

微结构表面形貌的测量

周明宝 林大键

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室 成都 610209)

郭履容 郭永康

(四川联合大学物理系 成都 610041)

摘要 总结了现有各种微结构表面形貌测量方法,概述了这些方法的原理、特性及发展现状,并对各种方法的优越性、存在问题以及应用范围进行了比较。

关键词 微结构 表面形貌 测量

1 引言

微结构是随着微细加工技术的出现才出现的,是随着微细加工技术的发展逐步丰富和精细的。例如在微电路制作过程中反复出现的掩模结构表面,通过多次套刻与刻蚀方法制作的二元光学元件表面以及通过微机械加工技术制作的微机械结构表面,都是微结构表面。

微结构由于是由微观结构单元组成的三维复杂结构,其测量一般都需要借助直接的或间接的显微放大,要求有较高的横向分辨率和纵向分辨率。与平滑表面的测量不同,微结构表面的测量不仅要测量表面的粗糙度或瑕疵,还要测量表面的轮廓、形状偏差和位置偏差。因此微结构表面的测量相对而言是比较困难的。

随着微细加工技术的不断进步,微电路、微光学元件、微机械以及其它各种微结构不断出现,对微结构表面形貌测量系统的需求越发迫切,为此,本文在研究衍射光学元件表面形貌测量方法的基础上,对各种微结构表面形貌测量技术进行了系统的分析研究,并将这些技术按照工作原理的不同分成五类。下面分别进行介绍,并作简单的比较。

2 机械探针式测量方法

机械探针式测量方法^[1-3]是开发较早、研究最充分的一种表面轮廓测量方法。它利用机械探针接触被测表面,当探针沿被测表面移动时,被测表面的微观凹凸不平使探针上下移动,其移动量由与探针组合在一起的位移传感器测量,所测数据经适当的处理就得到了被测表面的轮廓。

探针式轮廓仪是高精度的表面轮廓测量仪器,深度测量精度可达到 0.1~0.2nm;纵向分辨率取决于与之配套的位移传感器,一般可达到 0.1nm 的量级;横向分辨率与针尖半径有关,同时还与被测表面的具体形状有关,一般可达到 0.05 μm ~0.25 μm 。

探针式轮廓仪可测量各种形状和各种光学机械性质的表面,并且由于被测表面的移动是借助载物台的平动实现的,因此它的测量范围较大。探针式轮廓测量是一种接触式测量,探针要在一定的压力下接触被测表面,并且为了获得较好的测量精度和较高的横向分辨率,探针半径一般都很小,这样被测表面单位面积上承受的接触压力很大(如果测量力为 1N,探针半径为 0.1 μm ,接触压强将达到 $5 \times 10^{12}\text{Pa}$)。如果被测表面较为松软,探针往往会划伤被测表面,因此,探针法一般不宜用于测量铜、铝等软金属表面或涂有光刻胶等薄膜的表面。

3 光学探针式测量方法

光学探针式测量方法^[4-5]原理上类似于机械探针式测量方法,只不过探针是聚集光束。根据采用的光学原理不同,光学探针可分为几何光学原理型和物理光学原理型两种。几何光学探针利用像面共轭特性来检测表面形貌,有共焦显微镜和离焦检测两种方法;物理光学探针利用干涉原理通过测量程差来检测表面形貌,有外差干涉和微分干涉两种方法。

基于共焦显微镜原理的光学探针轮廓仪^[6]由共轭成像系统组成。测量时物点跟踪被测表面,并被成像在点探测器上。当被测表面与探测面共轭时,在点探测器上的像点最小,点探测器接收到的能量最大;当被测表面偏离物点时,探测器上的像点变大,点探测器接收到的能量变小。测量时控制物点与被测面重合,保证探测有最大输出,便可描画出被测表面的形貌。

利用离焦误差检测原理测量表面形貌有多种方法,如临界角法^[7]、像散法^[8]、偏心光束法^[9]、傅科刀口法^[10]。这些方法通过测量显微物镜与被测表面的离焦量反映被测表面的形貌。离焦误差检测方法具有光路简单、使用方便的优越性。纵向分辨率可达 1nm。不足之处是测量对被测表面反射率和局部斜率较为敏感,线性范围窄。

外差干涉光学探针^[11]利用双光束外差干涉原理来测量被测表面的形貌。两支相干光的一束作为测量光束经显微物镜聚集在被测表面上,另一束则作为参考光束保持光程不变。通过某种方法使两支相干光的频率产生差异,从而使两束相干光的相差受时间调制。当光电探测器检测随时间变化的干涉条纹时,探测器输出电信号中的低频成分的位相就反映了干涉条纹的位相差。利用位相计测出低频信号的位相,就可高精度地测出干涉条纹的位相差,从而得到有关表面形貌的信息。

微分干涉光学探针^[12]将光束分成两束相干光束并在被测表面上聚焦成两个相距很近的

光斑, 被测表面在这两个光斑之间的高度差决定了两束相干光的位相差, 利用各种方法测出位相差, 就可能获得表面形貌的信息。由于微分干涉探针采用共光路光学系统, 因此具有良好的抗干扰特性, 且不需要标准参考平面。但是由于微分干涉法实际测量的是表面斜率, 表面形貌是通过斜率积分获得的, 因而这种方法会累积误差。

4 干涉显微测量方法

干涉显微测量方法^[13]利用光波干涉原理测量表面轮廓。与探针式测量方法不同的是, 它不是单个聚焦光斑式的扫描测量, 而是多采样点同时测量。

这里所说的干涉显微测量方法不是传统意义上的干涉显微测量方法, 它不是采用传统的依据条纹形状和间距的干涉条纹判读法来测量表面形貌, 而是采用诸如外差干涉、锁相干涉以及相移干涉这些实时位相自动测量技术来快速精密地测量表面形貌。它一次测出的是一个面上的表面形貌, 而不像传统干涉显微镜那样, 一次测出的实际上只是一个横切面上的表面形貌。

干涉显微测量方法根据干涉光路的结构可分为双光路和共光路两种类型。双光路型干涉显微轮廓仪根据分光方式的不同还可分为 Michelson、Mirau 和 Linnik 三种类型。图 1 是这三种分光方式的示意图。

Mirau 干涉显微轮廓仪^[14]的原理如图 1(b) 所示。来自光学系统前端光路的光束经显微物镜后透过参考板, 然后由分光板上的半反半透膜分成两束, 一束透过分光板投射到被测面上, 反射后经分光板和参考板回到显微镜。另一束被分光板

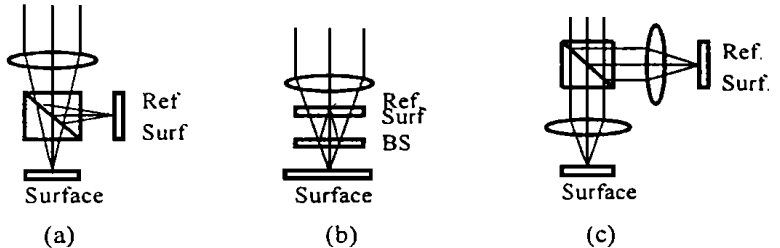


Fig. 1 Three means of interferometric microscopic topography methods

反射到参考板上表面中心区域, 反射后回到分光板并再次被反射, 然后透过参考板回到显微镜。两束光在显微物镜视场中会合并发生干涉。

Mirau 干涉显微轮廓仪的特点是只使用一个显微物镜, 因而在测量时物镜不会给两束相干光引入附加的光程差。此外, 由于参考光路和测量光路近似共路, 因此可排除很多干扰的影响。但由于在物镜和被测表面之间需放置参考板和分光板, 因此 Mirau 干涉显微轮廓仪只能使用工作距离较长的显微物镜, 致使显微物镜的数值孔径受到限制, 横向测量分辨率较低。在 Mirau 干涉显微轮廓仪中, 显微物镜的放大率一般为 10x, 20x 或 40x。

图 1(a) 是 Michelson 干涉显微轮廓仪的原理示意图。来自光学系统前端光路的光束经显微物镜后被分束镜分成两束, 一束被参考面反射, 另一束被被测面反射, 两束光再次经过分束镜后会合并发生干涉。从干涉分光方式和光路结构看, Michelson 干涉显微光路类似于传统的 Michelson 干涉仪, 不同的是传统的 Michelson 干涉仪(包括传统的 Fezeau、Twyman Green、Maclachlan 干涉仪在内)是一种宏观测量, 它们测量的是表面形状或表面形状误差, 而

Michelson 干涉显微轮廓仪是一种显微放大测量,它测量的是微观区域内表面的微观结构形貌。

同 Mirau 干涉显微轮廓仪一样, Michelson 干涉显微轮廓仪也只使用了一个显微物镜,在物镜和被测表面之间也放置了分光器件,不同的是 Michelson 干涉显微轮廓仪的物镜工作距离更长,数值孔径更小,因而 Michelson 干涉显微镜的抗干扰能力、横向分辨率都要差于 Mirau 干涉显微轮廓仪。 Michelson 干涉显微物镜的放大率一般只有 1.5x, 2.5x 和 5x。

Linnik 干涉显微轮廓仪干涉显微光路如图 1(c) 所示。由光学系统前端光路出射的平行光经过分束棱镜后分成两路,一路经过显微物镜聚集在参考面上并被反射回显微物镜还原成平行光,另一路经过另一个显微物镜聚集在被测表面上,反射后经过显微物镜还原成平行光,两束光经过分束棱镜后重新会合并发生干涉。

在 Linnik 干涉显微光路中,采用了两个完全相同的显微物镜,参考光路与测量光路要求一致,由于在物镜和被测表面之间没有其它光学元件,因而 Linnik 干涉显微轮廓仪可使用工作距离较短的显微物镜,其数值孔径可高达 0.95。 Linnik 干涉显微物镜的放大率一般高达 100 倍,甚至 200 倍。

微分干涉相衬(DIC)显微镜是一种共光路干涉显微镜^[15],是近年来被广泛使用的高灵敏度表面轮廓检测仪。其关键是在显微偏振光路中加入了一块 Wollaston 分光棱镜。Wollaston 棱镜将入射线偏振光分成两束夹角微小偏振方向垂直的线偏振光,显微物镜将此两束平行光聚焦成两个稍稍分开的光斑投射到被测表面上,经被测表面反射后,经过物镜由 Wollaston 重新复合,最后经过检偏器产生干涉。由于两束光横向剪切量小于显微镜分辨率,因此视场中只有一个像。

DIC 显微技术实质上是一种显微镜分辨极限以下的波面剪切干涉技术,两个微微分开的光斑把表面微观起伏的高度变化以光强和干涉色的形式表现出来,具有强烈的立体感。若用白光照明,还具有鲜明的彩色感,表面微观细节能被清晰地表现出来,分辨率高达 0.4nm。

DIC 显微镜本质上也是一种双光路干涉显微镜,与 Michelson, Mirau, Linnik 干涉显微镜不同的是,它的两支相干光几乎重叠在一起,因此对外界干扰不敏感并使用方便。但由于微分干涉仪与多个因素有关以及 Nomarski 棱镜对入射光束的分束与入射光入射方向及入射角有关,因此很难从二维干涉光强测量数据中处理出二维面上的表面形貌的信息,因此无法进行定量分析和定量测量^[16]。一般只用来定性观察被测表面的形貌。

5 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜(SEM)^[17]利用聚焦得非常细的电子束作为电子探针。当探针扫描被测表面时,二次电子从被测表面激发出来,二次电子的强度与被测表面形貌有关,因此利用探测器测出二次电子的强度,便可处理出被测表面的几何形貌。

SEM 具有较高的纵向分辨率和横向分辨率,可分别达到 10nm 和 2nm,但是由于 SEM 的有深度效果的图像是用立体观察技术和立体分析技术间接获得的,因此 SEM 主要用来定性观察被测表面的形貌。此外,SEM 要求在真空环境下工作,要求被测表面导电,操作复杂,测量费时,这进一步限制了它的应用范围。

6 扫描探针显微镜

扫描探针显微镜(SPM)^[18]是通过探测样品与探针之间存在的各种相互作用所表现出的各种不同特性来实现测量的。依据这些特性,目前已开发出各种各样的扫描探针显微镜SPM。就测量表面形貌而言,扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)最为人们熟悉和掌握。

STM的基本原理^[19]是基于量子隧道效应,当金属探针与被测表面非常接近(几个埃)时,在探针与表面的间隙中出现隧道电流。电流强度与间隙大小有关。当探针沿被测表面移动时,驱动和控制探针上下移动使隧道电流保持不变,保证间隙锁定,那么探针上下移动量便反映了被测表面的轮廓。

STM在纵向和横向都具有极高的分辨率,其纵向分辨率达0.001nm,横向分辨率达1nm。STM极高的纵向和横向分辨率,使其成为极具吸引力的微结构表面测量仪器。然而STM的纵向和横向测量范围都很小,横向测量长度一般在几微米或几十微米量级,因此STM的使用局限于超微细、超光滑表面的测量。此外,STM的结构和控制复杂,涉及的技术难度大,如针尖的制作、针尖表面间隙的控制以及动件的精密控制等等都是一些棘手的难题。

AFM的基本原理^[20]是基于探针与样品之间的原子相互作用力,探针置于悬臂梁上,利用光学杠杆法测出悬臂梁在原子力作用下的变形,便可测出被测表面的形貌。AFM有两种型式,一种是接触式测量,但其接触力极小,典型地为 10^{-7} 到 10^{-11} N,主要由两部分组成,一部分是由各种原因(如样品表面的张力、样品表面上的电荷等)引起的样品和探针之间的吸引力,另一部分是在吸引力作用下探针沿样品表面扫描时出现的摩擦力。接触式AFM的接触力尽管很小,但在有些应用中仍是不允许的,因此又出现了一种非接触式AFM。非接触式AFM的工作原理是基于这样一种现象,即当样品表面与探针处于似接触没接触状态时,探针的振动幅度变小并同样品表面与探针之间的平均距离成正比。AFM具有极高的纵向分辨率,可达0.01nm,但横向测量长度很小,仅达到10 μ m,因此AFM常被用来测量线条的宽度,较少用于测量表面形貌。

7 各种测量方法的比较

探针式轮廓仪测量范围大,测量精度高,但它是一种点扫描测量,测量费时。机械探针是接触式测量,易损伤被测表面;光学探针是非接触测量,但需要一套高精度的调焦系统。

干涉显微测量方法能同时测量一个面上的表面形貌,横向分辨率取决于显微镜数值孔径,一般在 μ m或亚 μ m量级;横向测量范围取决于显微镜视场,大小在mm量级;纵向分辨率取决于干涉测量方法,一般可达nm或0.1nm量级;纵向测量范围在波长量级。因此干涉显微测量方法比较适宜于测量结构单元尺寸在 μ m量级,表面尺寸在mm或亚mm量级的微结构。

扫描探针显微测量方法虽是扫描测量,但最终给出的是整个被测区域上的表面形貌。尽管SPM测量精度高,纵向及横向分辨率达原子量级,但测量范围,无论是横向还是纵向,都很狭窄,而且涉及的技术难题多,操作复杂,操作环境要求高,因此SPM常适合于测量结构单元

在 nm 量级、测量区域为 μm 量级的微结构。

SEM 既可以用于 μm 量级结构的测量,也可用于 nm 量级结构的测量,但它比较适合于定性测量。

参 考 文 献

- 1 Bennett J M, Dancy J H. Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces. *Appl Opt*, 1981, 20(10): 17851802
- 2 Song J F, Vorburger T V. Stylus profiling at high resolution and low force. *Appl Opt*, 1991, 30: 4250
- 3 Stedman M, Lindsey K. Limits of surface measurement by stylus instruments. *Proc SPIE*, 1988, 1009: 5661
- 4 Whitefield R J. Noncontact optical profilometer. *Appl Opt*, 1975, 14(10): 24802485
- 5 Stedman M. Limits of surface measurement by optical probes. *Proc SPIE*, 1988, 1009: 6267
- 6 Tiziani H J, et al. Scanning confocal microscopy and surface characterization. Institut fur Technische Optik, Universitat Stuttgart
- 7 Kohno T, Ozawat N, Miyamoto K, Musha T. Practical non contact surface measuring instrument with one nanometer resolution. *Proc Eng*, 1985, 7(4): 5457
- 8 Mitsui K, Sakai M, Kizka Y. Development of a high resolution sensor for surface roughness. *Opt Eng*, 1988, 27(6): 498502
- 9 Mitsui K. In Process sensors for surface roughness and their applications. *Proc Eng*, 1986, 8(4): 2431
- 10 Whitehouse D J. Instrumentation for measuring finish, defects and gloss. *Proc SPIE*, 1985, 525: 106123
- 11 Huang C C. Optical heterodyne profilometer. *Opt Eng*, 1984, 23: 365370
- 12 Makosch G, Drollinger B. Surface profile measurement with a scanning differential ac interferometer. *Appl Opt*, 1984, 23(24): 45444553
- 13 Wyant J C, Creath K. Recent advances in interferometric optical testing. *Laser Focus*, 1985, 21: 118132
- 14 Koliopoulos C L. Interferometric optical phase measurement techniques. thesis, U Arizona, AR 1981
- 15 Lessor D L, et al. Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. I. Theory. *J Opt Soc Am*, 1979, 69(2): 357366
- 16 Bennett J M. Measurement and interpretation of fine form errors in optical surfaces. *Proc SPIE*, 1983, 381: 190208
- 17 Matsuno Y, Yamada H, Harada M, Kobayashi A. The microtopography of the grinding wheel surface with SEM. *Ann CIRP*, 1975, 24(1): 1723
- 18 See the notes of Digital Instruments, Inc. Scanning probe microscopy: technology and recent innovations and Tappingmode AFM: applications to semiconductors.
- 19 Binning G B, Rohrer H. *Phys Lett*, 1982: 49(1): 5761
- 20 Rabe U, Arnold W. Atomic force microscopy at MHz frequencies. *Annalen Der Physik* 3, 1994. 589

Measurement of Microstructures Topography

ZHOU Ming Bao, LIN Da Jian

(*State Lab of Optical Technologies on Micr fabrication, Institute of Optics & Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

GUO Li Rong, GU O Yong Kang

(*Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610041*)

Abstract

The existing various methods used to measure the surface topography of micro structures are described. The principle, property and present situation of these methods are analyzed. Comparison for superiority, the existing problems and the applied range of these methods are given.

Key words: Microstructures, Surface topography, Measurement

周明宝 男, 1965年12月生, 1986年毕业于浙江大学, 现为中国科学院光电技术研究所博士研究生, 副研究员。目前主要从事微机械、微光学、微电子光学的技术研究。