

# 利用 Mirau 型相关显微镜进行 面型检测的研究\*

陈 侦 王桂英 王之江

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 在 Mirau 型干涉仪的基础上,利用相关检测的原理,实现了 Mirau 型相关面型检测仪。通过该面型检测技术,克服了移相显微干涉(PSMI)面型检测系统中纵向分辨能力受衍射效应制约这一限制,正确测量了面型的纵向尺度。

**关键词** 相关显微镜,面型检测,纵向分辨能力

## 1 引 言

在移相显微干涉(PSMI)面型检测中,由于存在衍射效应的影响,使得系统在对具有细微横向结构(接近衍射极限)样品的面型检测时,其纵向分辨能力受到影响,检测到的纵向高度较之实际样品的纵向高度有所下降<sup>[1]</sup>。这种误差是由于 PSMI 本身的算法和衍射效应所造成的系统误差,只能在一定条件下得到改善,而无法消除。

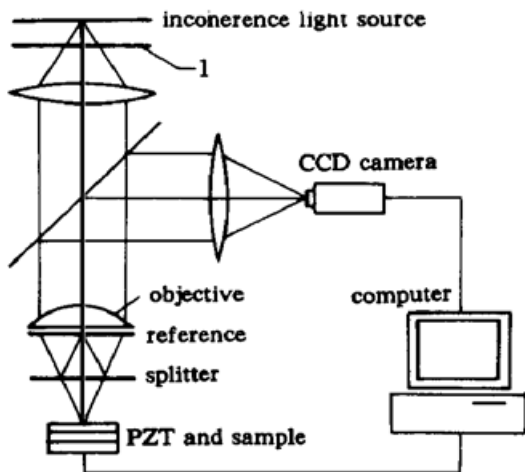


图 1 Mirau 型相关面型检测仪的配置

Fig. 1 Configuration of Mirau correlation profiler

本文在 Mirau 型 PSMI 干涉仪的基础上根据相关检测的原理<sup>[2,3]</sup>实现了 Mirau 型相关显微面型仪。利用该显微面型仪,成功地测量了具有横向微结构的样品面型,消除了 PSMI 中的纵向分辨能力受到横向分辨能力的制约这一系统误差,正确地测量了具有微结构面型的纵向尺度。

## 2 原理和系统实现

本系统是基于 Mirau 型干涉仪的面型检测系统。在使用不同的算法和系统配置时,该系统可以分别用于实现 PSMI 面型检测仪和相关面型检测

仪。具体的系统配置如图 1 所示。图中,样品放在压电陶瓷驱动器(PZT)上,可由计算机控制沿  $z$  向移动,样品和参考板的干涉条纹图经过成像系

\* 国家自然科学基金(No. 69777004, No. 69637030)和中国科学院基金(No. 9625C-056-21)资助项目。

收稿日期: 1998-03-05; 收到修改稿日期: 1998-04-21

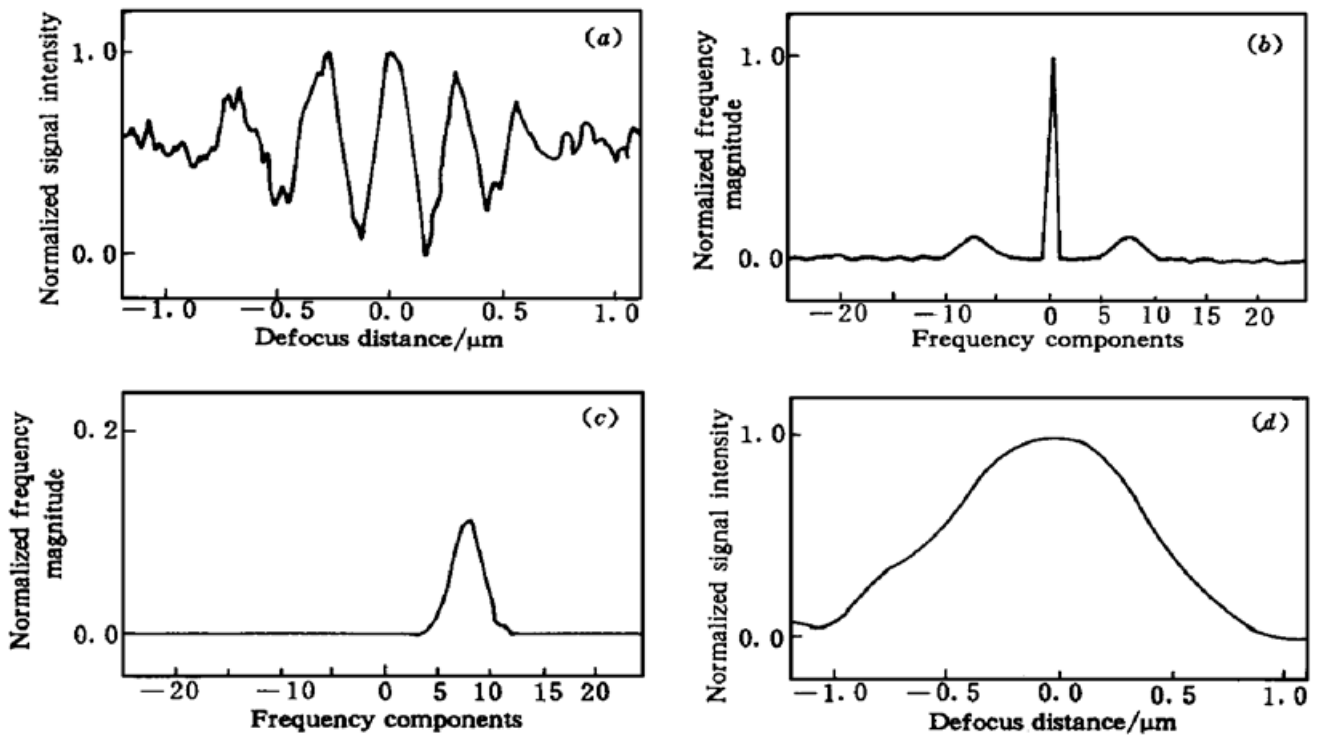


图 2 数据处理过程

- (a) 计算机所采集到的原始数据(已归一化);(b) 将原始数据作快速傅里叶变换(FFT)得到的频率分布;  
(c) 正频率分量;(d) 正频率分量做逆傅里叶变换所得到的结果

Fig. 2 Illustration of data processing

- (a) original data acquired by the computer; (b) frequency distribution of original data;  
(c) the positive frequency component; (d) inverse Fourier transformation of the positive frequency component

描过程并不需要按照一个要求的步长(如PSMI中的 $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ 等)进行,而只需保证在扫描过程中每一步的步长相等就可以了。扫描步长的大小可以在数据处理的过程中确定。我们采用的是如下的方法:

在处理每一个待测点数据时,通过傅里叶变换求出其频谱分布后,找到+1级频率分量极大值的位置,然后通过快速傅里叶变换的性质<sup>[8]</sup>求出原始数据的每个起伏周期所需的扫描步数 $n$ 为

$$n = N/f \quad (3)$$

由于每个起伏周期的实际高度等于 $\lambda/2$ ,因此可以求出扫描步长 $s$ 为

$$s = \frac{\lambda/2}{n} = \frac{f\lambda}{2N} \quad (4)$$

其中 $N$ 为快速傅里叶变换的取样点数, $f$ 为+1级频率分量极大值的位置。最后对所有的数据点使用此过程并求出扫描步长的均值作为实际扫描步长。

### 3 实验结果

测量了相关面型检测系统的检测准确度。将多次对同一测试区域的面型检测结果相比较,可以得到系统的重复测试精度;将检测结果同标准面型结构相比较则可以得到系统的检测精度。实验测得该系统的重复测试精度和检测精度分别为10 nm和7 nm。

nm。

## 4 讨 论

使用相关面型检测技术,可以使检测到的面型的纵向尺度不受衍射效应的影响,能给出面型的实际纵向尺度。整个系统可以通过PSMI面型检测系统改装实现(仅需要将原有的非相干准单色光源改成宽带非相干光源即可)。和PSMI面型检测仪相比,系统使用不同的软件和算法,但能得到较好的纵向检测能力。需要指出的是,衍射效应对系统检测能力的影响仍然不能忽略。由于衍射效应的存在,系统对具有细微横向结构样品的检测结果仍然会出现轮廓模糊的现象。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Zhen, Wang Guiying, Wang Zhijiang. Analysis of diffraction effect in phase shifting microscopic interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(6): 877~ 880 (in Chinese)
- 2 S. S. C. Chim, G. S. Kino. Correlation microscope. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(10): 579~ 581
- 3 G. S. Kino, S. S. C. Chim. Mirau correlation microscope. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(26): 3775~ 3783
- 4 Ding Zhihua, Wang Guiying, Wang Zhijiang *et al.*. An intelligent profilometer for roughness measurement. *Acta of Metrology* (计量学报), 1996, **17**(1): 25~ 30 (in Chinese)
- 5 Ding Zhihua, Wang Guiying, Wang Zhijiang. Noncontact measurement of surface topography by Mirau interferometer. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(4): 355~ 362
- 6 S. S. C. Chim, G. S. Kino. Phase measurements using the Mirau correlation microscope. *Appl. Opt.*, 1991, **30**: 2197~ 2201

## Study of Surface Topographic Measurement by a Mirau Correlation Microscope

Chen Zhen Wang Guiying Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** A surface profile system based on a Mirau interferometer is described which uses the correlation method. This method may overcome the difficulty encountered in a PSMI profiler, in which the vertical response is limited by the diffraction effect of the objective. The system gives the accurate vertical scale of the measured surface.

**Key words** correlation microscope, surface topology, vertical resolution

统被 CCD 所接收,并由计算机采集。如果在图 1 中的 1 处加上单色滤光片,即系统使用非相干准单色光源时,配以相应的软件和算法,系统可用来实现 PSMI 面型检测仪<sup>[4,5]</sup>。当在图 1 的 1 处不加滤光片,即系统采用非相干宽带光源时,就可用于实现相关面型检测仪。

## 2.1 原 理

相关面型检测仪采用白光干涉技术,利用检测宽带光源的自相关过程来确定样品的表面高度。根据相关检测的原理,对待测面上的一个待测点,其经过成像系统被探测器接收到的光强度为

$$I = A^2 + B^2 + I_{AB} \quad (1)$$

其中,在 Mirau 型干涉仪中,  $I_{AB}$  为<sup>[2,3,6]</sup>

$$I_{AB} = 4\pi AB |U|^2 \int_{\text{bandwidth}} \int_0^{\theta_0} k^2 \times \{ \cos[2k(z - z_0) \cos\theta + \phi] \sin\theta \cos\theta d\theta \} F(k) dk \quad (2)$$

式(1)中第一项和第二项为常数,第三项为相关项。(1),(2)两式中, $A$ 为样品表面的反射系数, $B$ 为参考面的反射系数;(2)式中, $z_0$ 为参考板离焦平面的距离, $z$ 为样品表面待测点距焦平面的距离; $k = 2\pi/\lambda$ , $F(k)$ 为系统使用的宽带光源的强度分布。

实验中沿  $z$  向扫描移动样品,并在每一个  $z$  值处取一幅待测区域的干涉条纹图,共取 64, 128 或 256 幅。此时,  $I_{AB}$  是  $x$ ,  $y$  和  $z$  的函数。对一个确定的待测点,即  $x$  和  $y$  确定时,  $I_{AB}$  仅是  $z$  的函数,  $I_{AB}$  随  $z$  的变化大致是一个受到包络调制的正弦函数,该包络(调制函数)在  $z = z_0$  处具有最大值,并且随着  $|z - z_0|$  的增大而单调减小。图 2(a) 给出了对于一个实验点沿  $z$  轴移动时系统探测到的强度分布。如果我们假定参考面是平整的,即  $z_0 = \text{常数}$ ,则该包络的最大处就是待测点的面型高度。对所有待测点求出其面型高度,就可以得到整个表面的面型结构。

## 2.2 白光干涉镜头的实现

### 2.2.1 补偿板

在实验中,为实现白光干涉,要在 Mirau 干涉仪中使用补偿板。实验配置可参考文献[5],其中补偿板和分光板的光学性质完全相同。

### 2.2.2 参考板

由于参考板的表面高度差直接关系到干涉图的形成,即关系到系统的检测精度,因此其表面要尽可能地光滑;同时参考板还要有足够高的反射率,以提供有足够亮度的参考光。在我们的实验中使用的参考板是超光滑硅片,其反射率为 90%,且表面粗糙度经过检定  $S_{\text{RMS}} = 0.5 \text{ nm}$ ,基本满足了实验的要求。

## 2.3 条纹数据的处理

### 2.3.1 单个待测点数据的处理

采取如下方法处理单个待测点沿  $z$  轴的强度分布值(如图 2(a) 所示):首先将其数据作傅里叶变换,得到如图 2(b) 所示的频谱分布,对该频谱分布,去掉负频率分量和零频分量,仅留下正频率分量如图 2(c) 所示(同 S. S. C. Chim 和 G. S. Kino 所使用的方法<sup>[2,3,6]</sup>相比,我们并没有将正频率分量移至频谱域的中间,这是因为该移动并不改变逆傅里叶变换的模的分布,因此不会影响测量结果),最后将正频率分量做逆傅里叶变换得到原始数据的包络曲线(图 2(d)),通过拟合求出该包络曲线极值点的位置。

### 2.3.2 扫描步长的确定

由于样品沿  $z$  向扫描,其扫描步长是确定表面面型的一个重要参数。在我们的系统中,扫

实验中采用的是  $N.A. = 0.4$  的物镜, 宽带光源的中心波长为  $550\text{ nm}$ , 考虑到系统使用的是非相干光源, 此时系统的横向分辨能力的极限为  $0.5 \times \lambda/N.A. \approx 0.5 \times 550\text{ nm}/0.4 \approx 0.69\text{ }\mu\text{m}$ 。通过实验测试了具有不同横向周期的栅状标准板的面型结构, 并就所测得的纵向高度进行了比较。待测标准板的横向周期为  $1\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ , 标准高度为  $150\text{ nm}$ , 实验结果如图 3 所示。

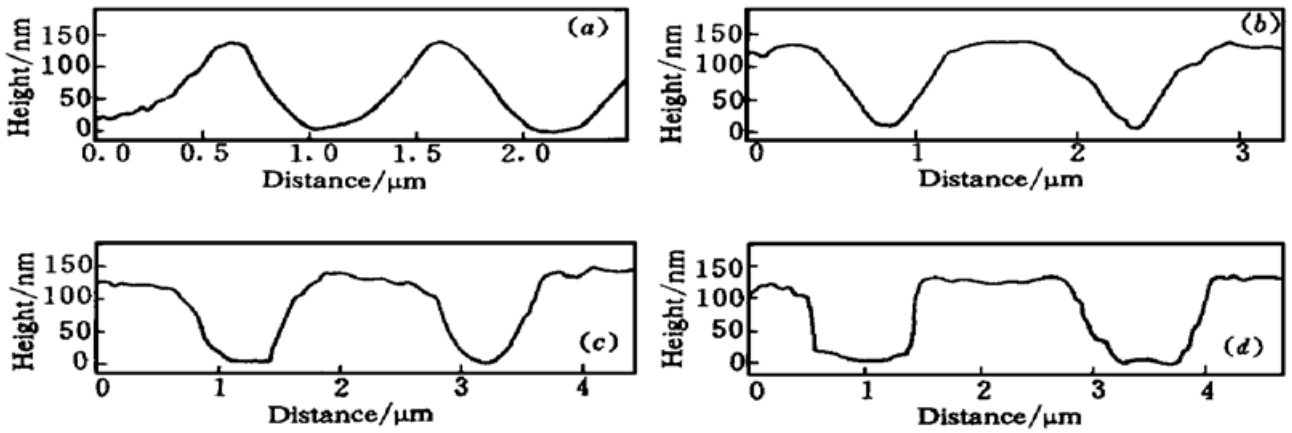


图 3 对具有周期性结构的标准板的检测结果

(a) 被测标准板周期=  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 测得其沟槽高度=  $143\text{ nm}$ ; (b) 周期=  $1.5\text{ }\mu\text{m}$ , 测得高度=  $144\text{ nm}$ ;  
 (c) 周期=  $2\text{ }\mu\text{m}$ , 测得高度=  $148\text{ nm}$ ; (d) 周期=  $2.5\text{ }\mu\text{m}$ , 测得高度=  $156\text{ nm}$

Fig. 3 Measured result of a standard plate with periodical undulation

(a) period of the tested plate is  $1\text{ }\mu\text{m}$ , measured height of the undulation is  $143\text{ nm}$ ; (b) period=  $1.5\text{ }\mu\text{m}$ , height=  $144\text{ nm}$ ;  
 (c) period=  $2\text{ }\mu\text{m}$ , height=  $148\text{ nm}$ ; (d) period=  $2.5\text{ }\mu\text{m}$ , height=  $156\text{ nm}$

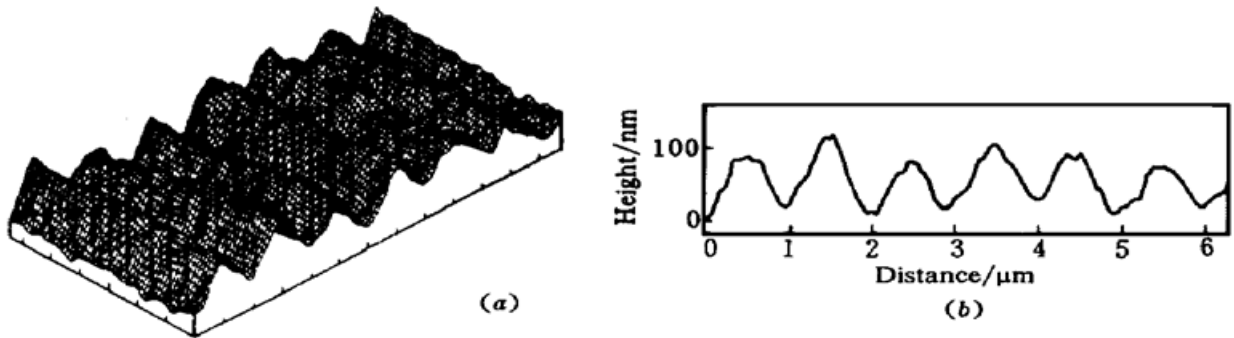


图 4 光盘盘基预刻槽的检测结果。检测所得的刻槽深度为  $98.3\text{ nm}$

(a) 面型图; (b) 截面图

Fig. 4 Measured result of an optical disk surface. The measured height of the surface ditch is  $98.3\text{ nm}$

(a) surface profile; (b) the corresponding section plane

由图 3 可以看出, 随着样品的横向结构变小, 系统所检测得到的标准板的栅状结构逐渐变得模糊, 但是系统所测得的样品的纵向尺度却基本保持不变, 也就是说系统对样品的纵向尺度的检测能力基本不受衍射效应的影响。

另一个测试样品是某光盘的预刻槽, 该被测槽型结构的标准参数为: 槽型周期为  $1.0\text{ }\mu\text{m}$ , 槽沟道宽度为  $0.4\text{ }\mu\text{m}$ , 槽深为  $90\text{ nm}$ 。图 4 给出了检测结果。该结果基本给出了光盘预刻槽的实际高度, 约为  $98.3\text{ nm}$ , 衍射效应不会影响检测到的沟槽的实际高度。这一点与 PSMI 面型仪的检测结果形成对比, 在使用 PSMI 方案时, 系统对该样品所测得的沟槽深度约为  $25.5$