

移相显微干涉系统中的衍射效应分析*

陈 侦 王桂英 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 在移相型显微干涉轮廓仪中, 由于显微放大系统对每幅干涉条纹图能通过的空间带宽有限, 使得在最终计算重构样品细节形貌时出现畸变现象, 通过模拟计算给出了对这种现象的分析, 并给出了在一定条件下改善该畸变现象的方法。

关键词 移相显微干涉术, 衍射效应, 模拟计算。

1 引 言

移相型显微干涉(PSMI)轮廓仪采用了移相干涉技术来提取干涉条纹图的位相, 能够获得较高的纵向分辨率(可达纳米量级)。但其横向分辨率受到衍射效应的影响, 仅能达到微米至亚微米量级^[1, 2]。

适合于做这种测量的情形一般是针对平滑表面的粗糙度测量。而对于横向变化细节小至接近于系统衍射极限的样品(约为亚微米量级), 由于移相型显微干涉系统的横向分辨能力有限, 测得的样品纵向起伏远远低于样品真实纵向起伏。对于这种在样品横向变化尺度接近衍射极限情况下, 移相型显微干涉系统的纵向分辨能力受横向分辨率制约的现象, 在本文中采用模拟计算的方式进行了分析, 并提出了对该现象的改善方法。

2 模拟计算

如果将整个移相型显微干涉系统看作一个整体, 将样品的原有轮廓分布看作输入, 并将最终由计算机重构得到的样品轮廓作为输出, 则该整个系统不是一个线性不变系统, 不能用频谱分析的方法进行分析。这种对线性不变性的破坏源自于移相干涉法的算法本身, 无论是三步术、四步术、还是五步术都不能避免对该性质的破坏。因此, 本文采用模拟计算的方式来检查这种横向变化细节在接近于系统衍射极限时对系统最终测量结果的影响。模拟计算模拟整个移相干涉显微术的数据采集和处理过程。在模拟计算过程中考虑了由显微成像系统的有限带宽对测量过程的影响, 并且忽略由电子学探测系统(包括 CCD 探头、图像信号传输线、图像采集板等)在数据采集过程中的影响, 认为其为一个理想的传输系统, 即认为在 CCD 探

* 国家自然科学基金(No. 69777004 和 No. 69637023)和中国科学院大型仪器开发项目(No. 9625C-056-21)。

收稿日期: 1997-04-09; 收到修改稿日期: 1997-06-27

测面上的光强干涉图样相当于由图像板采集到的用灰度值表示的数字化干涉图样。考虑到最常用的情形，计算中采用了在完全非相干光照明模式时的四步移相法。具体计算过程如下：

- 1) 取具有一定横向和纵向结构的样品，并设定视场大小；
- 2) 将样品按照不同的初始位相(0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$) 分别与参考板(设为平板) 干涉得到四幅干涉图样的数据；
- 3) 将这四幅干涉图样分别进行快速傅里叶变换，并在频域乘以显微成像系统的光学传递函数，然后再进行反傅里叶变换得到四幅像的数据；
- 4) 将所得到的四幅像的数据通过相应的位相计算公式求出干涉条纹图中各点的位相，并计算出相应的样品形貌；

为考察衍射效应对不同横向变化细节的影响，将样品取为如图 1(a) 所示的一维周期性的沟道结构，并分别取一系列具有不同横向周期的样品。计算中将样品的纵向起伏取为 $\lambda/10$ ，横向周期分别取为 $0.5 \times \lambda/NA$ 到 $10 \times \lambda/NA$ 。对该组样品的计算结果如图 1(b) ~ (f) 所示。



Fig. 1 The supposed sample surface as computation mode (a) and some computation results (b~ f). (a) the supposed sample surface parameters: height= $\lambda/10$, sample's period varies from $0.5 \times \lambda/NA$ to $10 \times \lambda/NA$ (b) computation result of sample surface while sample's period equals $0.5 \times \lambda/NA$. The measured surface height is approximately 0. (c) period= $0.6 \times \lambda/NA$, measured height= 24.9% of the ideal sample height. (d) period= $1.0 \times \lambda/NA$, measured height= 69.9%. (e) period= $4.0 \times \lambda/NA$, measured height= 94.2%. (f) period= $10.0 \times \lambda/NA$, measured height= 97.7%

由图可见，随着样品的横向周期减小，对重构后样品轮廓的影响有两个方面：1) 重构后的样品沟道轮廓变得平滑；2) 重构后的样品轮廓的纵向起伏高度小于样品真实高度。

为考察当样品的横向细节趋向于系统能够通过带宽时，系统的纵向分辨能力受横向分辨能力的制约关系，可以将重构后的样品的纵向高度起伏和样品的原高度的百分比作为纵坐标，将该样品的横向变化周期作为横坐标，所做出的图形如图 2 所示。

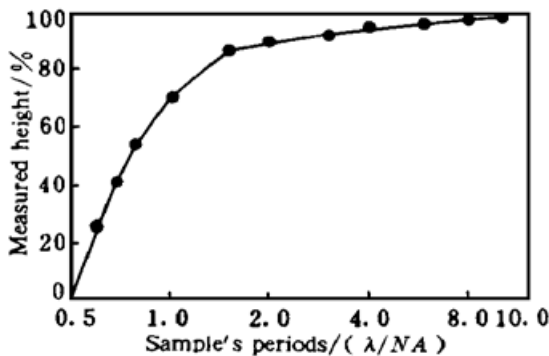


Fig. 2 System vertical response to sample surfaces with different transverse periods

图 2 中 $0.5 \times \lambda/NA$ 为该完全非相干系统的截止频率的倒数，可以看出当样品变化细节达到或小于 $0.5 \times \lambda/NA$ 时，该细节是不可分辨的。从系统能够通过的空间带宽来考虑，这种现象也是可以理解的。从图中还可以看到，当样品的变化周期为 λ/NA 时，测得的样品的纵向起伏高度约为真实高度的 70%，这可作为测量恰能较好反映真实物体轮廓的标准。也就是说，对于移相显微干涉系统，由于衍射效应的影响，其所能测量的样品横向细节最多能够达到 λ/NA 。

对于其它的移相干涉算法，包括三步术、平均三步术和五步术的模拟计算也得到了同样的结果。

3 改善途径和实验结果

考虑到一个完全非相干的衍射受限系统, 其高频响应随频率的增高而降低。若能改善系统对每幅干涉条纹图的高频响应, 应该能够改善整个移相型显微干涉系统的测量结果。按照这个想法, 可以对每幅经过成像系统的干涉图在其频域进行反滤波, 以减小由显微成像系统的衍射效应造成的系统对样品的高频细节响应减弱这一现象, 将反滤波函数取为:

$$P(f_x) = \begin{cases} \frac{\cos [(\pi/2) (\lambda f_x / 2NA)]}{H(f_x)} & f_x < \frac{2NA}{\lambda} \\ 0 & f_x \geq \frac{2NA}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $H(f_x)$ 为完全非相干系统的光学传递函数, 其中加上余弦因子是为了降低在反滤波时高频噪音的影响^[4]。在一维情况下显微成像系统的光学传递函数 $H(f_x)$ 和相应的反滤波函数 $P(f_x)$ 如图 3 所示。对反滤波后的干涉图样进行计算重构即可得到改善后的样品轮廓图。比较在反滤波前后系统对不同横向周期样品的纵向响应可看出, 在反滤波后, 当样品的横向变化周期趋于系统的衍射极限时, 系统对样品纵向起伏的响应得到了改善, 如图 4 所示。

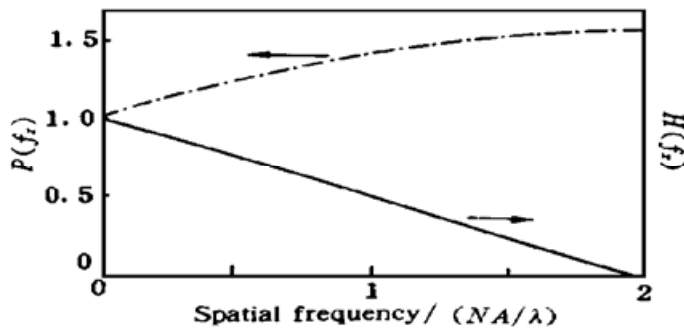


Fig. 3 One-dimensional Optical Transfer Function (OTF) of an incoherent microscopic system and the inverse filtration used in the computation. (different from the normal OTF which is usually a complex function, the OTF of a ideal incoherent system is a real function, so it can be drawn as above)

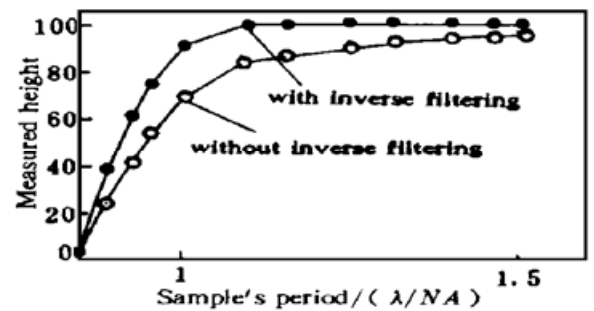


Fig. 4 Comparison of the system vertical response to samples with inverse filtering and without inverse filtering

光盘预刻槽是一种周期性的沟道状结构。用移相型显微干涉轮廓仪对一实验用光盘预刻槽进行测量。测量系统采用 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ 的非相干光照明, 物镜的数值孔径 $NA = 0.4$, 相应的系统横向分辨率极限为 $0.5 \times \lambda/NA = 0.79 \mu\text{m}$; 显微成像系统的放大倍率使 $1 \mu\text{m}$ 大小的条纹结构映射到 CCD 像面上约 13 个像素点, 图像采集系统采集像素的灰度等级为 8 bit, 系统采用四步移相术。待测的光盘预刻槽的槽型周期为 $1.6 \mu\text{m}$, 槽沟道宽度为 $0.5 \mu\text{m}$, 槽深为 70nm 。对于该系统的测量结果如图 5(a) 所示。由图中可以看出实验测得的槽型横向结构与原有槽型横向结构基本符合, 但测得的槽型纵向结构变得模糊, 其测得槽深仅为 20.73nm , 与真实槽深度相比有较大的差距。

如果将通过原有系统测得的干涉条纹图按照(1)式在频域进行反滤波, 以提高系统对各幅干涉图高频响应。再将反滤波后的数据进行重构, 可以得到改善后的预刻槽的轮廓图。如图 5(b) 所示。此时测得的槽深度为 56.48nm 。可以看出, 该结果较之于未进行反滤波的系统有了一定的改善。

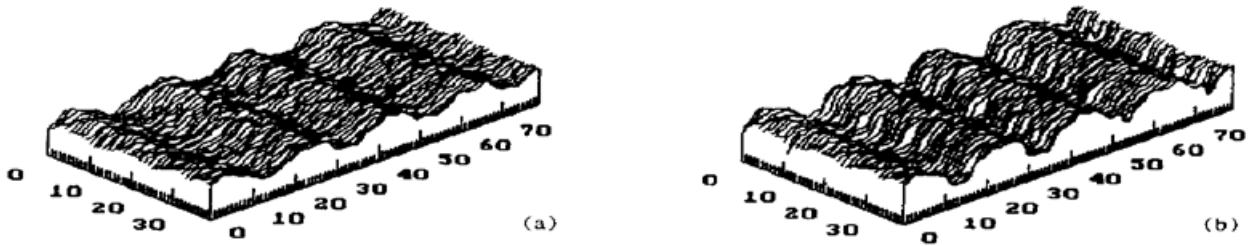


Fig. 5 Comparison of the profiled sample surface with and without inverse-filtering taken: (a) without inverse-filtering taken, the measured sample height equals 20.73 nm. (b) with inverse-filtering taken, the measured sample height equals 56.48 nm. The improvement was seen obviously

可以通过计算模拟该槽型结构参数和测量系统参数的移相型显微干涉系统,以模拟在该参数下的衍射效应的影响和反滤波过程对系统纵向响应的改善。其计算结果为:考虑到衍射效应影响,系统对该槽型结构测得的槽深度应为 29.99 nm,若将各幅干涉条纹图经过反滤波后再进行重构,其得到的槽型结构的深度应为 54.07 nm。可以看出,理论计算结果与实验结果相近。至于实验结果与标准参数之间的差异,则可能来自于多种原因,包括:1) 检测实物与槽深的标准参数不一定相符,且实验中检测的盘片有保护膜层,对测量的数据有一定的影响。2) 由于系统的频率相应不完整性,影响了对槽型结构的测量数据,从而也影响了重构后的槽型结果。

结 论 在移相型显微干涉轮廓仪中,由于衍射效应的影响,当被测样品的横向细节趋向于系统的衍射极限时,测得的样品纵向起伏结构会出现畸变现象,系统的纵向分辨能力与系统的横向分辨能力之间存在一定的制约关系。通过模拟计算给出了对这一制约关系的分析。在完全非相干光照明模式下,通过对测得的干涉条纹进行适宜的反滤波,在一定程度上改善了系统的纵向响应。

参 考 文 献

- [1] K. Creath, Phase-measurement interferometry techniques. In: E. Wolf ed. *Progress in Optics*, XXVI. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. 351~ 393
- [2] J. Schwider, Advanced evaluation techniques in interferometry. In E. Wolf ed. *Progress in Optics*, XXIX. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990. 271~ 359
- [3] J. C. Wyant, How to extend interferometry for rough-surface tests. *Laser Focus World*, 1993, 29(5) : 131~ 133
- [4] G. S. Kino, S. S. C. Chim, Mirau Correlation microscope. *Appl. Opt.*, 1990, 29(26) : 3775~ 3783

Analysis of Diffraction Effect in Phase Shifting Microscopic Interferometry

Chen Zhen Wang Guiying Wang Zhijiang

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

(Received 9 April 1997; revised 27 June 1997)

Abstract In the phase shifting microscopic interferometry profiler, surface profile distortion exists due to the limitation of finite spatial bandwidth of the microscopic system. The phenomenon through simulation computation was analyzed. A suggestion to improve the response of the system was given.

Key words phase shifting microscopic interferometry (PSMI), diffraction effect, simulation computation.