

光外差法正弦尺干涉测角计

叶 盛 祥

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

本文介绍用稳频横塞曼激光(STZL)作光源,研制了光外差法正弦尺干涉测角计装置,提出校正测角灵敏度的一种方法,并用此装置测量压电陶瓷(PZT)的滞后特性。

一、引 言

用正弦尺设置角度是工业测角的基本方法之一。它是靠调节支承正弦尺两端的块规高度差设置不同的角度。因此,测量中必须作块规的更换工作。随着激光和电子学技术的发展,目前,国内外许多测角仪器中,用光波干涉测长来设置两端的高度差。这就避免了块规的更换等问题,可以连续地测量角度。当利用光外差干涉测量时,则有更显著的效果。

用稳频横塞曼激光(STZL)作光源时,它是由互相垂直、频率不同的两束线偏振光构成,用其中一束偏振光作参考光,另一束作测定光,就能进行光外差干涉测量。据此,研制了设置正弦尺旋转的光外差干涉测角计。有关测角装置、校正方法及应用报告如下。

二、偏光干涉测角光学系统

光学系统是属于迈克尔逊类型的。图1(a)中, PBS 是偏振分光棱镜, M 为平面镜, CC_1 、 CC_2 是装在正弦尺两端的立方棱镜。STZL 出射的两束偏振光, 其中在纸面内的一束偏振光透过 PBS 进入光路 1, 入射到 CC_1 上被反射回来, 再次透过 PBS , 进入光电转换元件 P 中; 垂直于纸面的偏振光被 PBS 反射进入光路 2 中, 到达 CC_2 后光束返回, 再次被 PBS 反射进入 Ph 中。在 Ph 和 PBS 间插入一个检偏镜 P , 此检偏镜的偏振面与纸面成 45° 夹角。透过 P 后的两束偏振光互相干涉, 经光电转换产生两偏振光频率差 f_b 为周期变化的干涉信号。此信号的数学表达式如(1)式所示。

$$I_{45^\circ} = \frac{1}{4} \left\{ a_x^2 + a_y^2 + 2a_x a_y \cos 2\pi \left(f_b t - \frac{\Delta l}{\lambda} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中: a_x 、 a_y 为两偏振光的振幅, $f_b = \nu_x - \nu_y$, ν_x 、 ν_y 为两偏振光的频率, λ 为两偏振光的平均波长, $\Delta l = l_1 - l_2$ 为两光路的程差。(1)式表示把光波干涉位相变化转化为频率 f_b 的电信号相位变化。

正弦尺与入射光束成直角时开始, 正弦尺旋转角为 θ 时, 假定干涉条纹数变化 N (包括

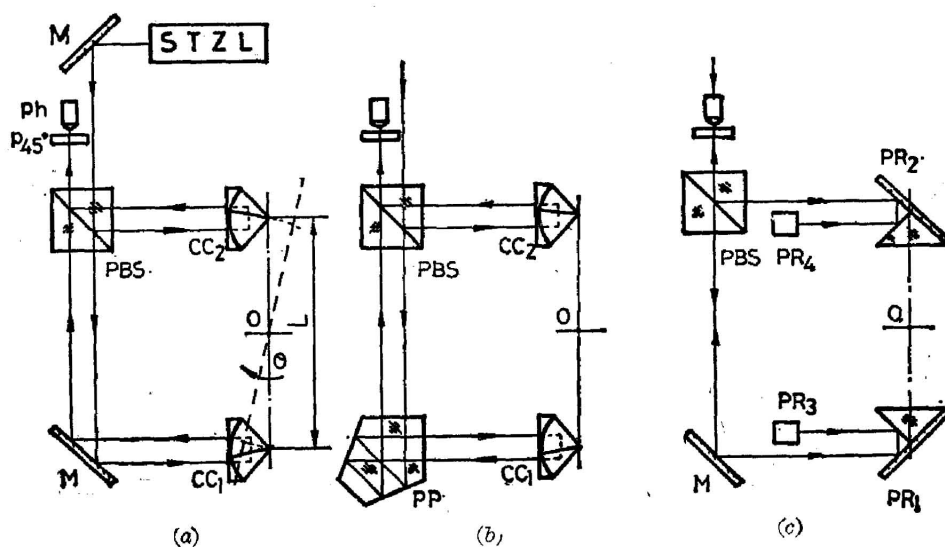


图1 测角干涉计的三种光学系统原理图

Fig. 1 Optical systems of the angle-measuring interferometer

小数部分), 则可由(2)式求 θ 值。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{N\lambda}{2nL}, \quad (2)$$

式中: n 为光路通过的介质折射率, L 为立方棱镜 CC_1 和 CC_2 顶点间的间隔距离, 即正弦尺长。

实际上, 回转正弦尺时, 因 CC_1 向上、 CC_2 向下偏移, 在图 1(a) 的 Ph 位置, 返回光束相对于光的传播方向的横方向上将产生互为反向的横向位移 S_1 、 S_2 。所以, 正弦尺回转到 $\pm 1^\circ$ 时(图 2 中的曲线 a), 干涉信号就消失了。

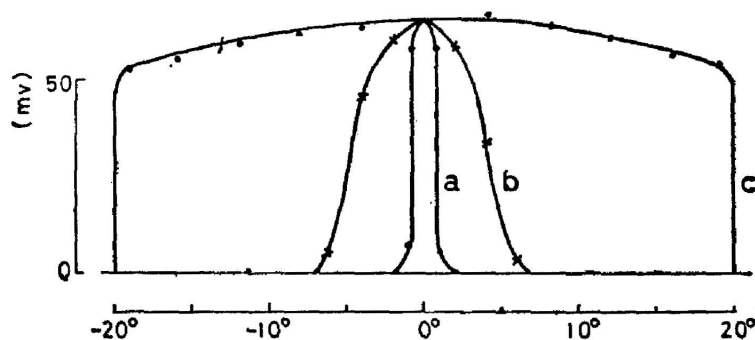


图2 三种光学系统的测角范围

Fig. 2 Ranges of angle measurement of the three optical systems

图 1(b) 中, 把平面镜换成五角棱镜 PP , 经调整, 横向位移 S_1 、 S_2 的变化大小相等、方向相同。这时能得到干涉信号的范围可增加至 $\pm 7^\circ$ 。但因相对于光电元件的光束位置仍在移动, 所以信号振幅如图 2 中的曲线 b 那样随旋转角 θ 的大小而变化。

图 1(c) 是横向位移为零的干涉测角光学系统。它由安装在正弦尺两端的两个空心组合直角镜 PR_1 、 PR_2 和固定在基座上的两个直角棱镜 PR_3 、 PR_4 等零件组成。 PR_1 、 PR_2 的

直角棱与基座面垂直、与旋转轴线平行, PR_3 、 PR_4 的直角棱与基座面平行、与旋转轴线垂直。因此, 从 PR_3 、 PR_4 返回的光束被调整在入射光束的正上方(或正下方)。此系统能得到干涉信号的范围可以扩大到 $\pm 20^\circ$, 并在此范围内干涉信号的振幅基本不变。实测结果如图 2 中的曲线 c 所示。因光束两次通过装在正弦尺上的组合直角镜, 所以测角灵敏度比图 1(a)、(b) 的型式提高一倍。测角关系式如(3)式所示。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{N\lambda}{4nL} \quad (3)$$

为进行光外差干涉, 在光学系统(图 3)中, 用偏振分光棱镜 PBS 分离 $STZL$ 发出的水平和垂直偏振成分, 使其分别进入干涉计中的两个光路。通常, 由 $STZL$ 发出的光是稍有椭圆的偏振光, 而用 PBS 不能完全分离这两束入射光。因此, 在 PBS 前插入一个索累·巴卑涅补偿器 SBC , 调节它的主轴方位和位相差补偿量, 就可以使椭圆偏振光变成完全线偏振光。

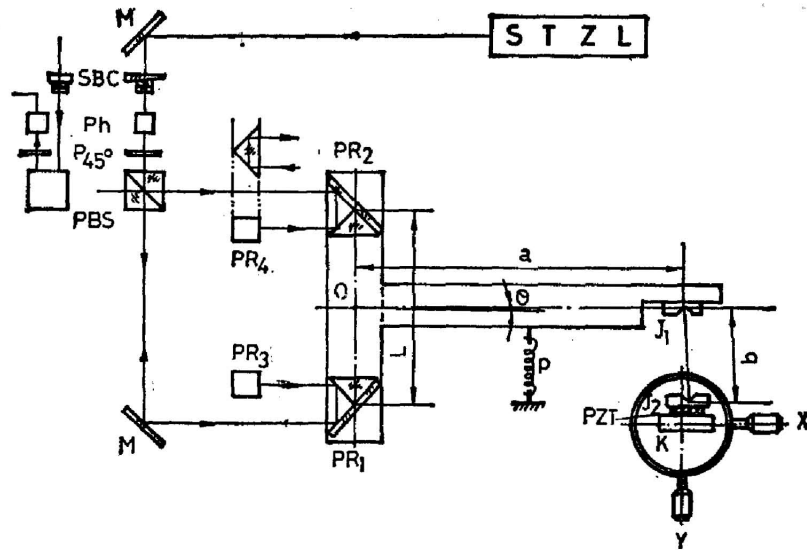


图 3 测角干涉计光学系统和灵敏度校正机构

Fig. 3 Optical system and sensitivity-calibration layout of the angle-measuring interferometer

PR_1 、 PR_2 的入射面与基座面平行, PR_3 、 PR_4 的入射面与基座面垂直。而 $STZL$ 发出的两束偏振光的振动方向是垂直和水平的, 所以从组合直角镜返回的光偏振状态不变。而用立方棱镜时, 光的偏振状态将发生变化, 即返回的光变成了椭圆偏振光。用返回光束从 PBS 漏出的光功率 $W_{漏}$ 与干涉信号的光功率 $W_{干}$ 之比的大小可验证这一点。实测结果如下, 用组合直角镜时, $W_{漏}:W_{干}=0.4\%$; 用立方棱镜时, $W_{漏}:W_{干}=17\%$ 。

三、测角灵敏度校正

微小测角灵敏度的校正用图 3 中右边部分装置。它是在图 1(c) 的正弦尺上又附加了杠杆 a 。杠杆的一端装有尖轴支承 J_1 。基座上安装了一个 X - Y 移动台, 其上固定一个装

有尖轴支承 J_2 的支承座 K 。用弹簧 P 拉住杠杆 a , 使推棒 b 始终与支承 J_1 、 J_2 紧密接触。

校正前要求杠杆 a 与移动台的 X 方向平行、与推棒 b 垂直。初调 X 、 Y 方向的移动量, 使杠杆 a 和推棒 b 大致垂直后, 一边改变 X 方向的移动量, 一边观察极坐标表示装置^[5] 中干涉信号位相的变化。当干涉位相变化由快变慢到停止, 如再继续按原方向变化 X 方向的移动量时, 干涉位相则按反方向由慢变快地变化。干涉位相变化停止的那个位置即为杠杆 a 与推棒 b 垂直的位置。此位置叫做校正的初始位置。初始位置的 X 坐标值定为 X_0 。

从 X_0 位置开始, 向左向右改变 x 的移动量时, 推棒 b 按勾股定理产生移动量 Δh ,

$$\Delta h = b - \sqrt{b^2 - (X - X_0)^2} \doteq \frac{1}{2b}(X - X_0)^2, \quad (4)$$

式中 b 为推棒长度。若 b 为 100 mm, $(X - X_0)$ 为 0.1 mm 时, 则 Δh 为 $0.05 \mu\text{m}$ 。由此可知, 用一个极普通的移动台和推棒就可获得一个极微小的位置变化。此时, 正弦尺的回转角 θ 即为杠杆的回转角, 可从 (5) 式求得。

$$\theta \doteq \text{tg } \theta = \frac{\Delta h}{a}, \quad (5)$$

式中 a 为杠杆长度。把 (4)、(5) 式代入 (3) 式, 整理成 (6) 式。

$$N = \frac{4nL}{\lambda a} \cdot \Delta h = K \cdot \frac{1}{2b}(X - X_0)^2, \quad (6)$$

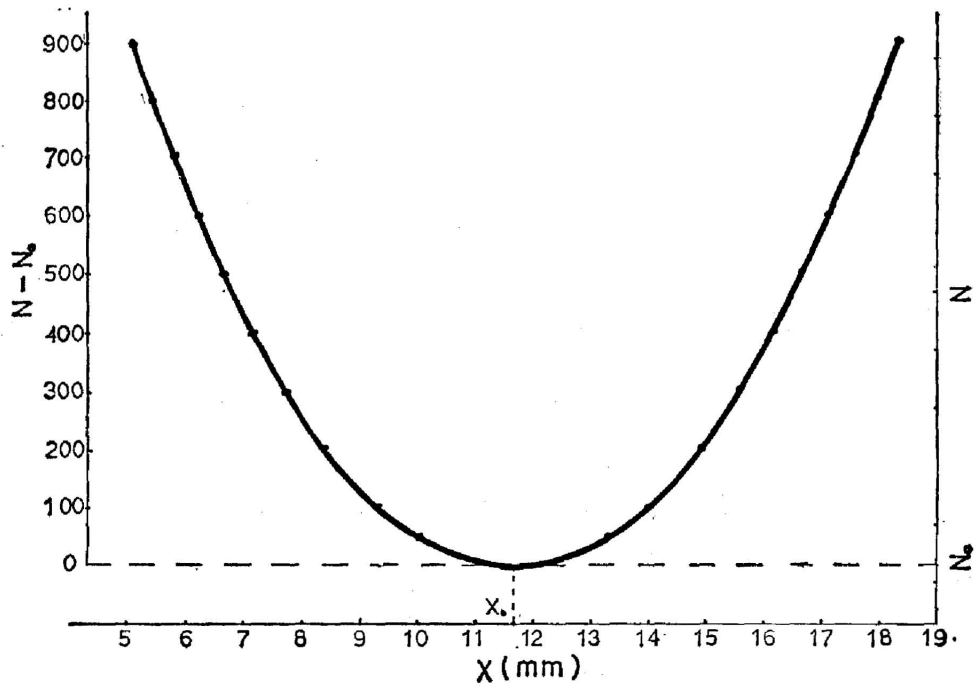
式中 $K = \frac{4nL}{\lambda a}$ 是安装在正弦尺上的杠杆的一端直线变位时, 产生干涉条纹数变化的常数。

(6) 式表示在干涉测角计上测得的干涉条纹数 N 和 X 间为二次曲线关系。它可由实测数据绘制。此曲线顶点对应 X 轴的值即为 X_0 , N 值为 N_0 。而 $(N - N_0)$ 和 $(X - X_0)^2$ 间的关系是在 X_0 处折拐的两条直线。直线斜率乘以 $2b$, 其积即为装置常数 K 。

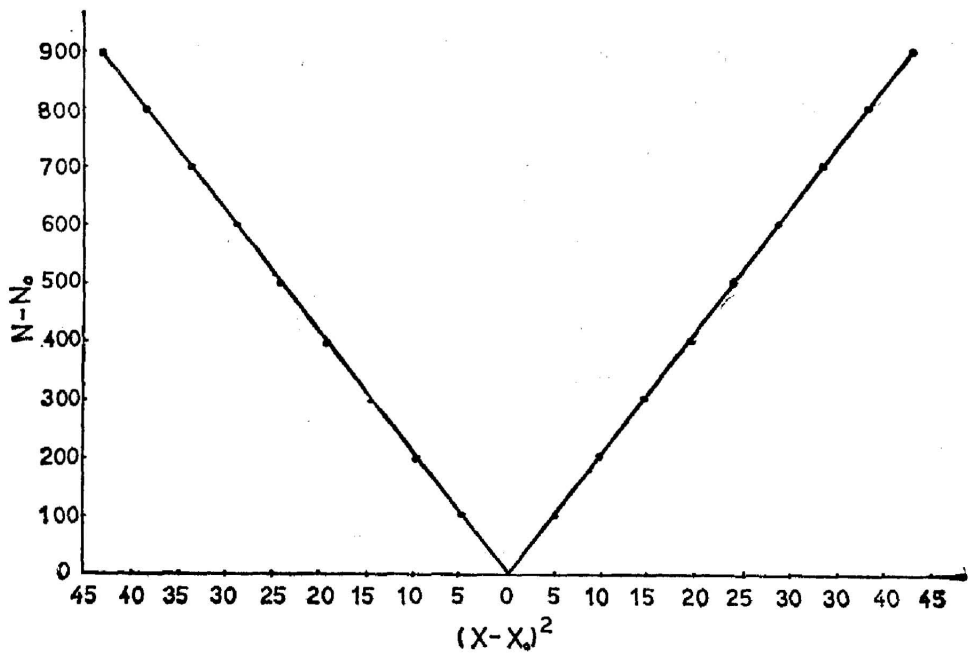
用图 3 的实验装置, 使尖轴支承 J_2 沿 X 方向移动, 并从干涉位相极坐标表示装置中读取干涉条纹数 N 。实测结果如图 4(a) 所示, 它与两次曲线很接近。图中右纵轴 N 是从任意位置开始计数的干涉条纹数。 $(N - N_0)$ 和 $(X - X_0)^2$ 的关系表示在图 4(b) 中。由直线斜率求得装置常数 K_* 为 $2655 [1/\text{mm}]$ 。

本装置各参数的实测值如下: $L = 163 \pm 1 \sim 2 \text{ mm}$, $a = 368 \pm 1 \sim 2 \text{ mm}$, $b = 65.40 \pm 0.02 \text{ mm}$ 。装置常数的计算值 $K_{\#} = 2800 \pm 20 [1/\text{mm}]$ 。 K_* 与 $K_{\#}$ 相比, 有 5.2% 的误差。当推棒和尖轴支承的接触部分经修整后, 其误差减少到 2.3%。从校正原理可知, 校正装置是一个简单的能得到极微小变位的装置。但因装置的加工不良, 使推棒 b 和尖轴支承 J_1 、 J_2 间变为圆弧面接触(应为点接触), 所以由实测曲线求得的常数 K_* 比计算值 $K_{\#}$ 稍许偏小。

另外, 当 X - Y 移动台的 X 方向位于 X_0 时(即杠杆 a 和推棒 b 垂直), 由 Y 方向改变 ΔY 移动量直接推杠杆, 从 N 和 ΔY 的实测曲线同样可求装置常数 K 。其结果 K_* 为 2795, 与 $K_{\#}$ 一致, 在 $K_{\#}$ 的误差范围内。据此反求正弦尺的实效长 L_* 为 162.8 mm。把此值代入 (3) 式, 得到该装置变化一个干涉条纹的实际角度变化量是 $0.2005''$ 。



(a)



(b)

图 4 干涉信号位相变化与推棒端点在 X 方向位移(a)和 $(X - X_0)^2$ (b)的关系
 Fig. 4 Phase change of interfering signal vs. X -displacement of the rod end (a) and $(X - X_0)^2$ (b)

四、压电陶瓷滞后特性测量

单向压电陶瓷的两端面上加了电压后, 则该元件的厚度将随着所加电压的大小和极性而变化。用本装置可迅速地测量压电陶瓷的这一特性。参看图 3, 把压电陶瓷试样 PZT 放置在尖轴支承 J_2 和支承座 K 之间, 并把电压的正负极分别加在 J_2 和 K 上。这时 PZT 的厚度变化 Δh 由 (6) 式和常数 $K_{\text{压}}$ (2795) 求得, $\Delta h = 0.36 \times 10^{-3} \cdot N \text{ mm}$ 。N 由电信号相位计读取, 并把它的输出加到 X-Y 记录仪的 Y 坐标上。加在 PZT 上的电压经分压后, 输入到 X-Y 记录仪的 X 坐标上。但应先调节干涉测角计的灵敏度大小, PZT 的厚度变化 Δh 使干涉测角计的位相变化量在 1 个干涉条纹数以内。此时, 连续改变电压 V 时, X-Y 记录仪就能自动画出 PZT 的厚度变化特性曲线。

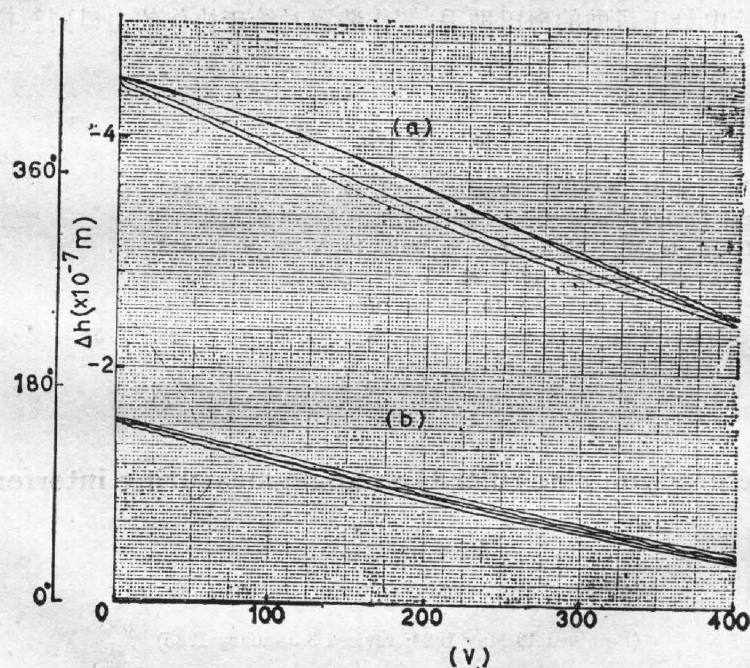


图 5 PZT 厚度变化特性曲线

Fig. 5 Characteristics of the change in PZT thickness

对两种 PZT 试样分别作了测定, 特性曲线如图 5 所示。曲线向下表示 PZT 的厚度伸长, 向上表示缩短。由图可知, S 材料的厚度变化量大, 滞后现象也大; M 材料的特性曲线几乎成直线关系, 滞后现象小。

五、棱镜误差

测角干涉仪中用了四个直角反射器, 即两个组合直角镜和两个直角棱镜。若所用的两个组合直角镜 PR_1 、 PR_2 有直角误差, 则反射光束和入射光束不平行, 两者间有一水平偏角。此时, 只要适当调节两个直角棱镜 PR_3 、 PR_4 的方位, 两返回光束仍能平行地返回, 对

干涉无影响。

若所用的两个固定直角棱镜 PR_3 、 PR_4 有直角误差时, 由于从直角棱镜反射回来的光束间的高低偏角不能用其它元件进行补偿, 所以它将影响干涉效果。因此, 两直角棱镜的直角误差之差要尽量小, 最好为零。两直角棱镜有偏角差 $\Delta\theta$ 时, 在孔径为 d 的光路中, 将产生干涉条纹的位相变化 $\Delta\varphi$ 。它们之间的关系可用(7)式表示。

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \Delta\theta \cdot d}{\lambda}, \quad (7)$$

当 $d = 1.5 \text{ mm}$ 、 $\Delta\varphi \leq \frac{1}{4} \lambda$ 时, 则 $\Delta\theta = 10.5''$ 。本装置用了偏角差为 $10''$ 左右的两直角棱镜, 得到了较大的干涉信号, 振幅大于 50 mV 。

本研究是在日本静岡大学电子工学研究所高崎宏教授直接指导下完成的, 在此表示衷心感谢。并向实验中给予帮助的梅田助手、制作装置时给予协作的山口副教授、高桥技官及附属工厂的工人一一致谢。

参 考 文 献

- [1] N. Umeda, M. Tsukiji, H. Takasaki; *Appl Opt*, 1980, **19**, No. 3 (Feb), 442.
- [2] 中岛俊典;《光学》, 1980, **9**, No. 5 (Oct), 266.
- [3] H. Takasaki, N. Umeda, M. Tsukiji; *Appl Opt*, 1980, **19**, No. 3 (Feb), 435.
- [4] N. Umeda, H. Takasaki; *Appl Opt*, 1981, **20**, No. 5 (Mar), 723.
- [5] 叶盛祥, 梅田伦弘, 高崎宏;《光学》, 1984, **13**, No. 3 (Jun), 215.
- [6] N. Umeda, H. Shirai, H. Takasaki; *Rev. Sci Instrum*, 1984, **55**, No. 2 (Feb), 158.

An opto-heterodyne sine-ruler-type angle-measuring interferometer

YE SHENGXIANG

(*Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica*)

(Received 18 May 1984; revised 3 January 1985)

Abstract

This paper describes an opto-heterodyne sine-ruler-type angle-measuring interferometer. It used a frequency-stabilized transverse Zeeman laser (STZL) as the light source. A method of sensitivity calibration for angle measurement is presented. Hysteresis characteristics of a PZT piezoelectric ceramic have been measured by using this angle-measuring interferometer.