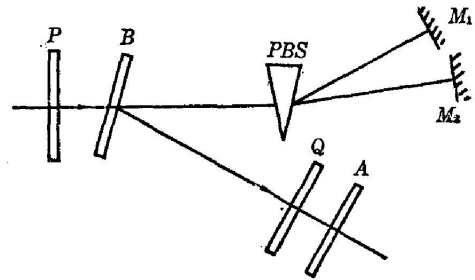


图 2 第一类线偏振编码器

Fig. 2 The first kind of linear polarization encoder

光束进入波片 Q 之前的场振幅可写为

$$\begin{pmatrix} \exp[j\phi(x, y)] \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 $\phi(x, y)/2$ 是两干涉臂的程差分布函数。通

过波片 Q 后, 两偏振分量分别被转化为旋转方向相反的圆偏振光, 可表为

$$\begin{pmatrix} j & 1 \\ 1 & j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp[j\phi(x, y)] \\ 1 \end{pmatrix} = \exp[j\phi(x, y)] \begin{pmatrix} j \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} \\ = 2 \exp\{j[(\pi/4) + (\phi(x, y)/2)]\} \begin{pmatrix} \cos[(\pi/4) + (\phi(x, y)/2)] \\ \sin[(\pi/4) + (\phi(x, y)/2)] \end{pmatrix}$$

可知这两圆偏振光合成为线偏振光, 其偏振角为 $[(\pi/4) + (\phi(x, y)/2)]$, 故实现了 $\phi(x, y)$ 的线偏振编码。

这类编码器需要一高光学质量的偏振光分束器 PBS 。这可用双折射晶体制作, 如双折射光楔、偏振棱镜等。此外半反膜 B 可能对不同偏振态引入不同相移, 这时应使它与波片 Q 一起的总效应等于一个四分之一波片。若使反射角减小, 则可避免 B 引起的偏振相差。

第二类线偏振编码器示于图 3。它是由一迈克尔逊干涉仪和起偏器 P ，检偏器 A 以及两个四分之一波片 Q_1 和 Q_2 组成。两波片的快轴(或慢轴)在光束分束器 BS 的入射面上,而起偏器的偏振轴与 BS 的入射面成 45° 。偏振光通过 Q_1 后分解为两个互相垂直的偏振分量。可以认为,其中一个分量,是一普通双臂干涉仪,而另一分量却受到两个四分之一波片的作用。故在检偏器之前的场振幅的 Jones 矢量可写为

$$\begin{pmatrix} 1 + \exp[j\phi(x, y)] \\ j\{1 - \exp[j\phi(x, y)]\} \end{pmatrix} = 2 \exp[j\phi(x, y)/2] \\ \times \begin{pmatrix} \cos[\phi(x, y)/2] \\ \sin[\phi(x, y)/2] \end{pmatrix}$$

这也是一线偏振态,偏振角为 $\phi(x, y)/2$ 。故也实现了线偏振编码。

在这类编码器中,唯一要求高光学质量的偏振元件是波片 Q_2 。石英波片或 Rhomb 板可达到较大的通光孔径。其它偏振元件 P 、 Q_1 和 A 并无高光学质量要求。

这两类编码器可用于不同形式的干涉仪系统中。

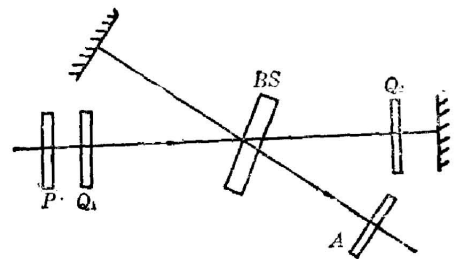


图 3 第二类线偏振编码器

Fig. 3 The second kind of linear polarization encoder

四、偏振条纹扫描小孔干涉仪

小孔衍射干涉仪^[5]由于其结构简单、使用方便、抗扰动能力强,而对测量会聚球面波十分有用。但也有其缺点,如光强受小孔衍射板衰减太大、干涉条纹对比度随波面离焦或倾斜而变化。此外压电条纹扫描方法不能用于完全共光路的干涉仪中。为了建立条纹扫描小孔干涉仪,必须寻找别的条纹扫描方法。上述的偏振编码方法,可用于偏振条纹扫描小孔干涉仪,并且可克服上述小孔干涉仪的缺点。

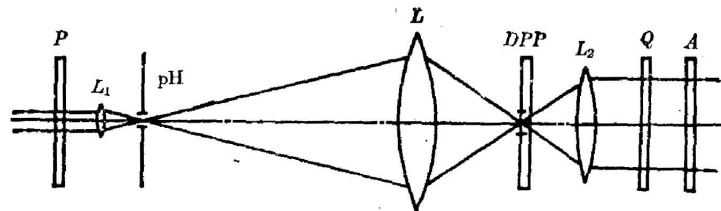


图 4 偏振条纹扫描小孔干涉仪

Fig. 4 Polarization fringe scanning PDI

其基本结构如图 4 所示。激光束通过起偏器 P , 经显微物镜, 针孔滤波, 被待测透镜 L 聚焦在焦平面上。偏振小孔衍射板 DPP 放置在该焦平面上。板是由带有一小孔的偏振膜构成。透镜 L_2 一方面使光束准直进入波片 Q 和检偏器 A , 另一方面把透镜 L 的孔径成像在观察平面上。

各偏振元件的方向安排如图 5 所示。 e_1 、 e_\perp 分别为偏振小孔板的偏振轴方向和消光方向。 e_1 、 e_2 分别为波片的快慢轴方向, 它们和 e_1 、 e_\perp 分别成 45° 。 P 为起偏器 P 的偏振轴

方向, 并与 e_1 成 α 角。A 为检偏器 A 的偏振轴方向, 并与 e_1 成 θ 角。(x, y) 为 L 的孔径平面上的坐标, (u, v) 为 L 的焦平面上的坐标。若 $\phi(x, y)$ 表示被测透镜的波差函数, $F(u, v)$ 表示它的孔径函数的傅里叶变换, 则在焦平面上的场振幅可用 Jones 矢量表示为

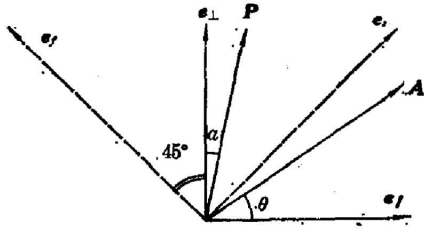


图 5 偏振元件的方向按排

Fig. 5 The orientation of the polarization components

$$F(u, v) \begin{pmatrix} [t_{\parallel} + (1 - t_{\parallel}) \text{circ}(\sqrt{u^2 + v^2}/a)] \sin \alpha \\ [t_{\perp} + (1 + t_{\perp}) \text{circ}(\sqrt{u^2 + v^2}/a)] \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 t_{\parallel} 、 t_{\perp} 分别为偏振小孔板的平行偏振和垂直偏振的振幅透射系数, a 为衍射小孔半径, $\text{circ}(r)$ 为圆函数。(4) 式中第一分量是平行偏振分量、第二分量是垂直偏振分量。通常

$$\begin{cases} t_{\parallel} \approx 1, \\ t_{\perp} \ll 1 \end{cases} \quad (5)$$

成立, 则(4)式可近似写为

$$F(u, v) \begin{pmatrix} t_{\parallel} \sin \alpha \\ \text{circ}(\sqrt{u^2 + v^2}/a) \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (6)$$

若小孔半径足够小, 则圆函数 $\text{circ}(\sqrt{u^2 + v^2}/a)$ 可近似为 δ 函数。在检测平面上, 场振幅应是(6)式的傅里叶变换(除无关重要的位相因子外), 即

$$\begin{pmatrix} t_{\parallel} \sin \alpha \exp[j\phi(x, y)] \\ a^2 F(0, 0) \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (7)$$

其中 $F(0, 0)$ 表示在小孔位置上的场振幅。(7)式中平行偏振分量与波差因子 $\phi(x, y)$ 有关, 代表被测波面, 而垂直偏振分量是常数, 代表标准波面。显然应调整角 α , 使得两者振幅相等, 即使 $t_{\parallel} \sin \alpha = a^2 F(0, 0) \cos \alpha$ 。这时(7)式便变为(3)式, 因而再经过波片 Q 后, 同样地转变为线偏振光, 构成了第一类线偏振编码器。通过旋转检偏器 A, 即可实现条纹扫描, 即偏振条纹扫描小孔干涉仪。

由于两干涉波的相对振幅可以用起偏角 α 调整, 故干涉条纹的对比度可调整到最大, 从而克服了条纹对比度随小孔位置而改变的缺点。又由于条纹扫描干涉仪可以在零级干涉条纹的条件下工作, 这样可使小孔对准焦斑的最强点, 从而大大增强干涉场的亮度, 缓和了小孔干涉仪光强衰减大的问题。此外, 该系统不需要大孔径的高光学质量偏振元件, 这对实际应用是重要的。

五、偏振条纹扫描的误差及其校正

原则上偏振条纹扫描可以高精度控制。实际上由于偏振元件的不理想, 将引入误差。但只要知道偏振元件的特性, 这种误差是可以校正的。

为了考虑不理想偏振特性的影响, 不利用近似条件(5), 而直接从(4)式出发, 保留圆函数为 δ 函数的近似, 经适当运算可求得通过波片后的场振幅为

$$\begin{aligned} & \exp[j\phi(x, y)] \left(\frac{\exp\{j(\pi/2) - \varepsilon\}}{\exp(j\varepsilon)} \right) \sqrt{t_2^2 \sin^2 \alpha + t_1^2 \cos^2 \alpha} \\ & + \left(\frac{\exp(j\Delta)}{\exp\{j[(\pi/2) - \Delta]\}} \right) \alpha^2 F(0, 0) \sqrt{(1-t_2)^2 \sin^2 \alpha + (1-t_1)^2 \cos^2 \alpha}, \quad (8) \end{aligned}$$

其中 $\varepsilon = \arctg(t_1 \operatorname{ctg} \alpha / t_2)$, $\Delta = \arctg[(1-t_2) \operatorname{tg} \alpha / (1-t_1)]$ 。同样可调整 α , 使(8)式中的两干涉分量相等。这时可以进一步算得检偏器后的场强为

$$\begin{aligned} I(x, y, \Delta) = & [1 + \sin 2\omega \cos \phi(x, y)] \\ & + \sqrt{\cos^2 2\omega \sin^2 \phi(x, y) + \cos^2 2\Omega [\sin 2\omega + \cos \phi(x, y)]^2} \cdot \sin [2\theta - \psi(x, y)], \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \psi(x, y) = & \arctg \sin \phi(x, y) \cos 2\omega / [\cos \phi(x, y) \\ & + \sin 2\omega] \cos 2\Omega, \quad (10) \end{aligned}$$

$[\Omega = (\varepsilon - \Delta)/2, \omega = (\varepsilon + \Delta)/2]$ 。当 Ω, ω 都可忽略时(9)式变为(2)式, (10)式变为 $\psi(x, y) = \phi(x, y)$ 。然而当 Ω, ω 不能忽略时, 从光强 $I(x, y, \theta)$ 的傅里叶分析直接求得的位相 $\psi(x, y)$ 并不等于 $\phi(x, y)$, 式(10)表示了这种修正关系, 若忽略 ε 和 Δ 的二阶量, 从(10)式知, $\phi(x, y)$ 的最大修正值是 $\pm 2\omega$ 。以一数值为例, $t_2^2 = 0.8, t_1^2 = 0.001, [\alpha^2 F(0, 0)]^2 = 0.1$, 则 $\alpha = 18^\circ, \varepsilon = 5.7^\circ, \Delta = 1.7^\circ, 2\omega = 7.4^\circ$ 。 ψ 和 ϕ 的关系示于图 6。

若考虑不精确的四分之一波片引入的误差, 可用波片的两个放置方向($\pm 45^\circ$)分别进行测量, 便可抵消波片引入的误差。

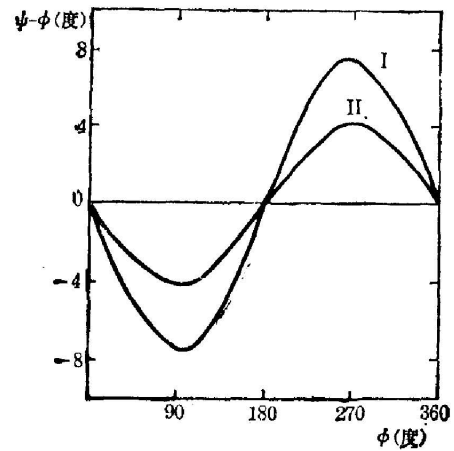


图 6 ψ 和 ϕ 的关系

Fig. 6 The relation between ϕ and ψ , $t_2^2 = 0.8, [\alpha^2 F(0, 0)]^2 = 0.1$,
I: $t_1^2 = 10^{-3}$, II: $t_1^2 = 10^{-4}$

六、原理的实验验证

作者以铌酸锂光楔作为图 2 的偏振分束器, 构成了第一类位相线偏振编码器。同样又以石英四分之一波片在一普通泰曼干涉仪上构成了图 3 的第二类线偏振编码器。在这两个装置中, 转动检偏器 A , 都得到干涉条纹的扫描。

为了构成偏振条纹扫描小孔干涉仪, 用高分辨率偏振膜 (700 line/mm) 制成 $4 \mu\text{m}$ 左右小孔。这类偏振材料的参数是 $t_2^2 = 0.8, t_1^2 = 0.002$ 。按图 4 结构, 实现了偏振条纹扫描小孔干涉仪。由于 $t_1^2 \neq 0$, 即使 $\alpha = 0$, 也可有干涉条纹, 然而转动检偏器 A 并不能使这些条纹移动。只有调整 α 至合适值, 才能得到对比度最大的干涉条纹, 并且随 A 的转动而扫描。图 7 是检偏器在四个位置上得到的干涉图, 被测物是 $F/4.5$ 的照相物镜。为了减小误差的修正, 应利用 t_1 尽量小的材料。当 $t_1^2 < 10^{-4}$ 时, 误差修正 $< \frac{1}{100} \lambda$ 。

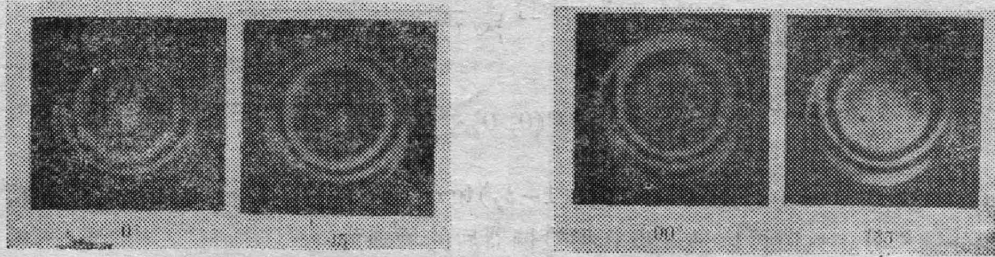


图 7 不同检偏器的取向引起的干涉条纹位移

Fig. 7 The interferograms taken with different analyzer orientations

七、结 论

1. 对位相物体作偏振编码, 从而把位相测量转为偏振态的测量, 测量精度可以大大提高, 位相物体经线偏振编码后, 利用旋转检偏器即可实现干涉条纹的扫描。

2. 偏振条纹扫描小孔干涉仪既有小孔干涉仪的优点, 又克服了它的缺点, 可能发展为实用的干涉仪系统。

本工作利用了美国亚利桑那大学光学中心 H. H. Barrett 教授提供的偏振材料, 特表谢意。

参 考 文 献

- [1] J. H. Bruning *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 11 (Nov), 2693.
- [2] M. Schaham; *SPIE*, 1981, **306**, 183.
- [3] R. M. A. Azzam *et al.*; «*Ellipsometry and Polarization light*», (North-Holland Publishing Company, 1977).
- [4] 将另文发表。
- [5] R. N. Smartt and J. Strong; *JOSA*, 1972, **62**, No. 5 (May), 737.

Polarization fringe scanning interferometer

WU SHUDUNG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 24 May 1984; revised 11 August 1984)

Abstract

Polarization encoding of phase object may convert phase measurements to polarization measurements and realize polarization fringe scanning. Two kinds of linear polarization encoders are pointed out. Polarization fringe scanning point diffraction interferometer is proposed. With the technique the disadvantages of point diffraction interferometer may be avoided. The analyses of the scanning error and its correction are also given. Preliminary experiments confirmed the technique.