

一种实现干涉条纹扫描的新方法

蔡 波

(中国科学院光电研究所, 成都)

提 要

本文提出一种新的干涉条纹扫描方法。该方法通过在光源光路中放置旋转波片实现相位调制, 从而避免了在干涉光路中引入扰动。该方法与现有方法相比, 具有精度高、成本低、性能可靠等优点。
关键词: 干涉条纹扫描技术; 旋转波片。

一、引 言

干涉条纹扫描技术给数字干涉仪的研究带来了新的生气。目前干涉条纹扫描多用压电陶瓷驱动参考镜来实现^[1]。这种方法存在一些固有的缺点, 压电陶瓷的位移精度、线性度、重复精度及寿命等问题, 将直接影响干涉仪的精度和可靠性。此外, 器件的体积和成本也限制了这种方法的应用。利用偏光器件完成条纹扫描^[2]可以避免使用压电器件, 但以往的偏光扫描需要大面积均匀的偏光器件, 并且与上种方法一样, 将会在参考光路中引入扰动, 使仪器稳定性变差。为此本文提出一种新的扫描方法, 克服了已往扫描方法中存在的缺陷, 精确可靠地实现条纹的扫描。

二、原 理

根据菲涅耳假设, 一束线偏振光可以等效为两束旋向相反的圆偏振光, 两者频率相同。在解释旋光现象时, 菲涅耳指出: 在旋光晶体中, 两束圆偏振光的频率不同, 使线偏振光振动方向发生旋转。由此可以看出, 一束旋转的线偏振光可以等效为两束旋向相反、频率不同的圆偏振光。根据这一结论, 我们利用一旋转半波片产生旋转线偏振光, 利用一块1/4波片, 将其变成两束频率不同的正交线偏振光。干涉仪光路的设计使两正交线偏振光分别通过不同的光路, 从而通过转动半波片实现干涉条纹扫描。整个干涉仪光路如图1所示。其中S为He-Ne激光器, 它发出的光为线偏振光; H_0 为旋转半波片, 其快轴与纸面夹角为 θ ; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 为1/4波片, 它们的快轴放置得与纸面成 45° 角; SP为偏振分光镜; M为标准平面反

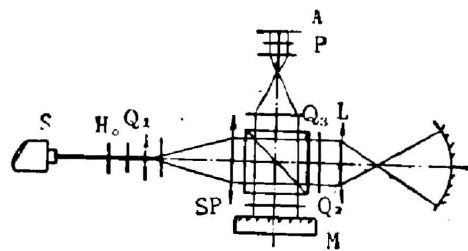


Fig. 1 Optical path of the interferometer

射镜; P 为吸收检偏器; L 为消像差镜头。

为导出观察面 A 上的光强 I 与 H_0 转角 θ 的关系, 下面给出各偏振元件的琼斯表达式: Y 方向线偏振光

$$S = (0, 1)^T, \quad (1)$$

旋转半波片

$$H^\theta = \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

45° 放置的 1/4 波片

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q = \frac{1+i}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

偏振分光镜的反射性能

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

偏振分光镜的透射性能

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

检偏器

$$P = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

设参考光路光程为 δ_1 , 在 A 面上光矢量为 E_1 则有

$$E_1 = P \cdot R \cdot Q_2 \cdot Q_2 \cdot T \cdot Q_1 \cdot H_\theta \cdot S \cdot \exp(i\delta_1). \quad (7)$$

同理, 若测量光路光程为 δ_2 则有

$$E_2 = P \cdot T \cdot Q_3 \cdot Q_3 \cdot R \cdot Q_1 \cdot H_\theta \cdot S \cdot \exp(i\delta_2). \quad (8)$$

A 面上的光强为

$$I = |E_1 + E_2|^2. \quad (9)$$

将(7)、(8)两式代入(9)式, 经一系列计算得:

$$I(\theta) = \cos^2[(\Delta + \pi/2 + 4\theta)/2], \quad (10)$$

其中 $\Delta = \delta_1 - \delta_2$ 。

上式表明 H_0 的转角 θ 以 4 倍线性关系叠加在相位差 Δ 上, 实现了频率 4 倍于 H_0 转角的条纹扫描。

在扫描过程中, 利用正交选频积分可求解相位差 Δ

$$\Delta = \arctg \left[\frac{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(4\theta) \cos(4\theta) d(4\theta)}{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(4\theta) \sin(4\theta) d(4\theta)} \right]. \quad (11)$$

从图 1 光路可以看出整个扫描运动是在光源光路中进行的。这将不会给干涉条纹带来相位的扰动。由于扫描是由机械转动来实现的, 因此容易达到扫描精度 1/1000, 并且可以避免伪干涉条纹的产生。当被测系统与标准镜反射率不等时, 调节 P 的角度可以保证干涉条纹对比度恒定不变。

三、精度分析

影响干涉仪精度的因素很多,本文仅分析由扫描误差引入的测量误差。

1. 旋转半波片 H_0 引入的误差

若 H_0 不是理想的半波片,即相位延迟 $\delta \neq \pi$, 将引入扫描误差。此时

$$H_0 = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \exp(i\delta) & \sin \theta \cos \theta - \sin \theta \cos \theta \exp(i\delta) \\ \sin \theta \cos \theta - \sin \theta \cos \theta \exp(i\delta) & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \exp(i\delta) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

利用(7)、(8)、(9)式可得

$$I = \sin^2(\delta/2) \cos^2[(\Delta + 4\theta + \pi/2)/2] + \cos^2(\delta/2) \cos^2[(\Delta + \pi/2)/2]. \quad (13)$$

由上式可知, H_0 误差只影响干涉条纹对比度。代入(11)式可知,对 Δ 测量无直接影响。

2. $1/4$ 波片 Q_1 于快轴方向引入的误差

当 Q_1 快轴与纸面夹角 $\alpha \neq 45^\circ$ 时

$$Q_1 = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha + i \sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha - i \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha - i \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha + i \cos^2 \alpha \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$I = \cos^2[(\Delta + 4\theta + 2\alpha)/2] + \cos^2(45^\circ + \alpha) \cos \Delta \cos(4\theta - 2\alpha). \quad (15)$$

引入的相位差为

$$s = \arctg \left(\frac{\int_0^{2\pi} I(\theta) \cos(4\theta) d(4\theta)}{\int_0^{2\pi} I(\theta) \sin(4\theta) d(4\theta)} \right) - \Delta. \quad (16)$$

将(15)式代入(16)式,并扣除系统恒定误差

$$s = -\arctg \left(\frac{2 \cos^2(45^\circ + \alpha) \cos \Delta \sin(\Delta + 4\alpha)}{1 + 2 \cos^2(45^\circ + \alpha) \cos \Delta \cos(\Delta + 4\alpha)} \right). \quad (17)$$

其误差分布曲线如图 2 所示。

3. $1/4$ 波片 Q_1 的光程误差引入系统的误差

当 Q_1 快、慢轴程差 $\delta \neq \pi/2$ 时,

$$Q_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \exp(i\delta) & 1 - \exp(i\delta) \\ 1 - \exp(i\delta) & 1 + \exp(i\delta) \end{pmatrix}, \quad (18)$$

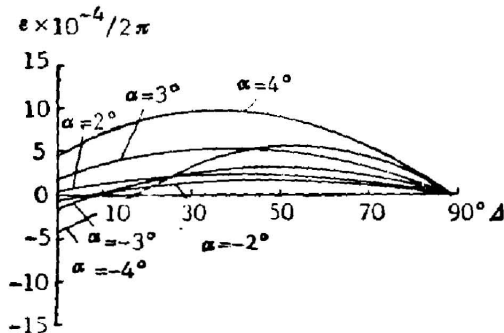


Fig. 2 Error distribution when $\alpha \neq 45^\circ$

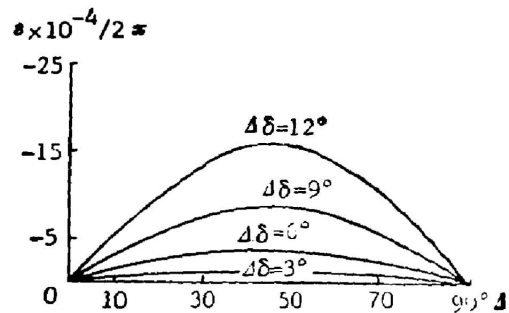


Fig. 3 Error distribution when $\delta \neq \pi/2$

$$I = \cos^2([\Delta + 4\theta + \pi/2]/2) + \cos^2([\delta + \pi/2]/2) \cos(4\theta) \sin \Delta, \quad (19)$$

由(16)式得

$$\varepsilon = \arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \Delta (\sin \delta - 1)}{1 + \operatorname{tg}^2 \Delta \sin \delta} \right]. \quad (20)$$

误差分布如图3所示。

4. 偏振分光镜 SP 引入的误差

当偏振分光镜 SP 不完善时,

$$R = \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma' \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} t' & 0 \\ 0 & t \end{pmatrix}. \quad (21)$$

其中 $\gamma + t' = 1$, $t + \gamma' = 1$ 。 γ' , t' 是起偏不完全引起的。

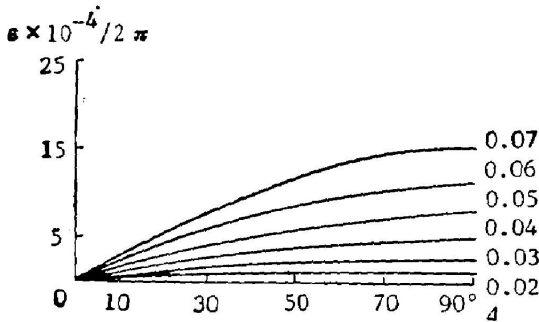


Fig. 4 Error distribution when $q \neq 0$

我们用 $q^2 = \gamma't'/\gamma t$ 来评价偏振分光镜的性能, 理想情况下 $q = 0$ 。

将 R , T 代入(6)、(7)、(8)式, 并进行归一化, 得

$$I = [\cos([\Delta + 4\theta + \pi/2]/2) + q^2 \cos([\Delta - 4\theta - \pi/2]/2)]^2, \quad (22)$$

$$\varepsilon = -\arctg \left(\frac{2q^2 \sin \Delta + q^4 \sin 2\Delta}{1 + 2q^2 \cos \Delta + q^4 \cos 2\Delta} \right) \approx -2(\sin \Delta) q^2. \quad (23)$$

误差分布如图4所示。

5. $1/4$ 波片 Q_2 、 Q_3 引入的误差

Q_2 、 Q_3 实际上起着半波片的作用, 当它的快轴与纸面夹角 β_1 、 β_2 不为 45° 时:

$$Q_2 \cdot Q_2 = \begin{pmatrix} \cos 2\beta_1 & \sin 2\beta_1 \\ \sin 2\beta_1 & -\cos 2\beta_1 \end{pmatrix}, \quad Q_3 \cdot Q_3 = \begin{pmatrix} \cos 2\beta_2 & \sin 2\beta_2 \\ \sin 2\beta_2 & -\cos 2\beta_2 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

$$I = \sin 2\beta_1 \sin 2\beta_2 \cos^2([\Delta + 4\alpha + \pi/2]/2) + \sin^2(\beta_1 \cdot \beta_2) \sin^2(\beta_1 + \beta_2). \quad (25)$$

当 Q_2 、 Q_3 的相位延迟分别为 Δ_1 、 Δ_2 , 且 Δ_1 、 Δ_2 不为 $\pi/2$ 时:

$$Q_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \exp(i\Delta_1) & 1 - \exp(i\Delta_1) \\ 1 - \exp(i\Delta_1) & 1 + \exp(i\Delta_1) \end{pmatrix}, \quad Q_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \exp(i\Delta_2) & 1 - \exp(i\Delta_2) \\ 1 - \exp(i\Delta_2) & 1 + \exp(i\Delta_2) \end{pmatrix}. \quad (26)$$

$$I = \sin \Delta_1 \sin \Delta_2 \cos^2([\Delta + 4\theta + \pi/2]/2) + \sin^2([\Delta_1 - \Delta_2]/2) \sin^2([\Delta_1 + \Delta_2]/2). \quad (27)$$

显然, 这两种误差都只影响对比度, 而不引起测量误差 ε 。

6. 检偏器引入的误差

当检偏器不理想时:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1-q \\ 1-q & 1 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

归一化强度为

$$I = \cos^2([\Delta + 4\theta + \pi/2]/2) + [q^2/4(1-q)]. \quad (29)$$

显然, 有 $\varepsilon = 0$ 。

当检偏器方向与纸面成 α 角, 且测量、参考光路的等效反射率分别为 R_1 、 R_2 时

$$P = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$I = 2 \sin 2\alpha \cos^2([\Delta + 4\theta + \pi/2]/2) + (R_1 \cos \alpha - R_2 \sin \alpha)^2. \quad (31)$$

显然, $\varepsilon=0$ 。且有当 $\alpha=\arctan(R_1/R_2)$ 时条纹对比度为 1。

以上讨论表明, 光路中只有 Q_1 和 SP 产生的扫描误差将最终引起相位测量误差。从图 2、3 和 4 可以看出, 这种影响并不是很大。允许的典型偏差: $d\alpha=\pm 3^\circ$, $d\delta=\pm 50\text{\AA}$, $q=0.05$; 这时引入的总误差 $>1/1000$ 。可见该方法对元件要求并不十分苛刻。这对实现这种扫描条纹的干涉仪就没有多大的障碍了。

四、试 验

试验装置如图 5 所示。图 6 是调制扫描部分。首先在 A 面上某一点观察光强随 H_0 转角 θ 变化的情况。我们可以从图 7 看出两者成正弦关系。这与理论推导是一致的。其次让我们考虑整个干涉图, 在条纹扫描过程中, H_0 每转 15° , 在 A 面上拍摄一张干涉图。由此得出七张干涉图。如图 8 所示, 由 a 到 g 可以清晰地看到条纹扫描过程。



Fig. 5



Fig. 6

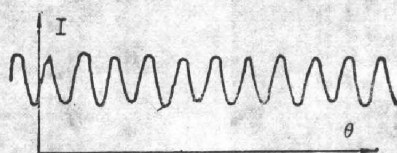


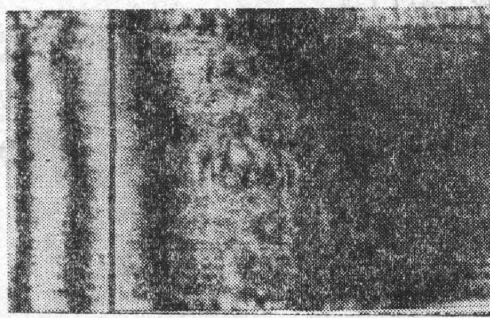
Fig. 7

实验表明理论推导是正确的。在实验过程中发现系统对元件要求并不苛刻, 精度分析正确, 方案可行。

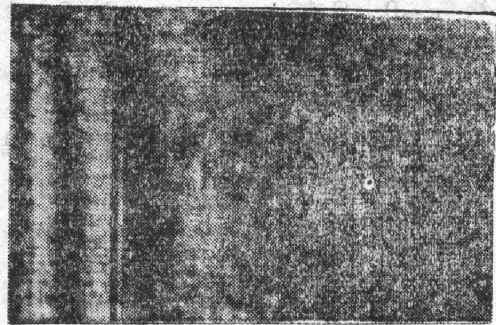
五、讨 论

理论分析和实验都表明, 新的扫描方法具有精度高、可靠、易于实现等优点。调制器在光源光路中, 从而有效地避免了在干涉光路中引入扰动; 而且在细光束中进行调制, 因而各元件尺寸都可以大大地缩小; 偏振材料的均匀性也容易得到保证。有利于整机的小型化, 整个装置的造价也会大大降低。

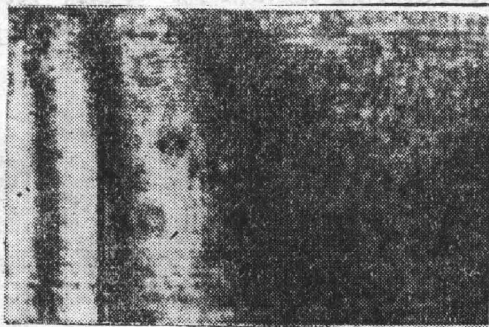
本工作得到宋从武、郝沛明老师的热情指导和周晨波同志的大力支持, 在此表示感谢。



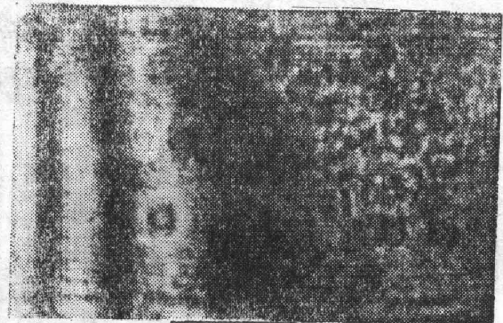
(a) $\theta=0^\circ$;



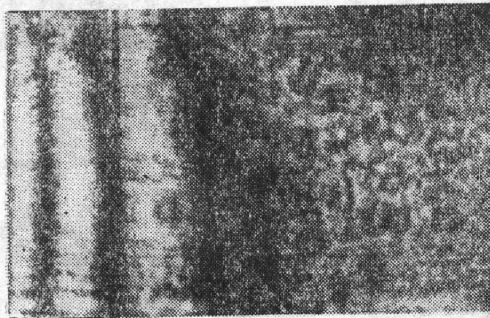
(b) $\theta=15^\circ$;



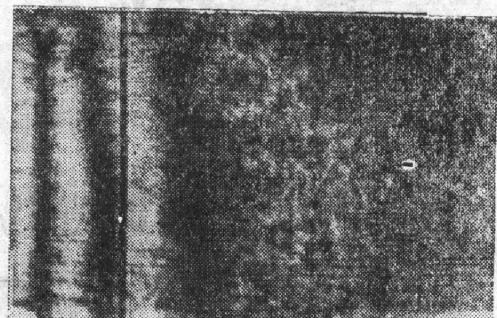
(c) $\theta=30^\circ$;



(d) $\theta=45^\circ$;



(e) $\theta=60^\circ$;



(f) $\theta=75^\circ$;



(g) $\theta=90^\circ$

Fig. 8

参 考 文 献

- [1] J. H. Bruning *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 11 (Nov), 2693~2703.
[2] B. Crane; *Appl. Opt.*, 1969, 8, No. 3 (Mar), 538~542.

A new method for interference fringe scanning

CAI BO

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica)

(Received 30 March 1987; revised 11 June 1987)

Abstract

A new method for fringe scanning has been given. In this method, the phase modulation is completed by inserting a rotating wave plate in the light source path. By this way, the disturbance in interference pathes is avoided. Compared with conventional methods, this new method has higher accuracy, higher reliability and lower cost.

Key words: technique for fringe scanning; rotating wave plate.