

# 偏振全息干涉术测量多层介质膜的反射相位畸变的反射相位畸变

李庆熊 王能鹤 钱秋明  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文介绍用偏振全息干涉术测量多层介质膜的反射相位畸变。指出在会聚或发散光束中使用的反光和分光元件, 应用于高质量成像光学仪器中和某些高精度干涉仪中时必须认真考虑它引入的相位畸变和相位色散。理论计算和实验结果一致说明对于特定的元件, 相位畸变和相位色散可达波长量级。

## 一、前 言

多层介质反光膜和分光膜应用于高质量成像光学仪器中(如投影光刻机)和高精度干涉仪中(如某些在会聚光束中使用的分光板<sup>[1]</sup>)时, 往往对其引入的相位畸变和相位色散不加考虑。然而, 对于达到衍射分辨率的成像仪器和高精度干涉仪, 这些元件带入的上述有害影响是不容忽略的。本文的理论分析和实验结果均证实了这一点。

本文用特征矩阵方法计算了一些特定膜的反射相位。并计算了锥形光束中使用的多层介质反光膜的反射特性<sup>[2]</sup>。(计算方法另文发表)计算表明这类元件是一种对入射角而言相位畸变的色散元件。对于71层紫外宽带反光膜, 它们引入的波面相位畸变和相位色散均可达 $3\pi$ 左右; 对于31层的中性反光膜, 可达 $0.78\pi$ ; 对于6层介质棱镜分光膜, 可达 $0.2\pi$ 。膜系结构见附录。

本文提出用偏振全息干涉术的方法测量其反射相位畸变, 它可以一次达得整个波面的相位畸变信息, 直观方便。由于全息方法中的光学元件产生的波面畸变可以抵消, 所以实验中不必使用一些昂贵的特殊光学元件。实验结果与理论分析一致。

## 二、原 理

全息测量装置见图1所示。具有各个偏振方向的He-Ne激光, 经过可旋转的Rochon棱镜P后被分光板分为两束: 一束经空间滤波器 $SF_1$ 后照亮全息干板成为参考光, 另一束经空间滤波器 $SF_2$ 后射入 $10\times(N.A.0.25)$ 显微物镜。滤波器小孔位于此物镜的像方共轭点。显微物镜把光束聚焦于待测多层介质膜上, 经介质膜反射后再通过透镜 $L_2$ 成为物光束照射在全息干板上。

全息干涉方法分两步:

收稿日期: 1985年10月22日

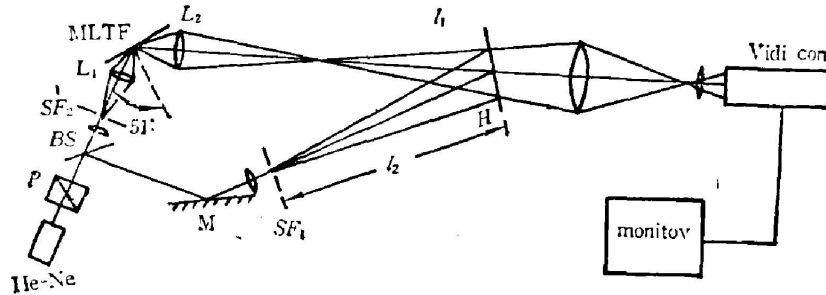


Fig. 1 Schematic of polarization holographic interferometer

$P$ —polarization prism;  $BS$ —beam splitter;  $SF_1$ ,  $SF_2$ —spatial filter; MLTF—multilayer thin film to be tested;  $L_1$ —microscope objective;  $L_2$ —lens;  $H$ —holographic plate

第一步, 旋转装于高精度轴上的 Rochon 棱镜, 使出射光在垂直于主光线入射面 (垂直于实验台面) 的方向上偏振, 记为  $sm$  分量。尽管介质膜反射光中由于偏振方位角的旋转将会有一定分量的平行于主光线入射面的偏振光, 记为  $pm$  分量, 但由于参考光中不含此偏振分量, 因此只作为背景光记录在全息图上。此时, 全息图上记录下介质反光板产生的畸变波面  $E_{sm}(\lambda, \theta, \mathbf{r})$ 。  $E_{sm}$  表示波面的复振幅, 它的振幅与相位均与波长  $\lambda$ 、主光线入射角  $\theta$ 、光束孔径中相对坐标  $\mathbf{r}$  有关。详细计算见另文<sup>[2]</sup>。

第二步, 显影全息干板并精确复位, 旋转 Rochon 棱镜  $90^\circ$ , 使出射光在  $pm$  的方向上偏振。此时, 参考光照射的全息片再现的仍是  $E_{sm}$  波面, 但此光束中的偏振方向换了  $90^\circ$ , 而物光束则是介质反光膜由  $pm$  偏振光产生的畸变波面  $E_{pm}(\lambda, \theta, \mathbf{r})$ 。  $E_{pm}$  同样是  $\lambda, \theta, \mathbf{r}$  的函数。

摄像机观察到的光强分布显然为

$$I(\lambda, \theta, \mathbf{r}) = (E_{sm} + E_{pm})(E_{sm} + E_{pm})^* \\ = |E_{sm}|^2 + |E_{pm}|^2 + 2|E_{sm}| |E_{pm}| \cos(\phi_{sm} - \phi_{pm}), \quad (1)$$

其中  $\phi_{sm}, \phi_{pm}$  分别代表两个偏振方向反射光的相位。在执行第二步操作时, 由于  $sm$  偏振光只作为背景, 所以在 (1) 式中略去了由于偏振方位角旋转所产生的  $sm$  分量。如以  $\delta_{sm}, \delta_{pm}$  分别代表两个偏振方向反射光的相位相对于入射球面波相位的偏移, 显然 (1) 式变为

$$I(\lambda, \theta, \mathbf{r}) = |E_{sm}|^2 + |E_{pm}|^2 + 2|E_{sm}| \cdot |E_{pm}| \cos(\delta_{sm} - \delta_{pm}). \quad (2)$$

对于某些膜, 如在使用入射角范围内反射光振幅变化不大的话, 我们观察到的干涉条纹正好反映了两个偏振方向产生的相移之差。一般情况下, 则将看到反射率变化和相移变化所导致的光强分布的叠加。

光束孔径中, 通过主光线的水平方向上, 相移将只与  $\theta$  有关, 从而使理论分析较为容易, 此时相移分别记为  $\delta_s$  和  $\delta_p$ , 下面是几种膜系的数值计算结果。图 2~图 6 是关于 71 层紫外宽带反射膜的, 图 7 是关于 31 层中性反光膜的, 图 8 是 6 层棱镜分光膜<sup>[3]</sup>的。

图 2 表明波长为  $6328 \text{ \AA}$  时, 相移  $\delta_s, \delta_p$  和  $\delta_p - \delta_s$  与入射角的关系。图 3 表明此膜系在工作波段中的  $\delta_p - \delta_s$  与入射角的关系。显然可见相移之差在  $30^\circ$  入射角以下时一般较小, 在  $30^\circ \sim 70^\circ$  范围内变化可达  $3\pi$ 。从图 2 中也可见  $\delta_s$  基本不变, 而  $\delta_p$  变化激烈。当这种膜用于投影光刻机中时, 由于沿垂直方向的相移变化较小 (因入射角变化较小), 所以点扩散函数

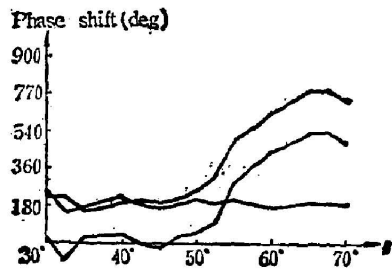


Fig. 2 Phase shift vs. incident angle  
71-layer film

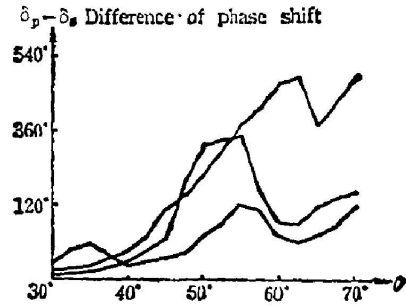


Fig. 3 Difference in phase shift vs.  
incident angle 71-layer film

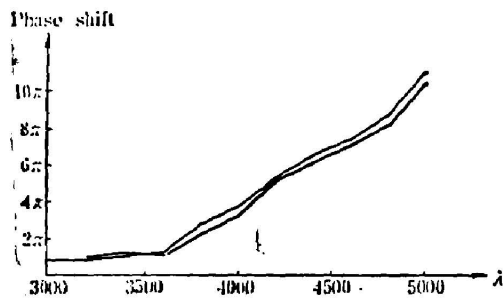


Fig. 4 Phase shift vs. wavelength  
71-layer film,  $\theta=30^\circ$

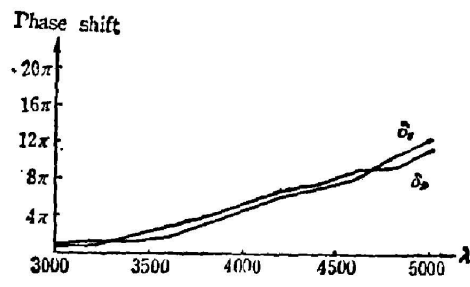


Fig. 5 Phase shift vs. wavelength  
71-layer film,  $\theta=45^\circ$

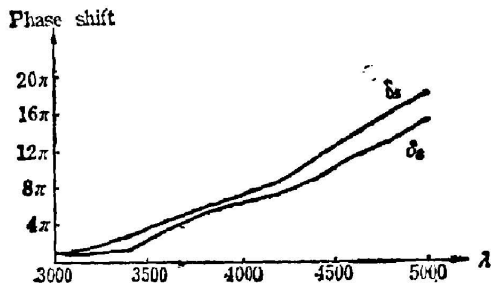


Fig. 6 Phase shift vs. wavelength  
71-layer film,  $\theta=60^\circ$

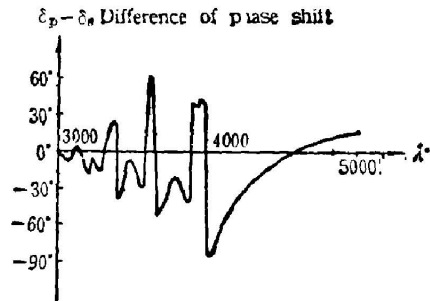


Fig. 7 Difference in phase shift vs. wavelength  
31-layer film,  $\theta=45^\circ$

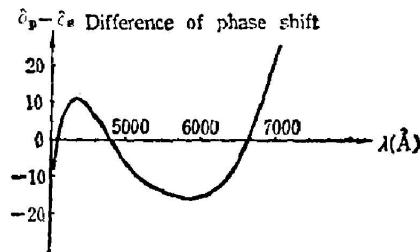


Fig. 8 Difference in phase shift vs. wavelength  
8-layer film,  $\theta=45^\circ$

在垂直方向弥散较小,而水平方向由于相位畸变大(入射角变化大)而弥散较大。

图 4、5、6 是在  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  主光线入射角时的相移与波长的关系,从图中可见,入射角越大,相移一般变大。波长增加,相移基本上也随之增加。从此可见多层介质膜也是一种相位色散元件。

图 7 和图 8 表明,  $45^\circ$  入射时, 31 层中性全反膜相移差可达  $\pi/3$ , 且随波长变化而激烈振荡; 6 层棱镜分光膜相移差可达  $\pi/5$ 。可见对于锥光束中使用的介质反光膜和分光膜, 由相移造成的相位畸变对于衍射分辨成像和高精度干涉是不可忽略的。

### 三、实 验

我们利用图 1 的装置观察了 (2) 式所表示的干涉场分布。由于显微物镜的 N. A. 为 0.25, 所以观察的角孔径为  $28^\circ$ , 由于主光线入射角  $51^\circ$ , 所以水平方向观察的角度从  $37^\circ$  至  $65^\circ$ 。实验中对复位精度和偏振棱镜旋转带入的光束偏折必须特别注意。

(1) 复位精度 复位架示意图见图 9, 这种复位架结构简单, 操作方便, 又具有很高的复位精度。其上三个圆柱销用于确定干板的液膜面位置, 三个钢球用以确定干板的平面位置。两个方向倾斜复位架, 干板液膜面倾斜约  $30^\circ$ , 后倾约  $5^\circ$ , 从而全息干板只靠重力准确复位, 不需任何夹具。图 10 是此干涉装置的复位干涉图, 照片上少许光强差是由于显示器亮度不均匀所造成的。可见复位精度优于  $\lambda/10$ 。

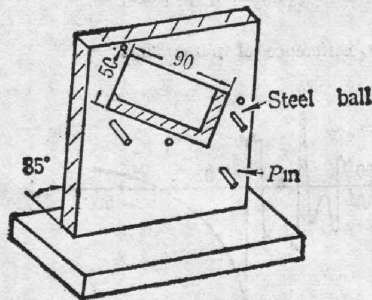


Fig. 9 Reset frame

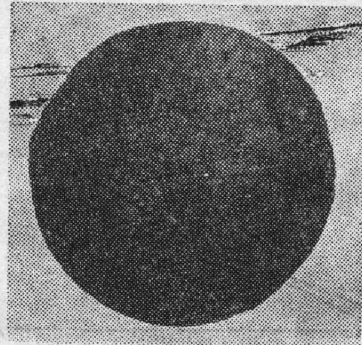


Fig. 10 Interference pattern of reset

(2) 偏振棱镜平行度 偏振棱镜是此实验中除干板以外的另一个运动零件, 为了对最终的干涉图不带来误差, 当旋转此偏振棱镜时必须保证光束发生的偏折在允许误差之内。简单计算表明旋转棱镜时, 物光束相位变化为

$$\delta_0 = \frac{[(n-1)\delta \cdot \Gamma \cdot f]^2 \pi}{l_1 \lambda}, \quad (3)$$

其中  $\delta$  为棱镜楔角,  $\Gamma$  为  $L_1$  和  $L_2$  组合放大率,  $f$  为空间滤波器物镜焦距,  $l_1$  为透镜  $L_2$  的像点至全息干板的距离。参考光束的相位变化为

$$\delta_R = \frac{[(n-1)\delta \cdot f]^2 \pi}{l_2 \lambda}, \quad (4)$$

其中  $l_2$  为空间滤波器  $SF_2$  小孔至全息干板距离。由于我们实验装置的  $\Gamma$  小于 1 (0.13), 所以有  $\delta_R > \delta_0$ , 如要求光束偏折带入的误差小于  $\lambda/10$ , 则棱镜的楔角要求小于  $4.4^\circ$ 。一般偏



振元件均能达到此要求。

但是,对于空间滤波器小孔,孔径的大小为  $20\mu\text{m}$ ,光束斑点  $9\mu\text{m}$ 。为使小孔不对零级斑点产生阻挡,旋转棱镜时光束的横向位移不应大于  $5\mu\text{m}$ 。有

$$(n-1)\delta f = 5\mu\text{m} \quad (5)$$

对应于  $f=8\text{mm}$ ,  $n=1.5$ ,  $\delta$  应小于  $4.3'$ 。所以必须选择平行度高的偏振元件,本实验中采用的 Rochon 棱镜平行度为  $0.6'$ 。

图 11、12 为监视器实时显示的干涉照片,为了观察清楚,我们在物光束中放入一薄玻璃板,使干涉图预置 4 个干涉条纹,旋转 Rochon 棱镜,条纹从 4 条变为 5 条(图 12),证实了理论计算结果。干涉图中有一条较宽的黑条是由于叠加了此膜系产生的由于布儒斯特角所引起的黑条纹。

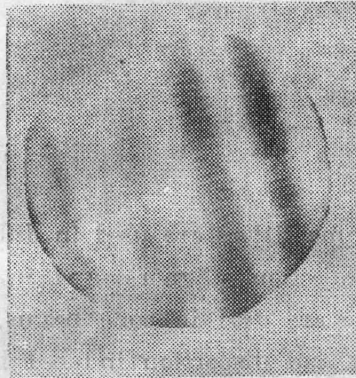


Fig. 11 Interference pattern before prism rotation

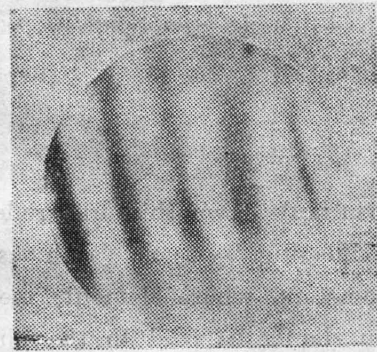


Fig. 12 Interference pattern after prism rotation

#### 四、结 论

偏振全息干涉方法观察多层介质反光膜的反射相位特性方便、直观,不失为一种有用的方法。多层介质膜是一种对于入射角各向异性的相位畸变元件和对于波长的相位色散元件。在高质量成像仪器和高精度干涉仪中应该慎用。一般情况下,层数越少,相位畸变和相位色散越小;入射角越小,相移差越小,对于上述这类应用,应在膜层层数及入射角与像差和精度要求之间折衷选择,注意选择小的孔径角和入射角,在膜层设计中除了考虑反射率和透过率,同时应考虑相位问题,并把它也作为一个约束条件。

#### 附 录

##### 1. 71 层膜

$S(HL)^{11}H[510\text{nm}, n_L=1.46, n_h=1.90]L[490\text{nm}, n_L=1.46](HL)^{11}H[460\text{nm}, n_L=1.46, n_h=1.92]L[390\text{nm}, n_L=1.46](HL)^{11}H[350\text{nm}, n_L=1.46, n_h=1.92]A$

##### 2. 31 层膜

$S(HL)^7H[610\text{nm}]L[550\text{nm}](HL)^7H[510\text{nm}]An_s=1.52, n_L=1.46, n_h=2.2$

##### 3. 6 层膜

$S2L(HL)^2HS, n_L=1.375, n_h=2.512, n_s=1.52$

## 参 考 文 献

- [1] 马拉卡拉编, 白光强等译; 《光学车间检验》, (机械工业出版社, 1983), 130.  
[2] 钱秋明, 李庆熊, 王能鹤; 《光学学报》, 1986, 6, No. 7 (Jul),  
[3] 光学零件工艺手册编写组; 《光学零件工艺手册(中)》, (国防工业出版社, 1977), 244.  
[4] Z. Knittl; *Optics of Thin Film*, (John Wiley & Sons, 1976), 398.

### Measurement of reflective phase distortion of multi-layer thin films by using polarization holographic interferometry

LI QINGXIONG, WANG NENGHE AND QIAN QIUMING

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

(Received 22 October 1985)

#### Abstract

When multi-layer thin film reflectors and beamsplitters are used in diffraction-limited imaging systems (such as a mask projection aligner) and in precise interferometers, where elements mentioned above are used in cone beams, special attention should be paid to the phase distortion and dispersion induced by these elements.

Reflective phase distributions of some specific films are calculated by using the well-known characteristic matrix method. It is explicated that an element of this kind acts as a phase distortion element with respect to the incident angle and as a phase dispersion element with respect to wavelength. For a 71-layer UV wideband reflector, the phase distortion and dispersion can reach 3; for a 31-layer neutral reflector, 0.78; for a 6-layer prism beamsplitter, 0.2.

Measurement of phase distortions by means of polarization holographic interferometry is described in details in this paper. Information about the phase distortion of a whole wavefront can be obtained directly.

At the end of this paper, it is pointed out that the experimental results agree well with numerical analysis.