

制作粗糙度参数可控表面的理论及实验研究

何 毅 吴 健

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

提要 分析了用光刻胶记录激光散斑来制作粗糙度参数可控表面的方法,并成功地制作了一批样品。这些样品表面具有连续平滑的起伏轮廓,符合粗糙表面散射研究的理论模型,也可用作相位板。

关键词 粗糙度,散斑,全息技术

1 引 言

目标表面散射特性研究正受到各国的广泛重视。在这些研究领域内,理论上通常要求散射表面起伏是连续的、平滑的、没有隐坑、没有尖锐的轮廓,甚至表面起伏要符合高斯分布等。模拟折射率连续随机涨落的相位屏,一般也是在透明板表面形成随机的起伏,以使透过板后的光束波前相位产生随机调制效果。

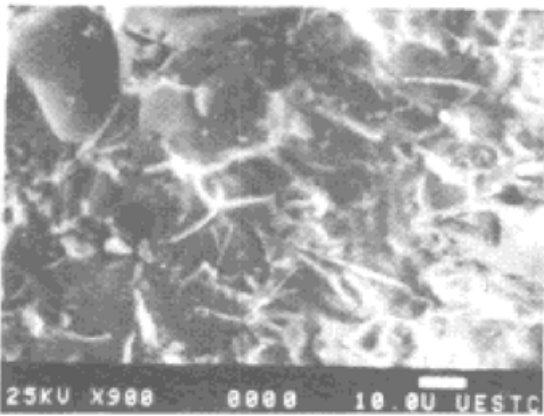


图 1 毛玻璃显微照片

Fig. 1 Electron micrograph of a ground-glass surface

束波前相位产生随机调制效果。

毛玻璃、金属件表面等漫射体常被用作实验研究,但这些粗糙表面的粗糙度参数事先不能有效地控制,表面起伏锐度大,分布均匀性差,常常出现自然裂纹或隐坑,不能满足理论研究的要求。如图 1 所示为毛玻璃表面的电镜扫描照片,可见表面有许多碎痕状尖锐起伏区域。利用对激光散斑进行曝光的方法制备粗糙表面的技术,早在 1978 年就有报道^[1],近年来得到了深入研究^[2~5]。我们在军事预研经费支持下,也开展了表面粗糙度参数控制技术的研究,完善了理论分析,并掌握了实际制作技巧。

2 理论分析

2.1 统计理论

如图 2 所示为产生斑纹并对斑纹进行曝光的光学系统。激光器发出的相干光经短焦距透镜 L_1 聚焦后用针孔滤波去掉杂散光,再用透镜 L_2 准直,获得一束腰半径为 w_0 的粗光束。焦距为 f 的透镜 L_3 把粗光束聚焦,在焦平面 F 和透镜 L_3 之间插入强漫射屏 O ,离 O 距离 z 的位置

P 上,放置涂有感光线性极好的光刻胶板。

透过强漫射屏 O 后光的相位及斑纹状态可以借用散斑统计随机行走模型来描述^[6],因此容易推知:

1) N 个互不相关且平均强度相等的斑纹场迭加总强度 $I = \sum_{k=1}^N I_k$ 在 P 平面上任一点处服从 Γ 分布。即

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{I^{N-1} \cdot N^N}{(N-1)! (I)^N} \exp(-\frac{NI}{\bar{I}}) & I \geq 0 \\ 0 & I < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\bar{I} = NI_k$ 为总强度平均,当 N 较大时, Γ 分布将趋于高斯分布。

2) N 个斑纹场非相干迭加时, P 平面上任意两点间的强度自相关函数为

$$\Gamma_I(\Delta x_p, \Delta y_p) = \frac{1}{N} (\bar{I})^2 \left[1 + \frac{\left| \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) |A(x, y)|^2 \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} (x \Delta x_p + y \Delta y_p)\right] dx dy \right|^2}{\left| \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) |A(x, y)|^2 dx dy \right|^2} \right] \quad (2)$$

式中, $\Delta x_p, \Delta y_p$ 为 P 平面上两点坐标差; $P(x, y)$ 为光瞳函数,取值为 0 或 1,它规定积分只对漫射屏 O 上照明部分进行; $A(x, y)$ 为入射到 O 前表面光振幅; λ 是激光波长。

由(1)式容易算出, N 个斑纹场非相干迭加的衬比度为

$$V = \frac{\delta_I}{I} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

2.2 二维高斯统计的实现

参看图 2,若 L_3 是旋转对称的,则入射到漫射屏 O 前表面上的光场分布为

$$A(x, y) = u_0 \left[\frac{f^2 \lambda}{\pi d w_0^2} \right] \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{(d w_0 / f)^2}\right] = u_0 \left[\frac{f^2 \lambda}{\pi d w_0^2} \right] \exp\left[-\frac{r^2}{(d w_0 / f)^2}\right] \quad (4)$$

式中 u_0 是对称轴 z 上的光振幅。把(4)式代入(2)式,考虑到高斯光束能量分布的特点,若光路中各元件有效孔半径大于光束半径,则可忽略衍射损耗,并认为光瞳函数 $P(x, y) \equiv 1$ 。最后可得

$$\Gamma_I(\Delta r_p) = \frac{1}{N} (\bar{I})^2 \left[1 + \exp\left[-\left[\frac{\pi d w_0}{\lambda z f} \cdot \Delta r_p\right]^2\right] \right] \quad (5)$$

式中 $\Delta r_p = [(\Delta x_p)^2 + (\Delta y_p)^2]^{1/2}$, d 和 z 的定义见图 2。很明显,上式右边是一个高斯函数。据此, P 平面上斑纹场平均斑点大小为

$$\delta_p = \frac{\lambda z f}{\pi d w_0} \quad (6)$$

斑点大小可通过选择适当的 z, f, d 和 w_0 来控制。 P 平面上斑纹场的分布不具有取向性,因而高斯统计是二维的。

2.3 一维高斯统计的实现

若把 L_3 换为柱形镜,这时入射到强漫射屏 O 上的光振幅可写为

$$A(x, y) = u_0 w(d) \exp\left[-\frac{x^2}{(w_0 d / f)^2}\right] \exp\left[-\frac{y^2}{w_0^2}\right] \quad (7)$$

式中 $w(d)$ 是一个描述 L_3 对光聚焦的参量; f 是柱形镜的焦距。把(7)代入(2)式,同样忽略衍

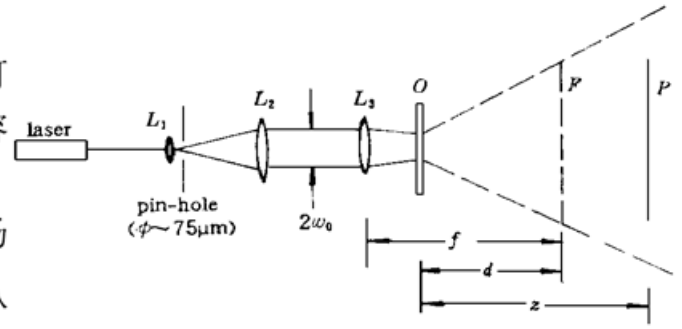


图 2 斑纹的产生及记录

Fig. 2 The arrangement employed for speckle patterns producing and recording

射损耗,最后得

$$\Gamma_I(\Delta x_p, \Delta y_p) = \frac{1}{N}(\bar{I})^2 \left[1 + \exp\left[-\left[\frac{\pi w_0 d}{\lambda z f} \cdot \Delta x_p\right]^2\right] \cdot \exp\left[-\left[\frac{\pi w_0}{\lambda z} \cdot \Delta y_p\right]^2\right] \right] \quad (8)$$

这仍是高斯函数。据此, P 平面上两个方向的斑纹场平均斑点大小为

$$\begin{cases} \delta_{px} = \frac{Nfz}{\pi w_0 d} \\ \delta_{py} = \frac{\lambda z}{\pi w_0} \end{cases} \quad (9)$$

上式与二维情况的差别在于两个方向上平均大小不同,说明斑纹分布发生了取向,定义取向比 η 为

$$\eta = \frac{\delta_{px}}{\delta_{py}} = \frac{f}{d} \quad (10)$$

当 $\eta \gg 1$ 或 $\eta \ll 1$, 可以认为斑纹场是一维高斯统计的。

2.4 斑纹的记录

在 P 平面上,线性地记录斑纹场的统计分布,即可控制表面粗糙度参数。若光刻胶为正性胶,例如 shipley Az-1350J 光刻胶对氩离子激光器的几条谱线就存在线性响应区^[7]。假定操作时处于这一工作区,则经显影后,未彻底曝光的涂层表面起伏量 h 为

$$h = [(\Delta r)t]CIT_0 = [(\Delta r)t]CE \quad (11)$$

式中, C 是曝光常数($\text{cm}^2 \text{mJ}^{-1}$), I 是 P 平面上的光强度($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$), T_0 是曝光时间(s), Δr 是已曝光和未曝光的光刻胶在显影时的蚀刻速度差($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), t 是显影时间(s), E 是总曝光量($E = IT_0$), h 的单位是 μm 。

与通常的反差类似,定义反差为

$$S = (\Delta r)tC$$

可见,在未充分显影时, $S \propto t$ 。把(11)式代入(1)式即得表面起伏的概率密度函数为

$$P(h) = \frac{h^{N-1} \cdot N^N \cdot ST_0}{(N-1)! (\bar{h})^N} \exp\left[-\frac{Nh}{\bar{h}}\right] \quad (12)$$

同样,把(11)式代入(5)式和(8)式,得粗糙表面起伏的横向相关长度为

$$\text{二维} \quad \tau = \frac{\lambda z f}{\pi d w_0} \quad (13)$$

$$\text{一维} \quad \begin{cases} \tau_x = \frac{Nfz}{\pi d w_0} \\ \tau_y = \frac{\lambda z}{\pi w_0} \end{cases} \quad (14)$$

表面起伏相关函数类似于(5)式和(8)式。利用(3)式,得表面起伏的均方根为

$$\delta_h = \frac{SE}{\sqrt{N}} \quad (15)$$

可见,在充分显影前提下,增大平均总曝光量 \bar{E} 可以增加均方根粗糙度。

至于负性胶,如全息干板,与上述讨论完全类似,只是记录反应的方式相反。

3 实 验

N 个斑纹场非相干迭加的意思是用 N 台输出强度相同的激光器, N 个完全相同的光学系统同时产生斑纹场, 在 P 平面上迭加。实际上这是不可能的, 注意到光刻胶化学反应的过程, 可以把同时变为不同时, 采用 N 次曝光来实现, 每次曝光平均强度 \bar{I}_k 相等, 曝光时间也相等。为了满足非相干迭加条件, 每次曝光后把强漫射屏作平移, 使激光照明到新的部位。

实验的目的是要控制表面起伏的统计分布方式、横向相关长度、起伏均方根及起伏相关函数等四个主要参量。根据(12)式, 若 $N = 1$, 则统计分布是负指数分布; 若 $N = 8$, 则统计分布近似服从高斯分布; 根据(5)和(8)式, 若激光束是基模高斯光束, 则起伏相关函数是高斯函数; 根据(13)、(14)式, 可通过调整光路参数来控制表面起伏横向相关长度; 根据(15)式, 控制平均总曝光量 \bar{E} , 即可控制表面起伏均方根。

用 AZ-1350J 光刻胶曝光制作样品的典型操作过程是: 基片处理—涂胶—曝光—显影—镀膜。波长选用 476.5 nm。每块样品的典型总曝光时间为 1~ 2 h, 需要非常安静平稳的平台环境。

用 632.8 nm 激光斑纹对国产全息干版进行多次曝光也得到一批样品, 但由于全息干版分辨率不高, 颗粒度比 AZ-1350J 大, 因而线性范围不易掌握, 只适合制作大相关长度的表面。

我们总共用曝光方法制作成功了 34 块样品。图 3 给出了 Talysurf—表面光洁度仪触针测试的 45# 样品平滑连续的起伏轮廓图。图 4 是曝光制作的 41# 样品的电镜分析照片, 与图 1 的毛玻璃照片相比较, 可见这种方法得到的表面起伏平滑, 且去除了毛玻璃那种颗粒状分布区域。图 5 是表面起伏幅度直方图, (a) 为 51# 样品典型的高斯分布($N = 8$), (b) 为 38# 样品典型的负指数分布($N = 1$)。

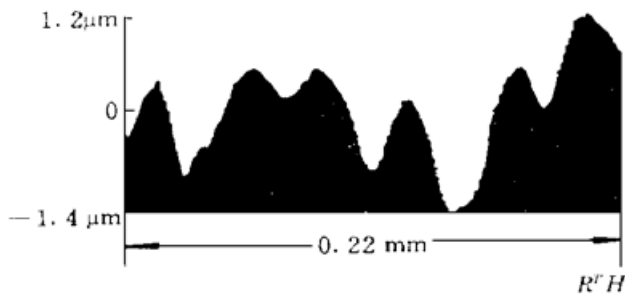


图 3 45# 样品的表面起伏轮廓
Fig. 3 Surface profile of sample 45#

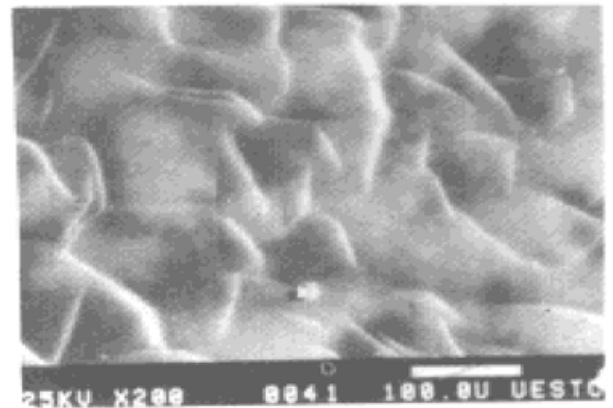


图 4 曝光制作的 41# 样品的电镜分析照片
Fig. 4 Electron micrograph of the surface of the exposure-fabricated 41# sample

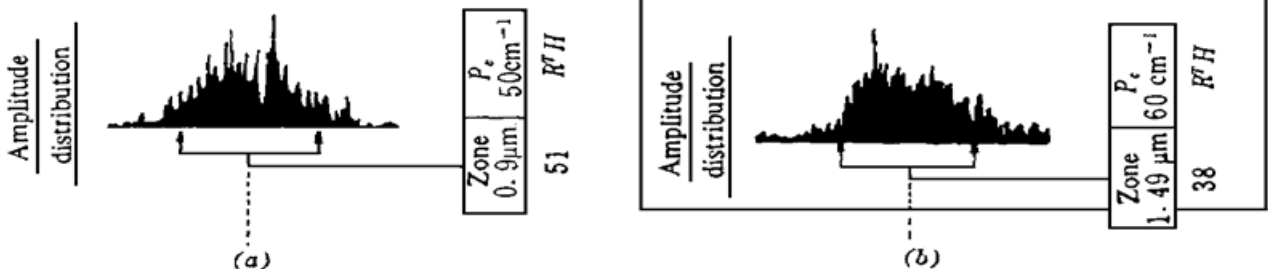


图 5 起伏幅度直方图。(a) 高斯分布; (b) 负指数分布
Fig. 5 Histogram of surface height data
(a) showing Gaussian distribution; (b) showing negative exponential distribution

对起伏横向相关长度的控制达到了较满意的效果。例如 AZ-1350J 胶制作的 19[#] 样品, 控制 $\tau = 8.73 \mu\text{m}$, 测值为 $\tau = 9.3 \mu\text{m}$; 全息干版制作的 38[#] 样品, 控制 $\tau = 25.2 \mu\text{m}$, 测值为 $\tau = 19.1 \mu\text{m}$, 51[#] 样品, 控制 $\tau = 25.26 \mu\text{m}$, 测值为 $\tau = 20 \mu\text{m}$ 。误差主要来自激光束参数没有精确测量, 仅仅借用厂家提供的参数。起伏均方根 δ_h 的控制要困难一些, 因为它不仅与曝光量有关, 还与光刻胶的反差系数、显影时间及对光谱的敏感系数等都有关系, 但是相同的操作过程不难找出曝光量与 δ_h 的关系, 例如根据 13[#] 样品的 δ_h 来控制 17[#] 样品 $\delta_h = 0.5 \mu\text{m}$, 实测 17[#] 样品 $\delta_h = 0.581 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

用散斑曝光制作粗糙表面的方法是可行的, 可以控制表面起伏的统计分布方式、横向相关长度、均方根等主要参数。制作微电路用的光刻胶比普通全息干版更容易得到细密的粗糙表面。这些粗糙表面为深入研究表面散射机理提供了重要的实验手段。若采用 HeCd 激光器的紫外光谱作光源, 可以大大缩短曝光时间, 有利于提高控制精度。

致谢 作者对电子科技大学扫描电镜室和微电路制作实验室及成都量具刃具厂表面计量测试部的帮助表示衷心谢意。同时感谢王俊波教授为样品的制作提供了实验设备。

参 考 文 献

- 1 P. F. Gray. A method of forming optical diffusers of simple known statistical properties. *Optica Acta*, 1978, **25**(8) : 765~ 775
- 2 Josue Alvarez-Borrego, Amalia Martinez. Statistics of rough surfaces via remote sensing——An experiment. *J. Modern Opt.*, 1995, **42**(11) : 2347~ 2355
- 3 R. E. Luna, E. R. Mendez, Jun Q. Lu *et al.*. Enhanced backscattering due to total internal reflection at a dielectric-air interface. *J. Modern Opt.*, 1995, **42**(2) : 257~ 269
- 4 K. A. O'Donnell, E. R. Mendez. Experimental study of scattering from characterized random surfaces. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(7) : 1194~ 1205
- 5 E. R. Mendez, K. A. O'Donnell. Observation of depolarization and backscattering enhancement in light scattering from Gaussian random surfaces. *Opt. Commun.*, 1987, **61**(2) : 91~ 95
- 6 戚康男, 秦克诚, 程 路. 统计光学导论. 天津: 南开大学出版社, 1987
- 7 S. L. Norman, M. P. Singh. Spectral sensitivity and linearity of Shipley AZ-1350J photoresist. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(4) : 818~ 820

Theoretical and Experimental Study on Fabricating Rough Surfaces of Known Statistical Parameters

He Yi Wu Jian

(Research Institute of Applied Physics, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract A method of fabricating rough surfaces of known statistical parameters by exposing the photoresist to laser speckle patterns is analysed in this paper. A set of samples have been made successfully. These surfaces have a smoothly modulated profile which is amenable to the theoretical model of rough surface scattering. These specimens can also be used as phase screens.

Key words roughness, laser speckle, holography technology