

角分辨的光散射轮廓及自仿射分形表面的粗糙指数的实验研究

张宁玉^{1,2} 程传福¹ 张俊超¹ 滕树云¹

(¹山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014; ²山东建筑大学理学院, 山东 济南 250101)

摘要 建立了反射式随机表面的光散射特性实验测量系统,利用多幅平均及叠加连接的方法,得出入射角在 $45^\circ\sim 85^\circ$ 之间不同值时的光散射轮廓。结果表明,随着表面入射角的增加,光散射轮廓的半峰全宽逐渐减小。并且当入射角的增加到一定值时,光散射轮廓出现中央亮斑。由数学上的对称下降函数,推导出光散射轮廓的半峰全宽随散射光波矢的变化关系,从实验测得角分辨的光散射轮廓中提取了自仿射分形随机表面的粗糙指数。与原子力显微镜测量得到的粗糙指数进行比较,两者符合得很好。

关键词 散射;光散射轮廓;自仿射分形表面;半峰全宽;粗糙指数;原子力显微镜

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2208

Experimental Study on Angle-resolved Light Intensity Scattered Profile and Roughness Exponent of Self-affine Fractal Surface

Zhang Ningyu^{1,2} Cheng Chuanfu¹ Zhang Junchao¹ Teng Shuyun¹

(¹College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)
(²School of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract The new experimental measurement system is set up to measure light intensities scattered from the reflection-mode random surface. By using the technique of data average and overlay connection, the functions of scattered light intensity profiles are calculated at different incidence angles ($45^\circ\sim 85^\circ$) on random surface. The results show that the full widths at half-maximum of intensity profiles are decreased gradually with increased of the incidence angles. While the incidence angle increases to a certain value, the light intensity scattered profile presents a central bright spot. Based on the symmetric decline function in mathematics, the relationship between the full width at half-maximum of intensity profile and the light wave vector is deduced, and the roughness exponent of self-affine fractal surface is extracted from angle-resolved scattered light intensity profiles. It is obvious that the obtained value of roughness exponent is in good agreement with that measured by atomic force microscope.

Key words Scattering light intensity scattered profile; self-affine fractal surface; full width at half-maximum; roughness exponent; atomic force microscope

1 引言

关于随机表面的特性研究在许多科学技术应用领域都是十分重要的研究课题。在可见光范围内,

利用散射光场特性研究随机表面在诸如薄膜生长的动力学研究^[1]、光波在生物表面的传播特性^[2]、光学元件的设计加工^[3]等方面得到广泛应用。随机表面

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2008-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(10674085)、山东省自然科学基金(2006A18)和山东省中青年科学家科研奖励基金(2007BS04031)资助课题。

作者简介: 张宁玉(1962—),女,博士研究生,副教授,主要从事光电信息技术应用方面的研究。

E-mail: zny688@126.com

导师简介: 程传福(1962—),男,博士生导师,教授,主要从事衍射光学及光信息处理等方面的研究。

E-mail: chengchuanfu@sdu.edu.cn

经过光散射后产生的散射光强分布是一个随空间坐标缓慢变化的函数,一般称为光散射轮廓^[4]。该轮廓函数取决于随机表面结构的统计参量,因此对光散射轮廓函数的理论研究和实验测量是光散射法定随机表面的重要方法^[5]。自仿射分形表面是一种能够更精确地描述各种实际表面的模型,这种模型能同时描述随机表面长程内的颗粒状结构和短程内的分形特征,成为近年来被广泛接受和采用的表面模型^[6]。自仿射分形表面模型主要由三个统计参量来描述,除了常用的方均根粗糙度 w 和横向相关长度 ξ 两个参量以外,近年来人们还提出粗糙指数 α 来描述随机表面短程内的分形特征。所以,利用实验方法从光散射轮廓中提取自仿射分形表面的统计参量,特别是粗糙指数 α ,是备受关注的课题^[7, 8]。

本文建立了反射式随机表面的光散射特性实验测量系统,测量了不同入射角时的光散射轮廓。将光电耦合器件(CCD)作为探测器置于精密平台上,通过移动精密平台,测量整个散射光场的光强分布。采用软件处理方法,将 CCD 每次测量的光强数据进行多组数据求平均和叠加连接后,得到某一入射角时的光散射轮廓曲线。由电动旋转台带动自放射分形表面样品,转过不同的角度,测量了激光入射角在 $45^\circ \sim 85^\circ$ 之间不同值时的散射光强,计算得到角分辨的光散射轮廓。并根据数学上的对称下降函数,推导出角分辨的光散射轮廓函数的半峰全宽(FWHM)与散射光波矢的变化关系,从实验测得的光散射轮廓中提取了自仿射分形表面的粗糙指数 α ,与原子力显微镜(AFM)的接触法测量所得到的 α 值比较,两者符合得很好。

2 实验系统

建立的反射式随机表面的光散射特性实验测量系统如图 1 所示。采用 Si(100)晶片的粗糙背面作为反射式随机表面样品,入射光为波长 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 、波矢量为 k_0 的 He-Ne 激光光束,图中 R 为反射镜, P_1 和 P_2 为偏振片,固定 P_1 以保持入射光的偏振态不变,调节 P_2 用于改变入射光的强度。入射光经小孔 F 滤波后,照射位于透镜 L 后的表面样品,经表面散射后形成散射光场。透镜 L 到样品的距离为 8.2 cm,样品到光强探测器 CCD 的距离为 11.8 cm,两者之和为透镜 L 的焦距 20 cm。以入射点作为坐标原点建立坐标系 $O_0x_0y_0z_0$,样品表面为 $O_0x_0y_0$ 平面, z_0 轴为样品表面的法线方向。将样品固定于计算机控制的高精度电动旋转台上,

当旋转台绕 y_0 轴转动时,随机表面样品的入射角 θ 也随之改变,旋转台的转动精度可达 0.01° 。以样品的镜面反射方向为 z 轴建立另一坐标系 Oxy , Oxy 平面为透镜 L 的后焦面。图 1 中的 θ 为入射角, β 为散射光波与 z 轴的夹角,在 Oxy 平面上形成的光散射轮廓用 $I(k)$ 来表示。将探测器 CCD 置于精密移动平台上,使其接收靶面位于 Oxy 平面,平台的移动使 CCD 沿 y 轴向上依次测量散射光强。散射光强经计算机内的图像采集卡转换为数字信号,并由计算机读入内存,计算出某入射角时的光散射轮廓曲线。CCD 型号为 Panasonic WV-BP310,其接受靶面面积为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ 。图像采集卡采用的是大恒图像 DH-VT110 型,其图像分辨率为 PAL 制 $768 \times 576 \times 24 \text{ bit}$ 。探测器 CCD 每一次采集到光强图像面积为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$,经图像采集卡转换为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$ 的光强分布灰度图,因此灰度图的像素间隔约为 $6.3745 \mu\text{m}$ 。

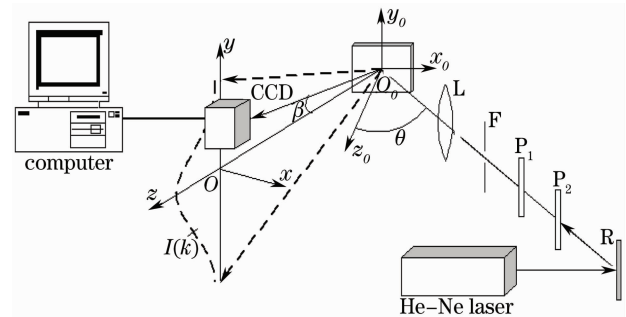


图 1 角分辨的光散射轮廓实验测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram for experimental measurement system of angle-resolved light intensity scattered profiles

在实际的实验测量中,设定某一入射角 θ 值后,电动旋转台带动随机表面样品旋转到相应的角度位置。探测器 CCD 从 Oxy 平面上的原点位置开始,沿 y 轴向上依次移动对散射光强进行测量如图 1 所示。由于 CCD 接收靶面面积仅为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$,要测量整个散射光场就需要移动 CCD 多次,并将每次测量的光强数据连接起来。因此,设定 CCD 每次移动的距离为 3.5 mm 左右,不超过 4.8 mm,这样相邻两次测量的光强数据有重合部分便于叠加连接。实验测量中,CCD 共移动 20 余次,移动测量的垂直距离约为 80 mm。由计算机内的数据采集卡,将 CCD 每次采集到的模拟信号转换为数字数据。再经过软件处理,将数据进行叠加连接,可得到某一入射角时完整的光散射轮廓曲线。然后设定下一入射角 θ 值,电动旋转台带动表面样品旋

转到下一角度位置,按照上述实验测量和数据处理方法,得到此入射角时的光散射轮廓。通过实验测量入射角在 $45^\circ \sim 85^\circ$ 之间不同值时的散射光强,可以计算得到角分辨的光散射轮廓。实验中当入射光的光束直径为 3 mm,透镜焦距为 20 cm,透镜到样品的距离为 11.8 cm 时,可以计算出入射点的光斑大小为 1.77 mm。但入射光的光斑尺寸只是影响散射光场中散斑颗粒的大小,而对整个光散射轮廓基本没有影响^[9]。

3 原理分析

在图 1 所示的实验测量系统中,如果随机表面的高度分布函数为 $h(\mathbf{r})$,则描述随机表面统计特性的高度-高度相关函数的定义为^[10]

$$H(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = \langle [h(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) - h(\mathbf{r})]^2 \rangle = 2\omega^2 [1 - R_h(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})], \quad (1)$$

其中 $\langle \rangle$ 代表系综平均, $R_h(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = \langle h(\mathbf{r})h(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \rangle / \omega^2$ 表示随机表面任意两点 \mathbf{r} 和 $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$ 的高度自相关函数, ω 为方均根粗糙度。如果随机表面是各态历经和各向同性的自仿射分形随机表面,其表面的高度-高度相关函数仅与两点的距离 $\rho = |\boldsymbol{\rho}| = |\Delta\mathbf{r}|$ 有关:

$$H(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = H(\rho) = 2\omega^2 [1 - R_h(\rho)]. \quad (2)$$

当两点之间的距离很大时,随机表面上这两点的高度之间就不再相关,即 $H(\rho \rightarrow \infty) = 2\omega^2$ 。在光学散射和对表面分形结构的描述中,自仿射分形表面模型已被广泛用来描述各种各样的随机表面的形貌,S. K. Sinha 等^[11]提出自仿射分形表面的高度-高度相关函数可表示为

$$H(\rho) = 2\omega^2 \{1 - \exp[-(\rho/\xi)^{2\alpha}]\}, \quad (3)$$

其中 α 为粗糙指数,其取值范围在 $0 \sim 1$ 之间,它描述了自仿射分形表面的分形特征。 ξ 是横向相关长度,表示表面散射颗粒的平均大小。在图 1 给出的实验系统中,当波矢量为 \mathbf{k}_0 的入射光照明样品表面后, Oxy 平面上波矢量为 \mathbf{k} 的散射光波为^[12]

$$U(\mathbf{k}) = \int \exp[-ik_\perp h(\mathbf{r})] \exp(-ik_\parallel \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (4)$$

其中 k_\perp 和 k_\parallel 为 \mathbf{k} 的垂直于样品表面和平行于样品表面的分量。并且 $k_\perp = 2\pi \cos\theta(1 + \cos\beta) / \lambda \approx 4\pi \cos\theta / \lambda$, $k_\parallel = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\beta$ 。如果 D 表示样品表面与探测器 CCD 之间的距离, r_D 表示 CCD 从 Oxy 平面坐标原点向上移动的垂直距离,则 $\sin\beta = r_D / (D^2 + r_D^2)^{1/2}$ 。由基尔霍夫理论可知,样品表面的光散射轮廓函数为^[13]

$$I(\mathbf{k}) = \langle U(\mathbf{k})U(\mathbf{k}) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-\frac{1}{2}k_\perp^2 H(\rho)] \exp(-ik_\parallel \cdot \boldsymbol{\rho}) d\boldsymbol{\rho}. \quad (5)$$

为了从光散射轮廓中进一步提取自仿射分形随机表面的粗糙指数 α ,需要给出光散射轮廓与随机表面参量的数学表达式。但对于高度-高度相关函数 $H(\rho)$ 由(3)式决定的自仿射分形表面来说,进一步推导光散射轮廓 $I(\mathbf{k})$ 与表面参量之间的关系是非常困难的,只能在某种近似条件下得到 $I(\mathbf{k})$ 进一步的表达式。在 $k_\perp^2 \omega^2 \ll 1$ 的近似条件下,将(5)式右端的第一项做泰勒展开,并略去高次项, $I(\mathbf{k})$ 可以写成:

$$I(\mathbf{k}) = I(k_\parallel) = (2\pi) \exp(-k_\perp^2 \omega^2) [2\pi\delta(k_\parallel) + k_\perp^2 \omega^2 \xi^2 \int_0^\infty \exp(-t^{2\alpha}) t J_0(k_\parallel \xi t) dt], \quad (6)$$

上式右端方括号中的第一项为光散射的中心亮斑,表示随机表面的镜面反射分量,第二项表示表面的漫散射分量。在 $k_\perp^2 \omega^2 \ll 1$ 的近似条件下, $I(\mathbf{k})$ 可以写成^[14]

$$I(\mathbf{k}) = I(k_\parallel) = [\xi(k_\perp \omega)^{-1/\alpha}]^2 \int_0^\infty \exp(-t^{2\alpha}) t J_0(k_\perp^{-1/\alpha} \omega^{-1/\alpha} \xi k_\parallel t) dt. \quad (7)$$

以上两式右端的积分项均为 $\exp(-t^{2\alpha})$ 的贝塞尔-傅里叶变换,除 $\alpha = 1$ 之外,都无法得到它们的解析解。但可以肯定,该变换是随 k_\parallel 的对称下降函数,并且该对称下降函数的宗量对于(6)式和(7)式来说分别为 $k_\parallel \xi$ 和 $k_\perp^{-1/\alpha} \omega^{-1/\alpha} \xi k_\parallel$ 。如果将这两个宗量写成 k_\parallel / α 的形式,并且 α 可以看作是該对称下降函数的半峰全宽(FWHM)。因此,用数学上已有的对称

下降的高斯函数对光散射轮廓进行拟合,在 $k_\perp^2 \omega^2 \ll 1$ 的条件下,由光散射轮廓拟合出的 FWHM 的对数函数为

$$\ln\tau_{\text{FWHM}} = \frac{1}{\alpha} \ln k_\perp + \frac{1}{\alpha} \ln \omega - \ln \xi. \quad (8)$$

由此可知, $\ln\tau_{\text{FWHM}}$ 随 $\ln k_\perp$ 是线性变化的,其斜率为 $1/\alpha$,而 k_\perp 取决于入射角 θ 值。因此由 k_\perp 值不同的

光散射轮廓函数,即 θ 值不同的角分辨的光散射轮廓函数,可以拟合出自仿射分形表面的粗糙指数 α 。

4 实验结果

4.1 实验测量角分辨的光散射轮廓

按照上述的理论分析和实验测量方法,在图 1 所示的反射式随机表面的光散射特性实验测量系统中,分别测量了在 $45^\circ \sim 85^\circ$ 之间不同入射角时随机表面的散射光强。图 2 所示为探测器 CCD 在 Oxy

平面上原点位置时,测量得到各入射角的散射光强灰度图,灰度图面积为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ 。从这些灰度图中可以看出,随着入射角的逐渐增加,尤其是当入射角增加到 80° 以后,散射光强的中心亮斑越来越明显。这是因为根据理论分析,散射光强由镜面反射分量和漫散射分量两部分组成,并由(6)式可知,随着入射角 θ 的增加,散射光强的镜面反射分量也随着增加而形成中央亮斑。

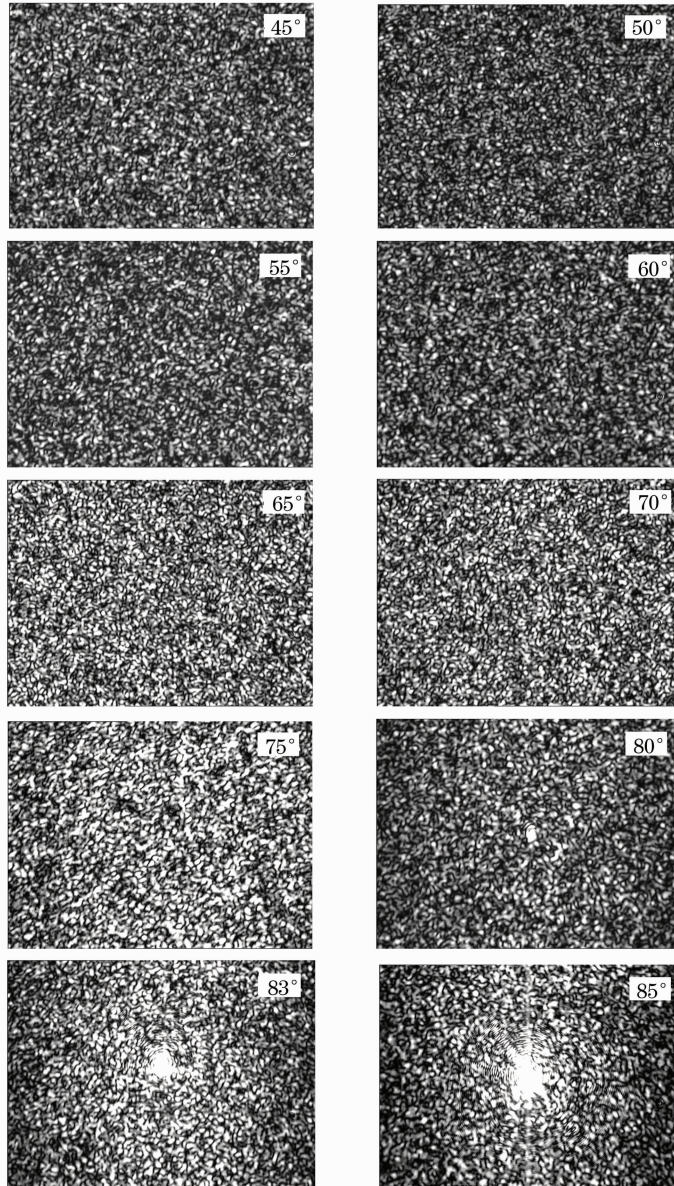


图 2 不同入射角时散射光场中心附近的散射光强灰度图(面积 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$)

Fig. 2 Grey-scale maps (area: $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$) at the centers of scattered light fields for different incidence angles

在数据处理过程中,首先利用 MATLAB 软件编程,将计算机内数据采集卡输出的光强灰度数据转换成 ASCII 码文本数据。为了减少噪声的干扰和提高数据的信噪比,CCD 在同一位置测量了 6 幅

光强灰度图数据,对这些数据进行了减背景和求平均的计算。考虑散射光场分布的空间平稳性,采用光强数据的空间平均代替系综平均,取每一幅灰度图中间位置的 80 行光强数据求平均,得到的值作为

一组散射光强数据。然后将探测器 CCD 沿 y 轴移动到下一位置,进行下一组光强数据的测量。如前所述,由于 CCD 探测靶面仅为 $4.8\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$,所以 CCD 需要移动 20 多次,并将测量得到的 20 多组光强数据进行叠加连接。数据的叠加连接是在 Origin 软件中进行:将相邻位置的两组光强数据导入后,将一组数据乘以适当的比例系数,使其画出的曲线向另一组数据画出的曲线逼近,并左右移动位置坐标,直到两组光强数据完全重合。而且在实验测量中,为了避免灰度饱和影响测量精度,当 CCD 测量到的散射光强较强时,应通过调节偏振片 P_2 适当减少样品表面的入射光强。随着 CCD 向上移动而远离 Oxy 平面的原点位置,散射光强变得太弱时,再通过调节偏振片 P_2 增加入射光强。并在数据处理过程中,通过乘以比例系数,对调节的光强数据进行调整。图 3 为入射角为 45° 时,CCD 在各个位置处测量的 20 多组散射光强数据的叠加连接效果图。从图中的放大图可以看到,经上述方法连接后的任意两段数据 A 和 B 完全平滑地连接起来。另外,考虑样品作为各向同性和各态历经的随机表面,其散射光场具有对称性。所以将沿 y 正轴方向测量得到的光散射轮廓,进行对称复制,作为沿 y 负轴方向分布的光散射轮廓,这样就得到了样品表面在某一入射角时完整的光散射轮廓曲线。

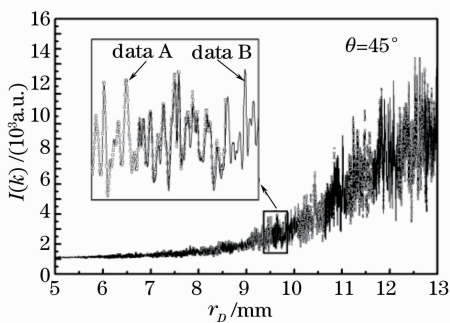


图 3 入射角 45° 时散射光强数据的叠加连接效果图

Fig. 3 Results of overlay connection of scattered light intensity data for the incidence angle 45°

通过计算机驱动电动旋转台,改变随机表面样品的激光入射角,测量了从 $45^\circ \sim 85^\circ$ 不同入射角时的散射光强。经上述数据处理,得到各入射角时的光散射轮廓如图 4 所示。图中根据 $k_{//} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{r_D}{\sqrt{D^2 + r_D^2}}$, 已经将 $I(\mathbf{k})$ 与位置坐标 r_D 的对应关系转换为 $I(\mathbf{k})$ 与波矢量的平行分量 $k_{//}$ 的对应关

系。由图 4 的结果可看出,当入射角由小变大时,光散射轮廓的半峰全宽逐渐减少,而中心亮斑的强度逐渐增加。且在入射角为 70° 、 75° 和 80° 时,光散射轮廓分布出现非常明显的次极大。这是因为本文所采用的样品表面为方形坑状结构,也就是说在严格意义上,样品表面的统计特性为各向异性,而对于表面统计特性为各向同性的随机表面^[15],其光散射轮廓并没有出现次极大现象。并且根据实验观察,改变偏振片 P_1 的偏振化方向,光散射轮廓的次极大没有明显变化,所以本文暂不考虑样品表面对入射光的退偏效应,这也是大多数文献所采用的方法^[16~18]。

4.2 提取自仿射分形表面的粗糙指数

由前面的理论分析可知,光散射轮廓与随机表面的统计参密切相关,所以可以根据光散射轮廓实验提取自仿射分形表面的粗糙指数。首先,对图 4 中各入射角的光散射轮廓进行了 500 点数据的平滑处理,然后对每一条光散射轮廓曲线采用高斯函数 $G(x) = C_1 \exp[-(k_{//}/C_2)^2]$ 进行拟合,拟合得到的常数 C_2 就是光散射轮廓的半峰全宽。这里虽然高斯函数并不是严格的拟合函数,但对于求光散射轮廓的半峰全宽,这种方法是适用的。图 5 给出了在对数-对数坐标下,角分辨的光散射轮廓的 FWHM 随散射光波矢的垂直分量 k_{\perp} 的变化曲线图。从曲线图中可以明显地看出样品表面参量的特征。而在 k_{\perp} 较大时,曲线变成平行的直线,直线的斜率为 $1/\alpha$ 。对这部分数据进行直线拟合,拟合得到直线的斜率为 $B = 1.47913 \pm 0.00055$ 。如前分析,根据斜率的倒数可以得到样品表面的粗糙指数的值为 $\alpha = 0.6761$ 。从图中还可以看到,随着 k_{\perp} 的减小,光散射轮廓的 FWHM 明显下降,但不是趋近于某一确定的纵坐标值。这是因为 Si(100) 晶片的粗糙背面作为表面样品,其粗糙程度较大,所以尽管 k_{\perp} 减小到很小的值,但 $(k_{\perp} w)^2 \approx 1$ 还是相当大。因此,样品表面的光散射轮廓不仅取决于入射角的大小等光散射条件,还取决于样品表面的粗糙程度(例如方均根粗糙度 w 的大小)。但在 k_{\perp} 取中间值时,光散射轮廓的半峰全宽 FWHM 及其随 k_{\perp} 的变化与自仿射分形表面参量之间的定量关系目前在理论上还没有解决,虽然已经在本文讨论了表面样品的参量 α 对 FWHM 的影响,但如何从中提取其它表面参量是有待于进一步研究的问题。

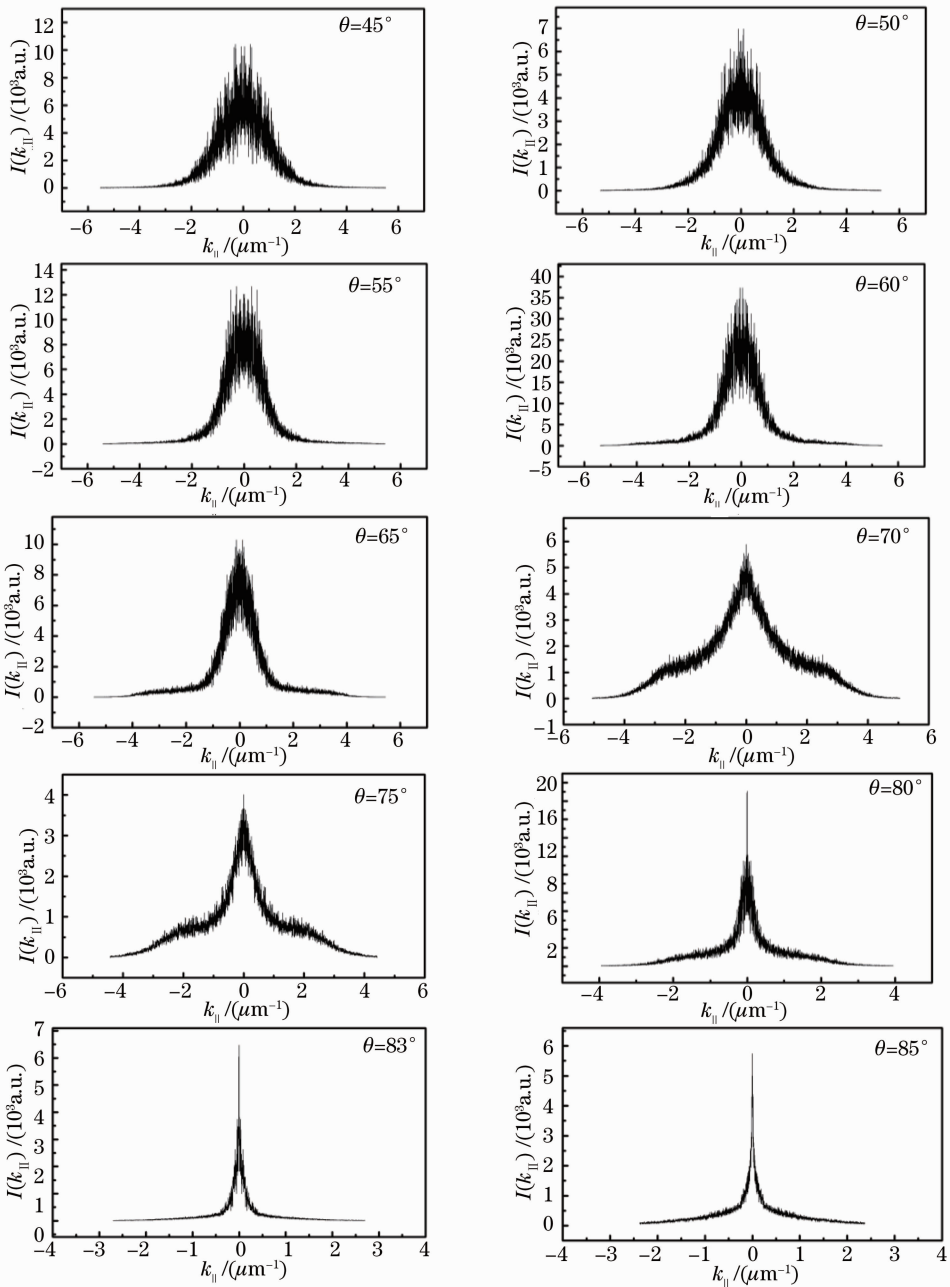


图 4 不同入射角时的光散射轮廓图

Fig. 4 Light intensity scattered profiles at different incidence angles

4.3 原子力显微镜测量的粗糙指数

用原子力显微镜 (AFM) 测量样品, 来验证实验方法提取粗糙指数 α 的准确性。所使用的原子力显微镜为 Park Autoprobe CP, 接触模式, UL06 探针, 针尖直径约为 10 nm, 边角为 10° 。图 6 为样品表面形貌的 AFM 测量图像, 其扫描成像范围为 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$, 成像点阵为 256×256 , 灰度等级为 $2.3 \mu\text{m} / \text{div}$ 。为了对随机表面的统计特征进行进一步的定量描述, 下面由 AFM 所测得的表面形貌高度的数据, 计算表面高度的自相关函数、高度-高

度相关函数和粗糙指数 α 等数据。用 AFM 在样品表面的三个不同区域进行扫描, 得到三幅表面图像, 以下的数据处理均为三幅图像的平均结果。首先根据随机表面高度的自相关函数定义 $R_h(\rho) = \langle h(r)h(r+\rho) \rangle / \omega^2$, 对样品表面的三幅 AFM 图像的高度数据分别用 FORTRAN 软件编程计算自相关函数后, 求平均得到该样品的自相关函数的数值分布, 图 7 中给出了样品表面高度的自相关函数曲线。从 $R_h(\rho)$ 自相关函数曲线中可以看出, 从 $\rho = 0$ 处的相关极大开始下降后, 在较大的 ρ 处有一定的振荡, 这种振荡是由于表面形貌中的大颗粒引

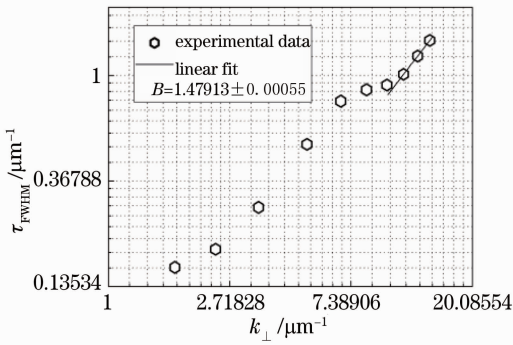


图 5 角分辨的光散射轮廓的 FWHM 随 k_{\perp} 变化的曲线图

Fig. 5 FWHMs of angle-resolved light intensity scattered profiles changed along with k_{\perp}

起的。再根据(3)式,在 $r \ll \xi$ 的范围内,随机表面的高度-高度相关函数 $H(\rho) = 2\omega^2(\rho/\xi)^{2\alpha}$,即 $H(\rho)$ 正比于 $\rho^{2\alpha}$,因此在对数-对数坐标中,该区域内的 $H(\rho)$ 应为一曲线,直线的斜率即为 2α 。图 7 给出了由 AFM 测得的样品表面的高度分布数据所计算出的高度-高度相关函数 $H(\rho)$,在对数-对数坐标中可见,在 $\rho \ll \xi$ 的范围内该图形为一曲线。对直线部分进行直线拟合,得到样品表面的 α 值为 0.6812,这与由光散射实验所测得的结果吻合得很好。但必须指出,随机表面的自相关函数在降至第一个最小值后仍有振荡,但自仿射分形表面的自相关函数是单调下降而最终趋于零的。因此自仿射分形表面模型对随机表面的描述只是在一定程度上的近似,而不完全准确。

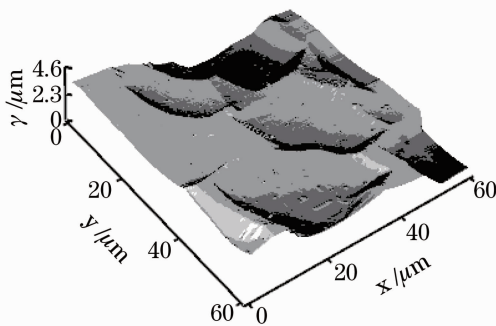


图 6 样品表面形貌的 AFM 测量图像

Fig. 6 AFM image of the sample surface

5 结 论

采用反射式随机表面的光散射特性实验测量系统,以光电耦合器件 CCD 作为探测器,测量了自仿射分形随机表面在入射角为 $45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 83^\circ$ 和 85° 时的散射光强数据。数据处理过程中,采用多幅光强数据求平均及多组数据叠加连接等

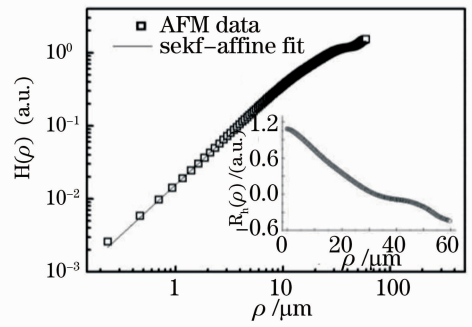


图 7 样品表面的高度-高度相关函数 $H(\rho)$ 和自相关函数 $R_h(\rho)$

Fig. 7 Height-height correlation function $H(\rho)$ and high autocorrelation function $R_h(\rho)$ of the surface sample

方法,得到各个入射角时完整的光散射轮廓曲线,即角分辨的光散射轮廓曲线。结果表明,随着随机表面入射角的增加,光散射轮廓的半峰全宽逐渐减小。并且当入射角增加到一定值时,光散射轮廓出现中央亮斑。根据理论分析,由角分辨的光散射轮廓的半峰全宽随散射光波矢的变化关系,从实验测得的光散射轮廓中提取了随机表面的粗糙指数 α ,与原子力显微镜测量得到的粗糙指数进行比较,两者符合的很好。本文提出的方法不仅为用光散射技术测量自仿射分形表面的统计参量提供了基础和方法,而且在研究这类表面及其光散射特性等方面具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 P. Liu, Y. W. Zhang, H. J. Gao *et al.*. Sustained surface wave propagation induced by surface diffusion driven by strain relaxation in a heteroepitaxial film[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(6): 061913
- 2 Liu Ying, Zhang Xiaojuan, Hu Youzhou. Scattering phase function of biological tissue and the Properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 877~880
刘 迎, 张小娟, 胡佑周. 生物组织的散射相函数及其二阶光学参量的性质[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 877~880
- 3 Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao *et al.*. Microscopic dark field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1031~1038
杨雨英, 陆春华, 梁 蛟等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1031~1038
- 4 Guo Li-Xin, Wu Zhen-Sen. Electromagnetic scattering from the two-dimensional fractal rough surface[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(1): 42~44
- 5 M. Zerrad, C. Deumié, M. Lequime *et al.*. An alternative scattering method to characterize surface roughness from transparent substrates[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9222~9231
- 6 J. A. Sanchez-Gil, J. V. Garcia-Ramos, E. R. Mendez. Light scattering from self-affine fractal silver surfaces with nanoscale cutoff: far-field and near-field calculations[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(5): 902~911
- 7 K. Oleschko, G. Korvin, B. Figueroa *et al.*. Fractal radar scattering from soil[J]. *Phys. Rev. E.*, 2003, **67**(4): 041403-1~4
- 8 F. Elsholz, E. Schöll, C. Scharfenorth *et al.*. Roughness evolution

- in thin-film growth of SiO_2 and Nb_2O_5 [J]. *J. Appl. Phys.*, **98**(10): 103516-1~4
- 9 J. C. Dainty. *Laser speckle and related phenomena* [M]. New York: Springer-Verlag, 1975
- 10 J. A. Ogilvy. *Theory of wave scattering from random rough surfaces* [M]. New York: Adam Hilger, 1991
- 11 S. K. Sinha, E. B. Sirota, S. Garoff *et al.*. X-ray and neutron scattering from rough surfaces[J]. *Phys. Rev. B*, 1988, **38**(4): 2297~2311
- 12 Cheng Chuan-Fu, Qi Dong-Ping, Liu De-Li *et al.*. The Computational simulations of the gaussian correlation random surface and its light-scattering speckle field and the analysis of the intensity probability density [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(9): 1635~1643
- 程传福, 亓东平, 刘德丽 等. 高斯相关随机表面及其光散射散斑场的模拟产生和光强概率分析[J]. *物理学报*, 1999, **48**(9): 1635~1643
- 13 H.-N. Yang, T. -M. Lu, G. -C. Wang. Diffraction from surface growth fronts[J]. *Phys. Rev. B*, 1993, **47**(7): 3911~3922
- 14 Cheng Chuanfu, Qi Dongping, Liu Deli. Light scattering measurement of surface roughness by variable wave vectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 1006~1008
- 程传福, 亓东平, 刘德丽. 表面粗糙度的变波矢光散射测量方法的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 1006~1008
- 15 Y. -P. Zhao, Irene Wu, C. -F. Cheng *et al.*. Characterization of random rough surfaces by in-plane light scattering[J]. *J. Appl. Phys.*, **84**(5): 2571~2582
- 16 Li Liangchao, Wu Zhensen, Deng Rong. Comparison of the Back Laser Rader Cross-Section Calculation of Complex Object with the Measurement of Scale-model[J]. *Chinese. J. Lasers.*, 2005, **32**(6): 770~774
- 李良超, 吴振森, 邓 蓉. 复杂目标后向激光雷达散射截面计算与缩比模型测量比较[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 770~774
- 17 Wang Jing, Liu Hengbiao, Li Tongbao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average[J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264
- 王 婧, 刘恒彪, 李同保. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 259~264
- 18 Xia Hui, Huang Shengxiang, Li Hongjian. Measuring the quality of milk using low-coherence dynamic light scattering[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2008, **35**(1): 102~105
- 夏 辉, 黄生祥, 李宏建. 应用低相干动态光散射检测乳制品品质[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 102~105