

软X射线散射法检测超光滑表面粗糙度

龚再仲 马文军

摘要: 本文概略介绍了软 X 射线散射法检测超光滑表面粗糙度的散射理论、测试方法及测试系统。

一、序 言

由于掠射式软X射线成像望远镜的发展, X射线显微镜的研制, 同步辐射源的建立和应用, 大功率激光器及X射线激光器的研究, 发展了一种超光滑表面的新技术, 要求表面光洁度越来越高, 超光滑表面的超精工艺是必须解决的重要问题, 工艺水平的提高又有赖于检测技术的提高。因此检测方法和设备的建立对软X射线学科和有关高技术的发展有极为重要的意义。

高分辨软X射线散射测量是通过测量表面散射光的分布获得表面形貌参量及X射线光学参量的一种方法。在X射线波段, 由于光学材料的折射率小于1, 聚焦光学元件通常都做成反射式, 这时表面光洁度成为决定元件光学性能的重要参量。用散射方法测量表面光洁度参量是一种直接测量法, 它既能给出表面参量, 又能给出表面的光学参量。

一般反射光是由强的镜向反射光和较弱的大角度分布的散射光组成。散射光的强度与分布是由表面形貌参量所决定, 它包含着表面形貌的全部信息。由低分辨散射测量可以获得表面的粗糙度、均方根斜率、平均表面波长、反射率等参量; 由高分辨散射测量, 除了能获得上述参量外, 还能获得表面的功率谱密度、自相关函数等函数信息。高分辨散射测量要求测试系统有足够高的分辨率来记录散射谱的细节, 西德为了研究 ROSAT 望远镜, 建立了双镜散射测量装置, 其分辨率高达 2.6 角秒^[1], 但是必须在相同工艺下做成一对样品, 同时测量, 这就限制了这一方法的应用。丹麦 F. E. Christensen 等利用三轴 X 射线衍射仪测量了西德在研制望远镜过程中的超光滑表面样品, 其分辨率为散射角的函数。由于在空气中测量, 软 X 射线波段受到限制^[2]。本文概略介绍软 X 射线散射法检测超光滑表面粗糙度的方法、我们的散射测试系统和必须改进的工作。

二、软 X 射线散射理论概述

软 X 射线散射是由镜表面的粗糙引起的散射强度的空间分布, 取决于掠入射角、入射软 X 射线波长和表面的光洁度参量。描述这种散射的理论主要有两种: 一种是根据 Beckmann 理论建立起来的标量散射理论; 另一种是根据一级矢量微扰理论建立起来的矢量散射理论。

矢量散射理论是将矢量波动方程、边界条件、以及谐波分量都展开为以表面形貌函数为宗量的级数, 零级分量得出理想光滑表面的解。用迭代方法求出的一级微扰解给出角散射的分布。

矢量散射理论用功率谱密度来描述表面性质, 给出散射的角分布与功率谱密度的对应关系。功率谱密度是表面形貌函数的 Fourier 振幅, 具有不同波长的正弦光栅对不同的散射角作出贡献。

标量散射理论是从 Maxwell 方程出发, 在粗糙边界条件下解 Helmholtz 方程得出一般解, 然后对一般解进行统计处理, 并选取适当的归范化因子进行规范化, 给出随机粗糙表面的散射角分布。标量散射理论用表面自相关函数 $C(\tau)$ 来描述表面, $C(0)$ 给出表面粗糙度值, 相关长度 T 给出平均表面波长。

由于功率谱密度是自相关函数的零阶 Hankel 变换, 文章^[1]证明了在光滑极限下标量散射理论与矢量散射理论具有等价性。由于标量散射理论能够通过取适当项级数的和来描述较高水平的散射, 因此更适合于软 X 射线散射。

带宽极限是评价超光滑表面时应考虑的一个重要因素, 由于在这一范围内, 表面的光洁度已经不再是表面的本征参量, 它与测量仪器及方法密切相关, 不同的测量仪器给出的是确定的带宽范围内的光洁度, 在散射测量中, 测量的散射角范围给出了散射测量的带宽极限, 它反映的是一定波长范围内的表面粗糙成份对散射的贡献。

三、软 X 射线散射测试方法

软 X 射线散射法检测超光滑表面粗糙度的基础, 除理论上已进行充分研究外, 试验上在于建立高分辨率散射分布测量系统。国际上早期的测试系统有八十年代初西德马普协会地外所建立的 10m 真空系统所组成的散射测试系统^[4], 以后又建立了 130m 长、通光口径 $\phi 1\text{m}$ 的真空系统, 除用于检测大口径 X 射线望远镜光学性能外, 并用来建立高分辨率散射测量系统^[2], 美国 NASA 利用建立在阿拉巴马 Marshall 空间飞行中心的检测 X 射线成像望远镜性能的装置, 建立了目前世界上分辨率最高的散射测试系统, 该装置的主体真空系统、长 1000 ft, 用于 AXAF 装置反射镜面粗糙度的测量^[5]。国际上很多高精度的测量均在这两套系统中进行。我国在八十年代初, 研制天文卫星用掠射式软 X 射线成像望远镜期间, 为了检测 X 射线望远镜的光学性能, 建立了一套长 70m、通光管道直径 $\phi 400\text{mm}$ 的无油高真空系统, 并利用该系统参照西德地外所早期建立的散射测量系统, 在国家自然科学基金的资助下, 建立了较高分辨率测试系统, 其主要性能为: 真空度 260 uPa (10^{-6}Torr) 以上, 光束发散角 34 角秒, 散射测量的空间分辨率 6 角秒, 光源用 Henke 型软 X 射线源, 探测器用正比计数器。该系统既可用于 X 射线望远镜光学性能和软 X 射线光学器件光学性能的检测, 以及较高分辨率散射测量。现已测试了北京正负电子对撞机光束线系统用镀片衰减均匀性的测量和铝基试样、表面镀 Ni-P 合金后抛光的超光滑表面的散射分布测量。

我们初步建立的这套系统与国际先进水平比较还有差距。主要是空间分辨率还需提高, 控制系统尚需改进。现在用逐点测量, 测量速度太慢, 稳定性也差。如需检测 10\AA 以下的粗糙度, 尚需从以下各方面加以改进。

1. 提高空间分辨率拟采取的几项措施。一是增加双晶准直系统, 即选择对软 X 射线衍射较强的单晶, 作成平行平面的双晶衍射系统, 可提高直射束的单色性和强度, 并能提高准直度。如晶体完整性较好, 发散角可达 2 角秒, 这是目前国际上尚未采用的措施。其次可拉长光路准直狭缝间的距离, 原测试系统上在光源附近有一备用狭缝腔, 第一准直狭缝移到此处, 则两狭缝间的距离可达到 52m。如选用 $\phi 500\mu\text{m}$ 圆孔狭缝, 直射束的发散角将提高到 4 角

秒, 再将试样到探测器狭缝间距离拉长到12m, 探测器狭缝仍用100 μ m, 空间分辨率可提高到1.7角秒, 但需添置小型试样台装入第二狭缝腔。

2. 改进探测系统, 将现用横窗正比计数器改为位敏探测器, 可降低噪声提高探测精度, 也提高了稳定性和测试速度。

3. 改进控制系统, 将手控改为微机控制和程序操作, 使测试自动化, 测试数据采样直接进入微机进行处理, 自动显示被测表面的形貌参数。

4. 除采用双晶准直系统提高直射束强度外, 应改进光源提高直射束强度, 增加探测灵敏度。

5. 无油高真空系统已运行八年, 泵系统与真空计量系统、阀门、控制系统都需维修和改进, 以确保试验正常进行。

此外尚需研制不同级别超光滑表面的标准样品, 每隔一定时间用标准样品校验测试系统的精确性和稳定性, 确保得到可靠的测试结果。

参 考 文 献

- [1] Martin V. Zombeck, SPIE, 316(1981)174
- [2] F.E. Christensen, Appl. Optics, 27 No. 8(1988)1548
- [3] 马文军、龚再仲, 光学机械, No. 5(1989)7
- [4] 蒋筑英, 光学机械, No. 6(1980)80
- [5] George C. Marshall Space Flight Center, MSFC X-ray Test & Calibration Facility, HSE 6112 Feb. 15(1976)

The Roughness Measurement for Supersmoothed Surface by Using Soft X-ray Scattering Method

Gong Zaizhong Ma Wenjun

Abstract

This paper reports briefly the scattering theory, the testing method and facility system for measuring the supersmoothed surface roughness by using soft X-ray scattering method.