

原子力显微镜测试光学 超光滑表面微轮廓的研究*

李剑白¹⁾ 李达成²⁾ 李小芸¹⁾ 殷爱菡¹⁾ 赵安庆¹⁾

1), 江西省科学院应用物理研究所, 南昌 330029

2), 清华大学精密仪器及机械学系, 北京 100084

摘 要 论述了使用原子力显微镜测量超光滑光学表面的优点及其在光学领域中的重要应用, 列举了用这种方法测试得到的超光滑光学表面微轮廓图及纳米量级的微缺陷, 以及这些表面镀膜前后表面形态结构和微粗糙度的变化。作为比较, 列举了用干涉轮廓仪测得相同表面的微粗糙度参数等。由于原子力显微镜有三维的高精度, 而干涉方法只有一维的高精度, 所以前者可以得出表面真实形貌和微轮廓。

关键词 微轮廓, 超光滑光学表面, 原子力显微镜, 光学测试。

1 引 言

光学表面的微轮廓和粗糙度对光学元件和系统的透过率、杂光及成像质量都有重要的影响, 特别是高强度高能量激光系统、软 X 射线光学系统、高密度大容量光存储元件及超大规模积层元件基底等表面, 要求有纳米或亚纳米超光滑光学表面。如软 X 射线光学系统中多层膜反射镜的基底, 其表面微轮廓和粗糙度应在 $0.1 \sim 1.0 \text{ nm RMS}^{[1]}$ 。目前, 光学超光滑表面微轮廓和粗糙度的抛光加工和检测技术已成为现代光学和微电子学领域内又一重要的热门课题^[2-5]。

比较各种超光滑光学表面检测技术, 可以看出, 原子力显微镜方法具有众多的优点: 该方法在垂直于表面微轮廓方向和沿表面方向(通常简称垂直向和横向, 下同)有几乎相同的测量分辨率和精度, 因此, 可以测出超光滑表面纳米或亚纳米级真实的实际微轮廓及相同量级的表面微缺陷。在此基础上, 可计算得出超光滑表面的粗糙度和功率谱密度^[6]等各种表面参数。各种传统的干涉方法, 包括近代双焦共路干涉轮廓仪等, 由于干涉法本身固有的特性, 则只有一维情况可以达到高分辨率和高精度。在二维和三维测量中, 其他各维只有相对的低分辨率和低精度。在超光滑光学表面测量中, 其横向分辨率比垂直向要低三个数量级左右^[2, 7]。因此, 用干涉方法测量光学表面只能计算出统计的平均表面微轮廓和微粗糙度, 而不能测出表面真实的实际轮廓, 而且得到的只是微米量级的表面微缺陷, 而不能测出纳米量级

* 国家自然科学基金 (69768001) 和江西省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1999-03-29; 收到修改稿日期: 1999-06-21

的表面微缺陷。

下面将介绍使用原子力显微镜方法测试光学超光滑表面的原理及一些测试结果分析,并与干涉方法测量结果作一比较。

2 激光光杠杆式原子力显微镜测量原理

激光光杠杆式原子力显微镜仪器的测量原理如图 1 所示。被测样品 5 置于外壁四等分的

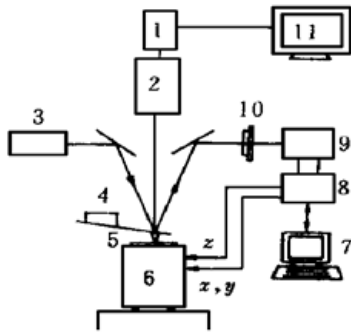


Fig. 1 Scheme of AFM. 1: CCD camera, 2: objective, 3: laser, 4: cantilever, 5: sample, 6: PZT, 7: computer, 8: A/D, D/A, 9: circuit, 10: PSD, 11: computer

管状压电陶瓷(PZT)工作台 6 上,对管状压电陶瓷施加不同的电压,可实现样品工作台 x 、 y 方向微动扫描,以及垂直样品的 z 向反馈伸缩微动。几个方向的微动扫描的分辨率都在 0.01 nm 量级。

原子力显微镜的作用原理是:利用对微小力极敏感的微悬臂 4 的自由端上具有纳米线宽的微小针尖,当其与样品距离小到原子力作用范围时,微悬臂 4 受到微力(约 10^{-9} 牛顿量级)作用而有微小的变形。激光器 3 发出一束精细的激光束聚焦在微悬臂 4 的背面并反射,反射光束落到四像限位移传感器(PSD) 10 上。由于微悬臂受力变形使激光束在位移传感器上位移,产生差动电流,经放大和数字化处理输入计算机。当样品在 x 、 y 方向微动时,样品表面微轮廓起伏产生不同的差动电

流,经计算机反馈控制工作台 z 向微动,以保持悬臂针尖与样品间的恒力和恒距。这样就组成激光光杠杆反馈微动系统。计算机描绘出 z 向变化的电信号即是样品表面的微轮廓图。微悬臂针尖与样品表面之间可有多种工作状态,以达到不同的测试目的。激光光杠杆的放大比通常调整到 200~1000 之间^[8],这样,表面测试的分辨率可达到 1.0~0.01 nm 量级以上。

3 测试结果和分析

本文测试所采用的仪器为 Nanoscope III A 型多模扫描探针显微镜,垂直向分辨率为 0.01 nm,横向分辨率为 0.1 nm。测试在常温大气中进行,成像模式为接触式,图像采集为“高度”(Height)方式。采用 DI 公司配套的 NP 标准型探针,悬臂长为 200 μm ,力常数为 0.12 Nm^{-1} 。

文献 [9, 10] 列举了采用该仪器定量测试已知结构常数的晶面所获得的良好结果,这些表明,该仪器用于纳米和亚纳米超光滑光学表面形貌测试,其分辨率和精度完全符合要求。

3.1 表面微轮廓三维立体图

采用一块软 X 射线系统中多层膜反射镜基底抛光面作为样品,用原子力显微镜测试,图 2 为测得的该超光滑表面三维立体图。由图可见,在沿表面 x 、 y 方向测量范围为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。在

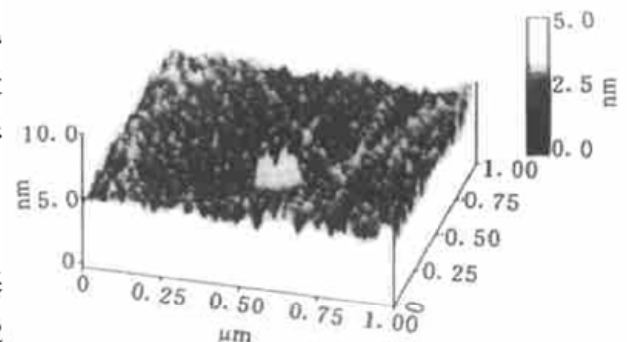


Fig. 2 3D-profile of optical supersmooth surface

垂直表面的 z 向是用灰度表示高度。灰度高度换算标尺在图右上方, 灰度越小表明微轮廓 z 向起伏峰值越高, 由此构成超光滑表面三维微轮廓图。最有意思的是图中 x 方向 $0.5 \mu\text{m}$ 处有一较大的白色小峰, 表明该处有一较大的突起疵点: 高度约为 5 nm , 底部尺度约为 100 nm 。

3. 2 超光滑表面剖面真实轮廓图

仍采用软 X 射线多层膜反射镜基底做样品, 两块样品分别为超光滑抛光面和镀膜表面。图 3 和图 4 是用原子力显微镜测得的两个面的微轮廓图, 其中图 3 (a) 和图 4 (a) 分别为抛光面和镀膜面的灰度图, 即二维表面起伏高度图。图 3 (b) 和图 4 (b) 分别为图 3 (a) 和图 4 (a) 中某一黑线方向 (图中近似水平方向) 的表面实际轮廓图。

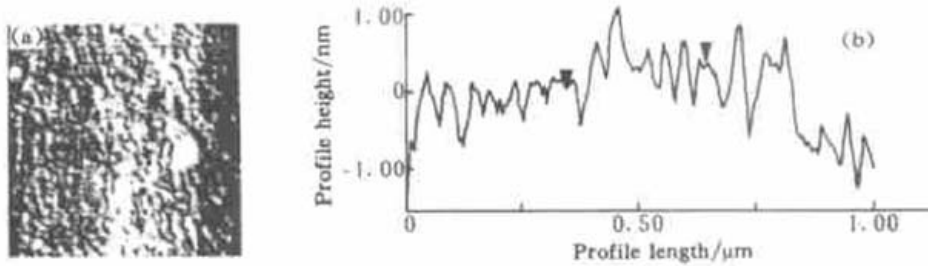


Fig. 3 Testing result for supersmooth polished surface using AFM

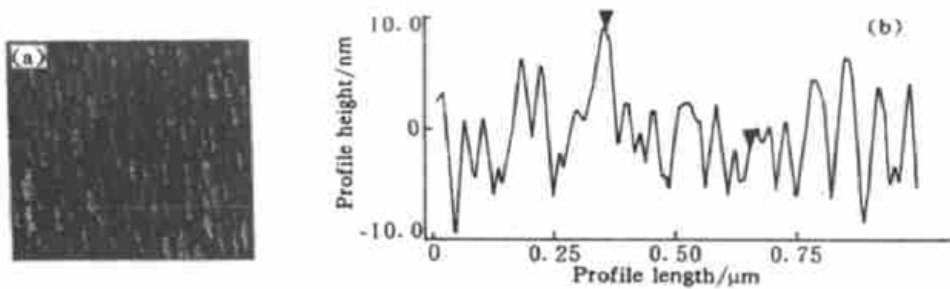


Fig. 4 Testing result for supersmooth coated surface using AFM

表 1 列出了图 3 (b) 和图 4 (b) 中两个黑箭头之间约 300 nm 内表面微轮廓各种参数的计算值。各参数的定义详见文献 [11]。由表 1 可以看出, 由于技术工艺问题, 被测的镀膜面样品与抛光面样品相比, 其表面微轮廓的各种参数都偏大。

Table 1. Parameter value for surface microprofile

surface character	arithmetical mean deviation of the profile (R_a) /nm	root-mean-square deviation of the profile (R_q) /nm	maximum height peak of profile (R_p) /nm	ten point height of irregularities (R_z) /nm
polished surface	0. 239	0. 319	1. 540	0. 861
coated surface	2. 319	3. 265	11. 525	7. 286

3. 3 与干涉法测试结果比较

图 5、图 6 是用共路干涉轮廓仪对上述相同的两个样品测试结果。所用的测试仪器是 Wyko RST Plus 型干涉轮廓仪, 其垂直向分辨率为 0.1 nm , 横向分辨率为 800 nm 。图中 x -profile 和 y -profile 分别为被测样品沿表面两个方向的轮廓剖面图。将图 3 与图 5、图 4 与

图 6 比较可以看出, 图 3 (b) 与图 4 (b) 中轮廓剖面图的横座标为 $1 \mu\text{m}$, 而图 5、图 6 中 x -profile 和 y -profile 的横座标分别为 $600 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 。显然, 图 5、图 6 中 x -profile 和 y -profile 并不是实际的微轮廓图。图 3 (b) 和图 4 (b) 才是现有各种测量方法能得到的最接近上述两表面的实际微轮廓图。从图 5 和图 6 数据中只能计算出统计学意义上的一些表面微轮廓参数。

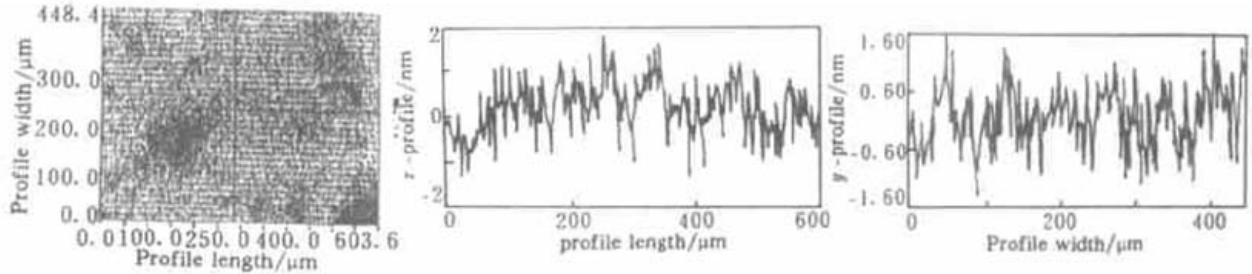


Fig. 5 Testing result for corresponding surface with fig. 3 using interference method

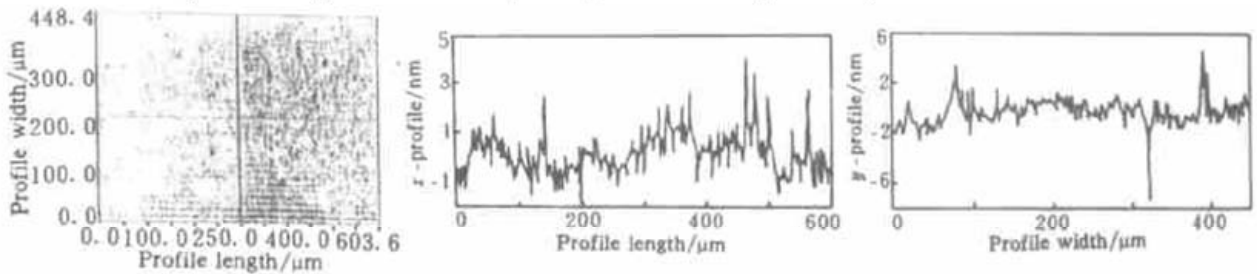


Fig. 6 Testing result for corresponding surface with fig. 4 using interference method

结 论 测试超光滑光学表面的微轮廓和粗糙度参数等, 目前主要是干涉法和各种扫描探针显微镜法, 其中用于非导体表面测试主要是原子力显微镜方法。本文测试和比较了原子力显微镜法和干涉法, 认为, 原子力显微镜法可探测纳米级表面缺陷, 测量到表面实际微轮廓, 而各种干涉法却只能发现微米级的表面缺陷, 而且不能测得超光滑光学表面的实际微轮廓。因此, 在超光滑光学表面测试中应该进一步推广应用原子力显微镜方法, 并在此基础上, 尽快制订出超光滑光学表面的表面参数国家标准。

感谢应用光学国家重点实验室及中国科学院纳米科学和技术青年实验室的支持。

参 考 文 献

- [1] 张俊平, 曹健林, 马月英等. 软 X 光激光用多层膜反射系统的设计与性能模拟计算. 光学学报, 1995, **15** (8) : 1088~ 1093
- [2] Wangner P, Gerber H A, Gr f D *et al.*. Morphology of silicon wafersurface: A comparative study with atomic force microscope and other techniques. *Proc. SPIE*, 1996, **2862** : 18~ 27
- [3] 徐德衍, 林尊棋. 光学表面粗糙度研究的进展与方向. 光学仪器, 1996, **18** (1) : 32~ 37
徐德衍, 林尊棋. 光学表面粗糙度研究的进展与方向 (续). 光学仪器, 1996, **18** (2) : 35~ 41
- [4] 尤 政, 梁晋文. 纳米计量技术. 计量技术, 1995, (11) : 2~ 4
- [5] 高宏刚, 曹健林, 陈星旦. 浮法抛光亚纳米级光滑表面. 光学学报, 1996, **15** (6) : 824~ 825
- [6] Dumas P, Bouffakhreddine B, Amra C *et al.*. Quantitative microroughness analysis down to the nanometer scale. *Europhys. Lett.*, 1993, **22** (9) : 717~ 722
- [7] Rasigni G, Varner F, Rasigni M *et al.*. Autocovariance functions for polished optical surfaces. *J.*

Opt. Soc. Am., 1983, **73** (2) : 222~ 233

- [8] Li Jianbai, Li Xiaoyun, Wang Ming *et al.*. Inspecting on the defect of optical surface using atomic force microscope. *J. Optoelectronics Laser*, 1998, **9** (supp) : 272~ 274
- [9] Deng Wenli, Yang Daben, Ye Fang *et al.*. Characterization of self-assembled monolayers of thiols on Au (111). *Science in China (Series B)*, 1996, **39** (3) : 225~ 234
- [10] 田 芳, 王 琛, 白春礼等. 有机 HTDIOO 分子 LB 膜结构的 AFM 研究. *物理化学学报*, 1998, **14** (4) : 293~ 298
- [11] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准, GB3505-83, 北京: 中国标准出版社, 1984. 1~ 17

Study on Testing Method for Microprofile of Optical Supersmooth Surface

Li Jianbai¹⁾ Li Dachen²⁾ Li Xiaoyun¹⁾
Ying Aihan¹⁾ Zhao Anqing¹⁾

[1), *Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029*
2), *Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084*]
(Received 29 March 1999; revised 21 June 1999)

Abstract Some advantages and important application of the testing method for optical supersmooth surface using atomic force microscope (AFM) are discussed. Some testing results of microprofile and micro-defect with nonometer-grade for optical supersmooth surface using AFM method are presented, and the change of morphology and micro-roughness before and after coating of same surface is given. For comparison, testing results of micro-roughness parameters for same surface measured using interference profiler are presented too. It is indicated that AFM method has three-dimensional high-accuracy, but interference method has only one-dimensional, so the former can give true morphology and microprofile of surface.

Key words microprofile, optical supersmooth surface, atomic force microscope (AFM), optical testing.