



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101738407 A

(43) 申请公布日 2010.06.16

(21) 申请号 200910218063.3

(22) 申请日 2009.12.22

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路
3888 号

(72) 发明人 陈波 王永刚

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 赵炳仁

(51) Int. Cl.

G01N 23/20(2006.01)

G01T 1/36(2006.01)

G01B 15/08(2006.01)

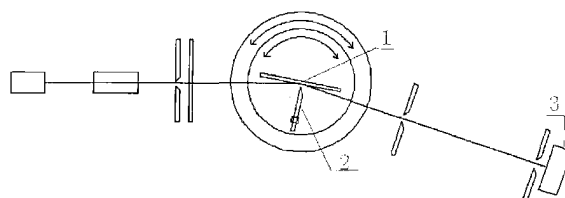
权利要求书 1 页 说明书 3 页 附图 1 页

(54) 发明名称

基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法

(57) 摘要

本发明涉及检测超光滑表面粗糙度的方法,特别是一种基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法,以波长 λ 小于 4 \AA 的 X 射线作为探测光束掠入射到置于样品台上的被测样品表面上,其掠入射角小于样品在 X 射线波段的全反射临界角。X 射线衍射仪上的光子计数探测器以设定的间隔和速度旋转逐步扫描接收从样品表面反射出的散射光束,记录逐步的散射光强 $\Pi(\theta)$ 。根据一级矢量微扰理论公式计算获得表面一维功率谱密度函数 $\text{PSD}_{1D}(p)$ 和有效表面粗糙度 σ_{eff} 。本方法可对均方根表面粗糙度小于 2nm 的超光滑表面的功率谱密度函数及其有效表面粗糙度值进行较精确的定量测量,其测量设备手段简单、操作方便。



1. 一种基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法,其特征在于:以波长 λ 小于 4\AA 的 X 射线作为探测光束掠入射到置于样品台上的被测样品表面上,其掠入射角小于样品在 X 射线波段的全反射临界角, X 射线衍射仪上的光子计数探测器以设定的间隔和速度旋转逐步扫描接收从样品表面反射出的散射光束,记录逐步的散射光强 $\Pi(\theta)$, 根据以下式 (1) 和式 (2) 计算获得表面一维功率谱密度函数 $PSD_{1D}(p)$ 和有效表面粗糙度 σ_{eff} :

$$\Pi(\theta) = \frac{1}{W_0} \frac{dW_{scat}}{d\theta} = \frac{k^3 |1 - \varepsilon|^2 |t(\theta_0)t(\theta)|^2}{16\pi \sin \theta_0 \sqrt{\cos \theta_0 \cos \theta}} \cdot PSD_{1D}(p) \quad (1)$$

$$\sigma_{eff}^2 = 2\pi \int_{p_{min}}^{p_{max}} PSD_{1D}(p) dp \quad (2)$$

式中: W_0 为入射到表面上的辐射功率;

dW_{scat} 为在散射角 $d\theta$ 范围内的辐射功率;

$PSD_{1D}(p)$ 为表面一维功率谱密度函数;

θ_0 为光线掠入射角;

θ 为散射角;

p 为由一维光栅方程决定的与 θ 和 θ_0 相关的空间频率范围;

$t(\theta)$ 为理想光滑表面的传输因子;

ε 为介质的复介电常数;

k 为波矢量。

2. 根据权利要求 1 所述的基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法,其特征在于,采用波长 $\lambda=1.54 \text{\AA}$ 的铜靶的 K_α 谱线作为探测光束光源。

3. 根据权利要求 1 所述的基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法,其特征在于,通过调节设置在样品台上的刀口与被测样品表面的夹缝,以避免探测光束直接射入探测器。

基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及检测超光滑表面粗糙度的方法,特别是一种用 X 射线衍射仪测量超光滑表面粗糙度的方法。

背景技术

[0002] 目前,在半导体和短波段光学领域,测量超光滑表面的一般采用的方法是光学干涉法和接触法。干涉法测量设备结构复杂,成本较高;而采用接触式测量时,探头与表面接触,容易划伤表面。

[0003] 在用散射法测量光学表面方面,R. S. Wriston、尼启良、陈淑妍等研究了在真空条件下用软 X 射线或紫外线散射法测量粗糙表面的方法^[1-3]。这种方法基于标量散射理论,用来测量较粗糙的表面($\sigma_{\text{rms}} > 3\text{nm}$)。但是测量设备复杂,涉及到抽真空问题,费时且操作不方便。J. M. Elson, J. C. stover 等利用可见光的散射测量粗糙表面^[4-10]。这种方法也是以标量散射理论为基础,主要用于测量更大粗糙的表面($\sigma_{\text{rms}} > 100\text{nm}$)。而对于超光滑表面($\sigma_{\text{rms}} < 2\text{nm}$),散射现象主要是由中高频误差引起的。因为可探测的表面最小横向尺寸与探测波长相当,无论是可见光散射法还是软 X 射线散射法,只能给出中低频误差引起的散射信息,所以我们不能得到更精确的表面微观信息。

发明内容

[0004] 本发明的目的是为了克服目前惯用的检测超光滑表面粗糙度的方法存在的上述种种缺陷,提出一种基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法,以实现能对均方根表面粗糙度小于 2nm 的超光滑表面的功率谱密度函数(PSD)及其有效表面粗糙度值进行较精确的定量测量。

[0005] 本发明基于 X 射线衍射仪测量超光滑表面的方法,以波长 λ 小于 4\AA 的 X 射线作为探测光束(否则射线在空气中传播时有强烈的吸收)掠入射到置于样品台上的被测样品表面上,其掠入射角小于样品在 X 射线波段的全反射临界角, X 射线衍射仪上的探测器以设定的间隔和速度旋转逐步扫描接收从样品表面反射出的散射光束,记录逐步的散射光强 $\Pi(\theta)$,根据以下式(1)和式(2)计算获得一维功率谱密度 $\text{PSD}_{1D}(p)$ 和有效表面粗糙度 σ_{eff} :

$$[0006] \quad \Pi(\theta) = \frac{1}{W_0} \frac{dW_{\text{scat}}}{d\theta} = \frac{k^3 |1 - \varepsilon|^2 |t(\theta_0)t(\theta)|^2}{16\pi \sin\theta_0 \sqrt{\cos\theta_0 \cos\theta}} \cdot \text{PSD}_{1D}(p) \quad (1)$$

$$[0007] \quad \sigma_{\text{eff}}^2 = 2\pi \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} \text{PSD}_{1D}(p) dp \quad (2)$$

[0008] 式中: W_0 为入射到表面上的辐射功率;

[0009] dW_{scat} 为在散射角 $d\theta$ 范围内的辐射功率;

[0010] $\text{PSD}_{1D}(p)$ 为表面一维功率谱密度函数;

[0011] θ_0 为光线掠入射角;

[0012] θ 为散射角；

[0013] p 为由一维光栅方程决定的与 θ 和 θ_0 相关的空间频率范围；

[0014] $t(\theta)$ 为理想光滑表面的传输因子；

[0015] ε 为介质的复介电常数；

[0016] κ 为波矢量。

[0017] 本发明测量方法,借助于 X 射线衍射仪即可实现对均方根表面粗糙度小于 2nm 的超光滑表面的功率谱密度函数 (PSD) 及其有效表面粗糙度值进行较精确的定量测量,测量设备手段简单、操作方便,利用该方法可以测量超光滑表面的中高频误差以及研究固体的亚表面结构。

附图说明

[0018] 图 1 是在 X 射线衍射仪上测量超光滑表面的光学系统示意图；

[0019] 图 2 是 $\sigma = 0.67\text{nm}$ 的硅片用 GXRS 法和 AFM 法所获得的 PSD 图；

[0020] 图 3 是 $\sigma = 0.46\text{nm}$ 的硅片用 GXRS 法和 AFM 法所获得的 PSD 图；

[0021] 图 4 是 $\sigma = 0.29\text{nm}$ 的硅片用 GXRS 法和 AFM 法所获得的 PSD 图。

具体实施方式

[0022] 通过以下实施例对本发明方法作进一步详细说明。

[0023] 参照图 1,按以下作法在以铜靶的 K_α ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$)谱线作光源的商用 X 射线衍射仪上测量超光滑表面粗糙度：

[0024] 将待测样品固定在样品台上,使待测表面位于入射狭缝和接收狭缝形成的平面上。通过调整样品台使探测光束以 $\theta_0 = 0.18^\circ$ 掠入射到待测样品 1 表面上,其掠入射角 θ_0 小于样品在 X 射线波段的全反射临界角。狭缝的宽度从左至右分别为 $20 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$,光源 - 样品间距离为 185mm ,样品 - 探测器间距离也为 185mm 。调节设置在样品台上的微调刀口 2 与被测样品表面的夹缝,以避免探测光束直接射入 X 射线衍射仪的光子计数探测器 3。X 射线衍射仪上的光子计数探测器 3 以设定的间隔 ($18''$) 和速度 ($18''/\text{S}$) 旋转逐步扫描接收从样品表面反射出的散射光束,记录逐步的散射光强 $\Pi(\theta)$,根据一级矢量微扰理论公式 (1) 和公式 (2) 计算获得一维功率谱密度 $\text{PSD}_{1D}(p)$ 和有效表面粗糙度 σ_{eff} ：

$$[0025] \quad \Pi(\theta) = \frac{1}{W_0} \frac{dW_{\text{scat}}}{d\theta} = \frac{k^3 |1 - \varepsilon|^2 |t(\theta_0)t(\theta)|^2}{16\pi \sin \theta_0 \sqrt{\cos \theta_0 \cos \theta}} \cdot \text{PSD}_{1D}(p) \quad (1)$$

$$[0026] \quad \sigma_{\text{eff}}^2 = 2\pi \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} \text{PSD}_{1D}(p) dp \quad (2)$$

[0027] 式中： W_0 为入射到表面上的辐射功率；

[0028] dW_{scat} 为在散射角 $d\theta$ 范围内的辐射功率；

[0029] $\text{PSD}_{1D}(p)$ 为表面一维功率谱密度函数；

[0030] θ_0 为光线掠入射角；

[0031] θ 为散射角；

[0032] p 为由一维光栅方程决定的与 θ 和 θ_0 相关的空间频率范围；

[0033] $t(\theta)$ 为理想光滑表面的传输因子；

[0034] ε 为介质的复介电常数；

[0035] κ 为波矢量。

[0036] 按上述做法分别测量以下三个不同粗糙度的硅片样品试验例：

[0037] 用原子力显微镜 (AFM) 测得该三个样品的表面粗糙度及其他参数如表 1 所示。所选取的样品具有比较光滑的表面 ($\sigma_{\text{rms}} < 2\text{nm}$)，且表面没有显著的瑕疵。

[0038] 表 1 样品的基本参数

[0039]

样品	硅片1	硅片2	硅片3
粗糙度测量值 (nm)	0.67	0.46	0.29
尺寸 (mm×mm)	10×13.5	10×11.5	12.8×12.9

[0040] 而用上述的掠入射 X 射线散射 (GXRS) 法得到的三个不同粗糙度硅片的一维功率谱密度 $\text{PSD}_{1D}(p)$ 分别如图 2、图 3、图 4 所示；由公式 (2) 计算得到的有效表面粗糙度 σ_{eff} 如表 2 所示。

[0041] 表 2GXRS 法和 AFM 法得到的均方根粗糙度值

[0042]

样品	硅片1	硅片2	硅片3
粗糙度 (nm)	0.67	0.46	0.29
AFM 测量面积 ($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	50×50	50×50	50×50
GXRS 粗糙度 (nm)	0.92	0.68	0.47
测量面积 (mm×mm)	10×13.5	10×11.5	12.8×12.9

[0043] 从表 2 可以看出：掠入射 X 射线散射法测量面积远大于 AFM 扫描范围，因此在空间中频区域掠入射 X 射线散射 (GXRS) 法得到 PSD 应高于 AFM 得到 PSD，而在空间高频区，两者则基本一致，如图 2、图 3、图 4 所示，实验结果与理论相符。

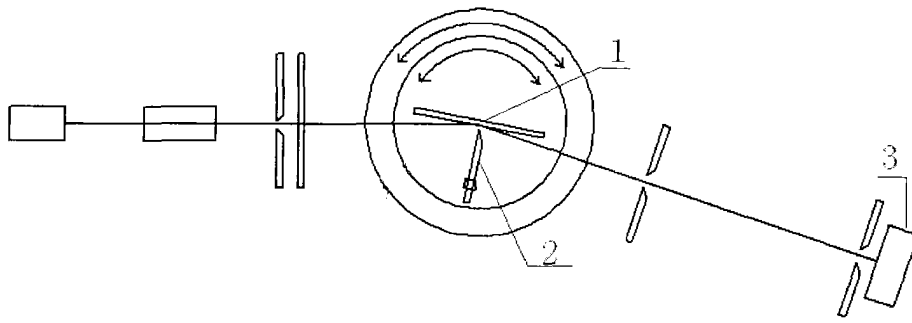


图 1

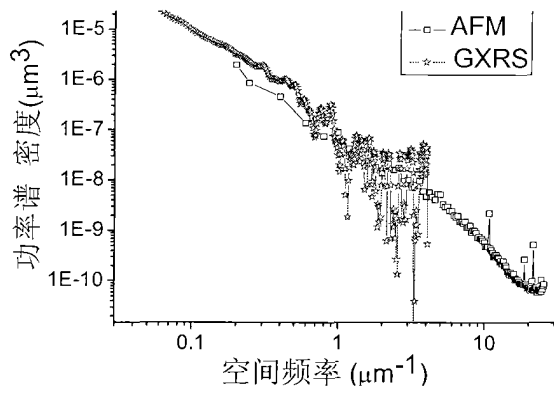


图 2

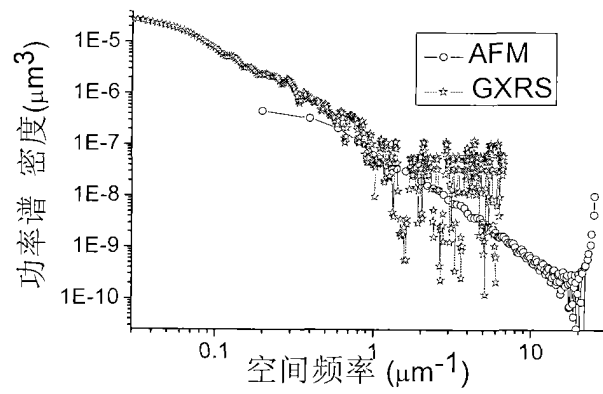


图 3

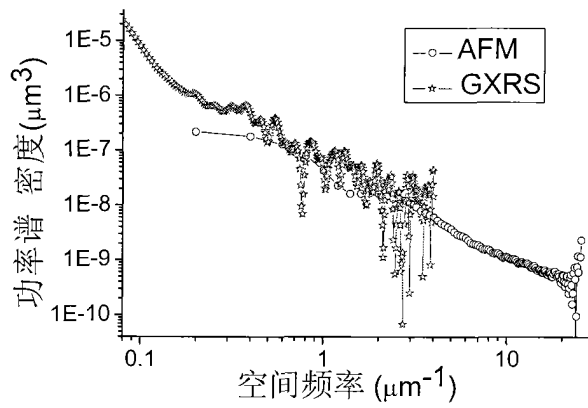


图 4