

光学显微三维测量解耦合准则

刘 俭, 谷 康, 李梦周, 谭久彬

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 光学显微三维测量耦合效应是指沟槽或台阶样品高度测量准确性受横向周期影响产生原理误差的现象。采用卷积不相关原则和有限能量损失原则, 分别建立了薄样品和深沟槽样品光学显微三维测量的解耦合模型, 揭示了被测样品特征参数与光学仪器表征能力之间的关联关系。与现有 W/3 准则相比, 光学显微三维测量解耦合准则能够客观反映光学仪器表征能力受样品结构差异变化的影响, 指示高度测量解耦合评定的示值区域, 预见高度测量原理误差产生, 为沟槽或台阶样品三维结构表征提供了一种新的计量评定准则。

关键词: 解耦合准则; 光学显微测量; 薄样品测量; 深沟槽测量; 台阶高度
中图分类号: TB96 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0302001

3D measurement decoupling criterion in optical microscopy

Liu Jian, Gu Kang, Li Mengzhou, Tan Jiubin

(Center of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The coupling effect in three dimensional measurements using optical microscopy refers to the phenomenon that the accuracy of the measurement height of a groove or step sample that suffers a principle error caused by the influence of the relatively small transverse period of the sample. Based on the convolution irrelevance principle and the limited energy lost principle, two models depicting the coupling effects in measurements of the thin step samples and the deep groove samples were established respectively, thus the coupling relationship between the geometric parameters of the sample and the measurement capability of the optical instrument were revealed. Compared with the existing W/3 reading rule, this criterion can more objectively reflect the different influences of samples with different structures on the actual measurement capability of the optical instrument, and indicate the assessment portions for height measurements without accuracy loss, also is able to predict the generation of principle error in height assessment if the structure is too tight or deep, thus provides a new reading and evaluation criterion for the three dimensional measurement of a groove or step sample.

Key words: decoupling criterion; optical microscopic measurement; thin sample measurement; deep groove measurement; step height

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发项目(2011YQ040087); 国防工业基础研究项目(2013JC0873); 国家自然科学基金(51275121)

作者简介: 刘俭(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学立体显微成像与计量、应用光学技术方面的研究。Email: liujian@hit.edu.cn

通讯作者: 李梦周(1992-), 男, 博士, 主要从事光学立体显微成像与计量、生物成像技术方面的研究。Email: lm2@hit.edu.cn

0 引言

在计量领域中,光学立体显微成像与测量仪器被广泛应用于光学元件面形测量^[1]、集成电路线宽测量^[2]、微结构封装对准^[3]和微机电器件几何参数表征^[4]等。三维立体显微测量技术与传统二维显微成像技术相比,二者的重要区别在于,后者关注横向细节分辨率和对比度,而前者除了要获得良好的横向分辨能力之外,还要准确获取样品高度信息。高度信息的引入使得显微仪器技术及理论变得更为复杂,一些新的计量现象也随之出现,并引起国际计量研究机构和标准化组织(ISO)专家的关注,例如三维样品测量的耦合效应。所谓光学显微三维测量耦合效应,是指沟槽或台阶样品高度测量准确性受横向周期影响产生原理误差的现象。从事专业计量工作的仪器使用者发现,高度测量结果会受到样品横向周期的影响而产生变化,相同高度情况下,横向周期越小,可能产生的高度测量偏差越大,这一现象不能得到现有有关光学分辨力理论的解释。

2007年,德国PTB报道了一种基于金字塔结构台阶样品评价扫描探针显微镜三维响应特性的计量方法^[5]。使用者可以借助这种样品评价高度测量误差水平,但如何才能避免产生高度测量偏差并未得到理论阐述。在国际标准化进程中,三维显微计量准确性要求不断提高,高度测量的不确定度需要达到纳米甚至更高水平。因此,无论是普通的仪器使用者,还是专业的计量研究人员都迫切需要一个能够评价显微系统对三维样品的有效分辨能力,预见测量合理性的计量准则,从而选择适当的测量仪器参数,合理读取测量示值,避免产生三维测量的原理误差。

然而,现有国际标准[ISO 5436-1:2000(E)]^[6]和我国国家标准、计量校准规范目前广泛沿用的是W/3准则。W/3准则规定,在台阶或沟槽样品测量中,以台阶或沟槽底部的理论宽度为W,则高度测量结果的示值读取区域为距离台阶或沟槽理论边缘位置W/3以外的区域。这种示值读取方法能够避免台阶边缘对探针扫描测量的影响,因此被广泛用于机械探针扫描测量^[7]。但W/3准则并不适用于光学显微仪器,因为光学系统的分辨能力不仅和样品特性有关,而且与照明波长、数值孔径等系统参数密切相关。W/3准则没有反映被测样品特征参数与光学

仪器表征能力之间的关联关系,也没有反映台阶高度或者沟槽深度对测量结果的影响。

文中从光学显微三维测量系统的点扩展函数(Point Spread Function, PSF)与物函数的作用关系出发,采用卷积不相关原则和有限能量损失原则,分别建立了薄样品和深沟槽样品光学显微三维测量的解耦合模型,揭示了被测样品特征参数与光学仪器表征能力之间的关联关系,得到了被测样品耦合距离与台阶高度、光学系统照明波长和系统数值孔径的关系,为沟槽或台阶样品三维结构表征提供了一种新的计量评定准则。

1 薄样品测量解耦合模型

常用光学显微三维测量方法主要可分为宽场测量和点扫描测量,例如白光干涉、结构光照明探测等属于宽场测量,而激光共焦扫描测量等则属于点扫描测量。对于薄样品而言,由于光束的遮挡作用几乎可以忽略,因此光学显微三维成像的过程可以较准确地用光学系统PSF与物函数的卷积来描述。通过对卷积过程的分析,能够揭示沟槽或台阶样品的光学显微三维测量耦合效应。

台阶样品的物函数模型可以表示为:

$$t(x, z) = \begin{cases} \delta(z+h/2), & x < 0 \\ \delta(z-h/2), & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t(x, z)$ 为振幅反射式台阶样品; h 为台阶高度。假设 $H(x, y, z)$ 为光学系统的三维振幅点扩展函数,则台阶样品 $t(x, z)$ 在像空间的三维振幅 $E(x, z)$ 为:

$$E(x, z) = E_1(x, z) + E_2(x, z) \quad (2)$$

$$E_1(x, z) = H(x, y, z) \otimes_3 \left[\delta \left(z + \frac{h}{2} \right) \frac{1 - \text{sgn}(x)}{2} \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau_y \int_x^{+\infty} H \left(\tau_x, \tau_y, z + \frac{h}{2} \right) d\tau_x \quad (3)$$

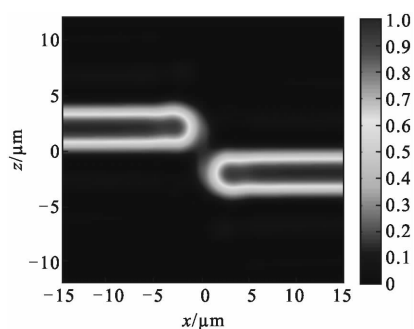
$$E_2(x, z) = H(x, y, z) \otimes_3 \left[\delta \left(z - \frac{h}{2} \right) \frac{1 + \text{sgn}(x)}{2} \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau_y \int_x^{+\infty} H \left(\tau_x, \tau_y, z - \frac{h}{2} \right) d\tau_x \quad (4)$$

式中: \otimes_3 为三维卷积符号; τ_x 和 τ_y 为计算过程的中间变量。则像空间三维光强分布 $I(x, z)$ 可以表示为:

$$I(x, z) = |E_1 + E_2|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2\text{Re}(E_1 \cdot E_2^*) \quad (5)$$

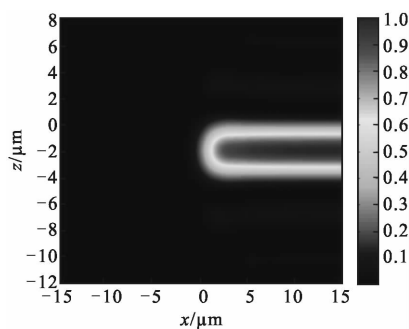
式中: $|E_1|^2$ 为仅有台阶下表面时产生的光强响应; $|E_2|^2$ 为仅有台阶上表面时产生的光强响应; $2\text{Re}(E_1 \cdot$

E_2^*)为台阶边缘与台阶上下表面都存在时形成的耦合区域的光强响应。图 1 为利用共焦扫描原理对台阶样品和平面样品进行仿真得到的像空间三维光强分布结果。比较图 1(b)和图 1(a),可以看出在台阶边缘耦合区域内光强明显下降,光强信号的减弱将会导致信噪比的下降,从而使得高度测量准确性下降甚至失真。因此在读取台阶高度时,必须忽略耦合区域内受到干扰的测量数据部分,而选取耦合区域之外的有效测量数据进行计算,才能保证台阶高度信息的准确性。因此,需要一个解耦合准则来确定耦合区域大小,保证台阶高度读取过程的合理性。



(a) 台阶样品仿真结果

(a) Simulation result of a step



(b) 平面样品仿真结果

(b) Simulation result of a plan

图 1 共焦扫描测量光强响应仿真结果($\lambda=0.5, NA=0.4$)

Fig.1 Simulation of light intensity response of a confocal microscope($\lambda=0.5, NA=0.4$)

文中所描述的薄样品是指台阶高度值小于光学系统 PSF 轴向主瓣宽度的台阶或沟槽样品。当样品满足该条件时,光学显微三维测量的解耦合模型可以根据卷积不相关原则进行建立,使得上下台阶表面的卷积成像过程互不干扰,即令公式(5)中的耦合项 $2\text{Re}(E_1 \cdot E_2^*)$ 为零。如图 2 所示,描述的即为台阶下表面的解耦合条件,为方便分析,将光学系统 PSF

简化成了椭圆形状,椭圆 B 的左半部分轮廓反映了台阶上表面作用范围最靠近下表面的边界。当台阶下表面的范围为 OA_1 时,显然上下表面的作用范围互不干扰,二者的耦合项为零,则认为该范围内的测量数据有效,该范围完全属于解耦合区;当台阶下表面的范围为 OA_2 时,台阶上下表面的作用范围出现了重合部分,二者的耦合项不为零,则认为该范围内已经包含了可能存在失真的测量数据,该范围不完全处于解耦合区;当台阶下表面的范围为 OA 时,台阶上下表面的作用区域刚好相切,二者的耦合项刚好为零,为临界情况,则认为 A 点左边即为解耦合区,测量数据有效,可信度高,A 点右侧为耦合区,测量数据准确性可能会受到上表面的影响。图中 a 为光学系统 PSF 的轴向半径, b 为 PSF 的横向半径, h 为台阶高度。

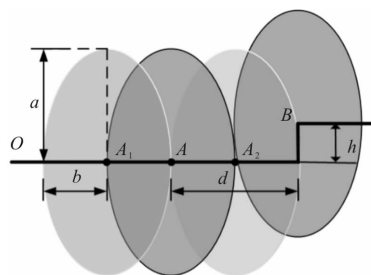


图 2 卷积不相解耦合准则示意图

Fig.2 Illustration for the convolution irrelevance decoupling criterion

定义卷积过程中台阶边缘和台阶表面(A 点)即将发生干扰的距离 d 为耦合距离,即距离台阶边缘 d 以内的区域为耦合区域,且耦合区域内测量数据失真。为了得到耦合距离 d 与光学系统 PSF 相关参数 a 和 b 以及台阶高度 h 的信息,对其进行建模分析,如图 3 所示。

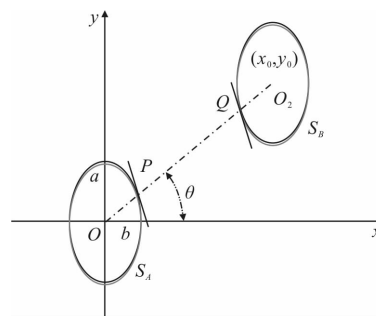


图 3 耦合距离计算模型

Fig.3 Calculation model of coupling distance

以椭圆 A 的中心为原点建立坐标系, 设两椭圆中心连线与 x 轴夹角为 θ , 椭圆 B 的中心为 (x_0, y_0) , 连线与两椭圆交点分别为 P, Q。椭圆 A 的方程可描述为:

$$S_A: \begin{cases} x = b \cos \theta \\ y = a \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

P 点坐标为 $(b \cos \theta, a \sin \theta)$ 。

椭圆 B 的方程可描述为:

$$S_B: \begin{cases} x - x_0 = b \cos \theta \\ y - y_0 = a \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

Q 点坐标 $(b \cos(\theta - \pi) + x_0, a \sin(\theta - \pi) + y_0)$ 。

当 A、B 两椭圆相切时, 即 P、Q 重合:

$$\begin{cases} b \cos \theta = b \cos(\theta - \pi) + x_0 \\ a \sin \theta = a \sin(\theta - \pi) + y_0 \end{cases} \quad (8)$$

求得 (x_0, y_0) 应满足:

$$\frac{x_0^2}{b^2} + \frac{y_0^2}{a^2} = 4 \quad (9)$$

当台阶边缘与台阶下表面刚好互不干扰时, 耦合距离与台阶高度满足:

$$\frac{d^2}{b^2} + \frac{h^2}{a^2} = 4 \quad (10)$$

以上为理论情况下, 采用卷积不相关原则对薄样品卷积成像过程进行分析, 得到的台阶下表面耦合距离公式。同理分析可知, 台阶上表面耦合距离同样满足公式(10)。因此在用光学显微方法测量薄样品台阶高度时, 台阶上下表面有效测量数据的选取区域距边缘的距离应不小于 $b \times \sqrt{4 - h^2/a^2}$ 。

考虑到光学显微系统 PSF 能量分布主要集中于主瓣第一零点内, 因此用主瓣第一零点数值来表征 $(a = 2\lambda/NA^2, b = 0.61\lambda/NA)$ PSF 椭圆半径。则可以得到薄样品光学显微测量的耦合距离与样品台阶高度、光学系统照明波长 λ 和系统数值孔径 NA 的关系为:

$$d = \frac{0.3}{NA} \times \sqrt{16\lambda^2 - h^2 NA^4} \quad (11)$$

图 4 为薄样品光学显微测量耦合距离 d 与台阶高度 h 和系统数值孔径 NA 之间的关系。

由图 4 可知, 当光学系统数值孔径一定时, 薄样品测量过程中的耦合距离随台阶高度增大而减小; 当薄样品台阶高度一定时, 薄样品测量的耦合距离随光学系统数值孔径的增大而减小。在采用卷积不相关原则对卷积过程进行分析时, 得到的耦合距离

与系统 PSF 息息相关, 且薄样品光学显微三维测量的耦合距离尤其与系统的横向分辨率直接相关。

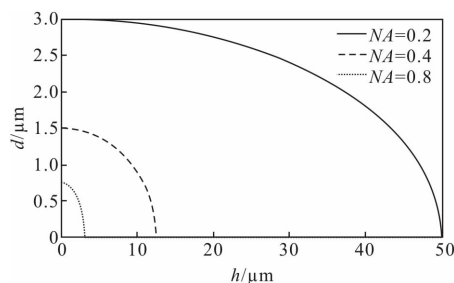


图 4 薄样品耦合距离仿真 ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$)

Fig.4 Simulation of coupling distance of thin samples ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$)

2 深沟槽样品测量解耦合模型

深沟槽样品指样品上下表面高度差大于光学系统 PSF 主瓣轴向宽度的沟槽样品, 此时样品的照明及信号光收集的过程将会较明显地受到遮挡作用的影响。由于样品上表面对下表面测量过程的遮挡作用, 将导致照明到样品下表面的能量产生损失, 损失的大小与沟槽样品的深宽比相关, 图 5 所示为光学系统数值孔径一定时, 沟槽样品的深宽比影响光学系统测量结果的示意图。实际照明强度则与信号光的强度息息相关, 而信号光的强度决定着系统的信噪比, 从而影响着测量精度。

此时测量解耦合模型中的解耦合区域则被定义为样品上理论上能够实现或者达到系统最优测量精度的区域, 其范围可以由有限能量损失解耦合准则进行判定, 具体评判标准为实际照明光强损失是否超过 20%。该阈值为根据经验, 参照 0.8 Strehl ratio 准则而选取的。该准则指出当爱里斑尺寸内收集到的能量占总能量的 80% 以上时, 系统的成像性能不会发生明显衰减。而当实际照明光强损失超过 20% 的区域则认为该区域内的精度相对于解耦合区域有所降低。

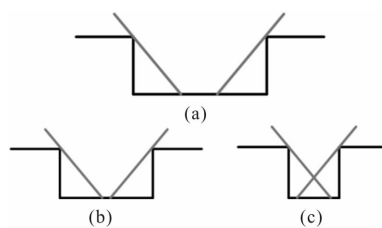


图 5 沟槽深宽比对测量结果的影响

Fig.5 Effects of groove depth to width ratio on measurement results

由图 5 可知, 由于沟槽台阶边缘对照明光束的遮挡作用, 导致随着样品深宽比的增加, 沟槽底部有效数据区域逐渐减少直至消失, 这就是造成高深宽样品光学测量困难的主要因素。对于深沟槽样品台阶高度的测量, 其沟槽宽度必须要大于台阶耦合距离的 2 倍, 才能够准确测量沟槽样品的高度信息。

前文采用卷积不相关原则对薄样品的光学显微测量过程进行了分析, 是一种比较理想状态的分析过程 (没有考虑薄样品边缘对光束的遮挡作用)。但是深沟槽样品测量过程中台阶边缘对照明光束的遮挡作用明显、不容忽视, 因此对于深沟槽样品的光学显微三维测量分析, 重点考虑了光束遮挡的因素, 提出了有限能量损失解耦合准则, 该准则的基本原理在于保持系统的信号水平在测量过程处于一种较高的恒定的状态, 主要包括信噪比和轴向包络曲线的对称性(对共焦轴向位置提取非常重要), 从而保证测量精度。基于该准则, 对深沟槽样品高度值的无精度损失的读数方案如图 6 所示, 其中 D_d 和 D_s 分别为深沟槽样品台阶上表面和下边面的耦合距离。

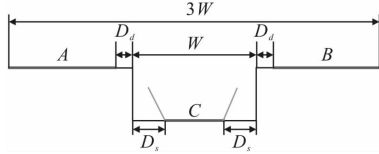


图 6 有限能量损失解耦合准则

Fig.6 Limited energy lost (LEL) decoupling criterion

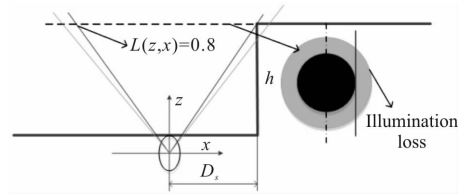
采用有限能量损失原则对深沟槽样品的单边台阶测量过程进行分析的原理示意图如图 7 所示。当

$$D_s = K \cdot \begin{cases} 1.19 \frac{\lambda}{NA} + 1.49 \frac{1 - \sqrt{1 - NA^2}}{NA} h, h \in \left(0, 0.97 \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - NA^2}} \right) \\ 0.90 \frac{\lambda}{NA} + 1.79 \frac{1 - \sqrt{1 - NA^2}}{NA} h, h \in \left(0.97 \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - NA^2}}, +\infty \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ 为照明光波长; NA 为系统数值孔径; h 为深沟槽样品的台阶高度; K 为工艺因子, 用于体现实际聚焦过程与理论结果的差异, 其取值由不同系统的实际性能决定, 通常 $K > 1$ 。

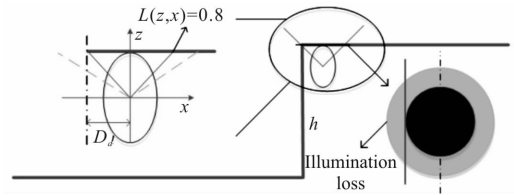
由公式(12)可知, 对于深沟槽样品的测量, 其台阶上表面的耦合距离 D_d 与系统照明波长 λ 成正比, 而与系统数值孔径 NA 成反比。由公式(13)可知, 深沟槽样品下表面的耦合距离 D_s 与系统照明波长 λ 、

测量台阶边缘附近位置时, 照明光束在台阶上表面和下表面形成的光照能量损失并不一致, 如图 7 所示, 台阶上表面边缘处的照明能量损失是由于照明光斑的缺损引起的, 而台阶下表面的照明能量损失来源于遮挡效应, 因此台阶上下表面的耦合距离计算公式略有不同。



(a) 台阶上表面光能损失

(a) Illumination loss for upper surface of step



(b) 台阶下表面光能损失

(b) Illumination loss for lower surface of step

图 7 照明光能损失示意图

Fig.7 Illustration for illumination loss

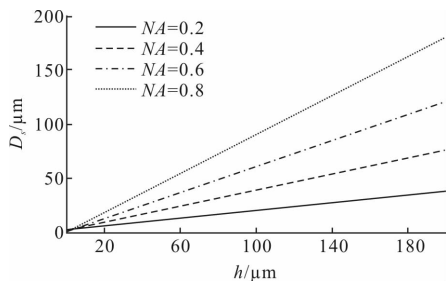
当损失能量不超过 20% 时, 通过计算可以得到深沟槽样品台阶上下表面的耦合距离分别如公式(12)和公式(13)所示^[8]。

$$D_d = 1.2K \frac{\lambda}{NA} \quad (12)$$

数值孔径 NA 以及沟槽样品的台阶高度 h 均有关联, 对上述关系的仿真结果如图 8 所示。其中图 8(a) 为不同数值孔径下台阶下表面耦合距离与台阶高度关系, 图 8(b) 为不同台阶高度情况下台阶下表面耦合距离与系统数值孔径关系。

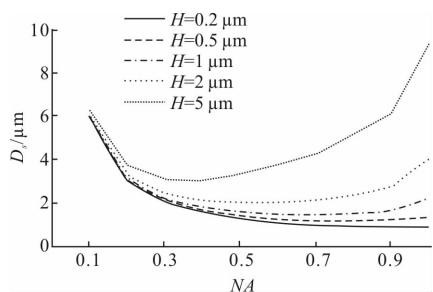
由图 8(a) 可以看出, 当系统照明波长 λ 和数值孔径 NA 一定时, 深沟槽样品下表面的耦合距离 D_s 与台阶高度 h 成正比关系。而从图 8(b) 可知, 当台阶

高度 h 足够小时, D_s 随着 NA 的增大而单调减小, 这个趋势与 2.1 节关于薄样品的分析结果一致; 随着 h 的增大, 当 NA 较大时, 图中曲线出现拐点。且当 h 处于一定范围内时, NA 的变化并不引起 D_s 的明显变化, 这说明在该情况下使用大 NA 孔径物镜可以获得更好的测量效果; 但当 h 较大时, 遮挡效应变得明显, 导致 D_s 随 NA 的增加而迅速增长。



(a) 不同 NA 下, D_s 与 h 的关系

(a) Relationships between D_s and h with given NA s



(b) 不同 h 下, D_s 与 NA 的关系

(b) Relationships between D_s and NA with given heights

图 8 深沟槽样品下表面耦合距离仿真($\lambda=0.5 \mu\text{m}$)

Fig.8 Simulation of coupling distance of the lower surface of groove samples($\lambda=0.5 \mu\text{m}$)

3 实验结果与分析

星标靶样品是一种典型的被用作光学仪器横向分辨率评价的样品, 通过截取样品不同半径处数据, 可以得到横向周期不同的沟槽结构。为了验证文中提出的光学显微三维测量解耦合准则, 对由英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory, NPL) 提供的星标靶样品 ASP-0.2 P22 进行测量, 星标靶样品最大半径为 $20 \mu\text{m}$, 台阶高度标称值为 185.1 nm , 占空比为 1:1, 测量仪器为数值孔径 $NA=0.8$, 照明波长 $\lambda=0.532 \mu\text{m}$ 的共焦显微仪器, 其测量结果如图 9 所示。

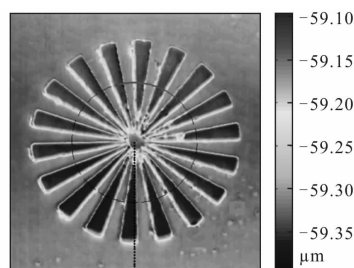
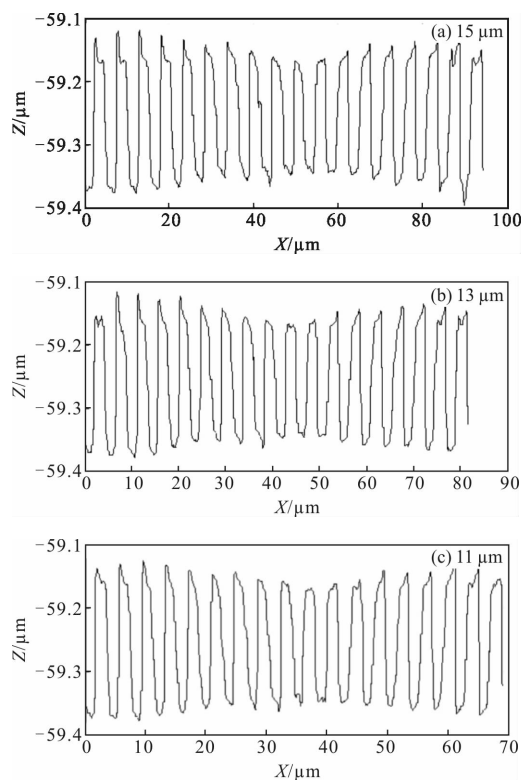


图 9 星标靶样品测量结果

Fig.9 Measured result of the star pattern sample

根据卷积不相关解耦合准则, 采用公式(11)计算得到被测星标靶样品高度信息无法准确测量的临界半径为 $9.1 \mu\text{m}$ 。根据有限能量损失解耦合准则, 采用公式(12)和公式(13)得到的临界半径分别为 $9.1 \mu\text{m}$ 和 $10.7 \mu\text{m}$ 。这两种准则的计算结果略有差异, 这是因为有限能量损失解耦合准则考虑条件更为严格, 两种准则都可以用来判定薄样品测量数据失真范围。截取星标靶样品不同半径处圆周上数据, 得到周期不同的沟槽结构如图 10 所示。

由图 10 可看出, 当截取半径大于 $11 \mu\text{m}$ 时, 沟槽样品的顶部和底部可以被较好的分辨, 可以看出矩形的沟槽结构; 而当截取半径为 $9 \mu\text{m}$ 及以下时, 沟槽样品形貌已较大失真, 变成近似正弦状。



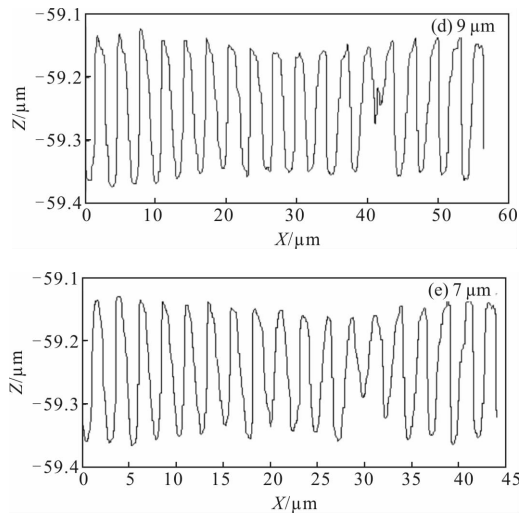


图 10 不同半径处的测量结果, (a)~(e) 半径分别为 $15\ \mu\text{m}$, $13\ \mu\text{m}$, $11\ \mu\text{m}$, $9\ \mu\text{m}$, $7\ \mu\text{m}$

Fig.10 Measurement results of different radii, the radii for (a)~(e) are $15\ \mu\text{m}$, $13\ \mu\text{m}$, $11\ \mu\text{m}$, $9\ \mu\text{m}$, and $7\ \mu\text{m}$, respectively

另一方面, 根据计算结果可知, 当半径取值大于 $11\ \mu\text{m}$ 时, 周期性沟槽样品顶部和底部均包含非耦合区域, 可以得到完整的周期性结构。当半径取值为 $9\ \mu\text{m}$ 时, 沟槽顶部和底部均为耦合区域, 测量数据失真, 不能得到完整的周期性结构。实验结果与计算结果吻合较好, 故实验证明了文中提出的光学显微三维测量解耦合准则能够预见边缘扰动区域, 指示有效的高度测量区域。

4 结论

文中首先根据被测样品高度与光学显微系统的点扩散函数轴向尺寸间的大小关系, 将样品分为薄样品和厚样品, 然后采用卷积不相关原则和有限能量损失原则分别对两种情况建立了解耦合模型, 揭示了被测样品几何特征参数与光学仪器测量能力间的关联关系。实验结果表明, 文中的解耦合准则有效预见边缘扰动范围。与现有 $W/3$ 准则相比, 文中给出的解耦合准则客观反映了光学仪器测量能力受样品结构的影响, 预见高度测量中原理误差的产生, 并能够指示高度读取过程中有效的数据评定范围, 为沟槽或台阶样品三维结构表征提供了一种新的计量评定准则。

参考文献:

- [1] Peng B, Giancarlo P, Wolfgang O. Optical surface profile measurement using phase retrieval by tuning the illumination wavelength [J]. *Optics Communications*, 2012, 285 (285): 5029-5036.
- [2] Zhang Mingkai, Gao Sitian, Lu Rongsheng, et al. Ultraviolet scanning linewidth measuring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 625-631. (in Chinese)
- [3] Liu J, Wang Y, Liu C, et al. Digital differential confocal microscopy based on spatial shift transformation [J]. *J Microsc*, 2014, 256: 126-132.
- [4] Gao Meijing, Fan Xiangrui, Gu Haihua, et al. Optical microscanning microscope thermal imaging system for electronic devices nondestructive testing [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(7): 779-784. (in Chinese)
- [5] Martin R, Thorsten D, Axel K, et al. A landmark-based 3D calibration strategy for SPM [J]. *Meas Sci Technol*, 2007, 18: 404-414.
- [6] 2000 Geometrical product specifications (GPS) -Surface texture: Profile method; Measurement standards -Part 1: Material measures[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2000.
- [7] Lin Dejiao, Liu Zhongyao, Zhang Rui, et al. Step-height measurement by means of a dual-frequency interferometric confocal microscope [J]. *Optical Society of America*, 2004, 4: 0003-6935.
- [8] Liu Jian, Li Mengzhou, Li Qiang, et al. Decoupling criterion based on limited energy loss condition for groove measurement using optical scanning microscopes [J]. *Meas Sci Technol*, 2016, 27(12): 125014.
- [9] Nouira H, Salgado J A, El-Hayek N, et al. Setup of a high-precision profilometer and comparison of tactile and optical measurements of standards [J]. *Meas Sci Technol*, 2014, 25: 044016.
- [10] Yan Lisong, Wang Xiaokun, Zheng Ligong, et al. Large-diameter mirror stitching accuracy analysis based on self-test [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (6): 1920-1924. (in Chinese)
- [11] Sheppard C J R, Heaton J M. Confocal images of straight edges and surface steps [J]. *Optik*, 1984, 68: 371-80.
- [12] Tan Jiubin, Liu Chenguang, Liu Jian, et al. Sinc2 fitting for height extraction in confocal scanning[J]. *Meas Sci Technol*, 2016, 27: 025006.