

衍射光强取样分析法测定 划痕宽度: 理论部分

戴名奎 徐德衍

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘 要 在理论上分析了截面为矩形、三角形和余弦形的划痕的衍射花样的相似性, 并在此基础上提出了一种测定划痕宽度的衍射光强取样分析法。本文还就消除光阑衍射光及粗糙度散射光的干扰提出了行之有效的措施。

关键词 衍射光强分布, 实际宽度, 等效线宽。

1 引 言

疵病、表面粗糙度及面形偏差是光学元件质量检验的三大主要项目。随着现代光学技术, 尤其是高功率激光技术的发展, 对光学元件的加工与检验提出了近乎苛刻的要求。就检验而言, 近些年来, 国外一些人在标准制定及检测方法与技术研究方面做了不少新的工作^[1, 2]。划痕是光学元件疵病的一个重要方面。光学元件的划痕宽度一般在几分之一到几十微米之间。裸眼能分辨率的最小线宽大约是 $27.5 \mu\text{m}$ ^[3], 宽度小于 $3 \mu\text{m}$ 的划痕用 $3\times\sim 10\times$ 的放大镜观察已接近于分辨率极限。虽然显微成象法可以分辨小的划痕, 但限于小视场, 大大降低了其检验的范围和速度。另外, Baker 提出用等效线宽来对划痕的等级进行定标^[4], 但只是等效的划痕宽度, 它与实际宽度相差甚远。譬如, 等效线宽为 $2.5 \mu\text{m}$ 的划痕, 实际宽度可能是 $4 \mu\text{m}$, 也可能是 $8 \mu\text{m}$ 。

在研究了国外数十种划痕测量方法的基础上^[2, 5-7], 为适应划痕实际宽度的测量, 本文提出了矩形截面划痕的测量方法——衍射光强取样分析法。此方法将测量微观划痕宽度转化为测量宏观划痕衍射光强分布, 使得测量变得更为简便可靠。另外, 根据在划痕不是很深的情况下不同截面形状划痕的衍射花样的相似性及衍射光强分布与宽度的关系, 提出了用测量矩形截面划痕宽度的方法测量实际划痕宽度。

2 三种不同截面形状划痕的衍射花样

光学元件的划痕主要是引起位相变化, 而对振幅影响很小, 因此其透过率函数 $g(x)$ 可表示为

$$g(x) = \begin{cases} |x| \leq d & \begin{cases} \exp(i\Delta) & \text{矩形截面} \\ \exp[i\Delta(1 - |x|/d)] & \text{三角形截面} \\ \exp[i\Delta \cos(\pi x/2d)] & \text{余弦形截面} \end{cases} \\ D \geq |x| > d & 1 \\ |x| > D & 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Delta = (n - 1)2\pi h/\lambda$, d 为划痕半宽度, D 为光阑半宽度。

根据夫朗和费衍射理论, 划痕的衍射光强分布为

$$I(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-i2\pi f x) dx \right|^2 \quad (2)$$

三种截面的划痕的衍射花样如图 1 所示(忽略了非疵病散射光的影响)。图 1 中的三种截面的划痕的衍射花样在中心主光强部分非常相似, 用矩形截面的划痕的衍射光强分布去拟合另两种的情况如图 2 所示。

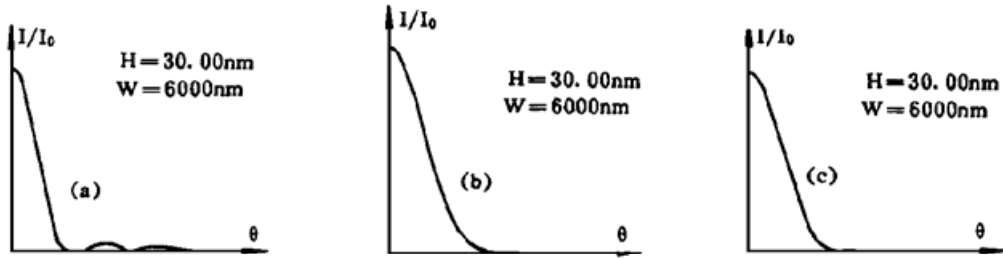


Fig. 1 Diffraction patterns of scratches with different cross section. (a) Rectangular; (b) Triangular; (c) Cosinoidal

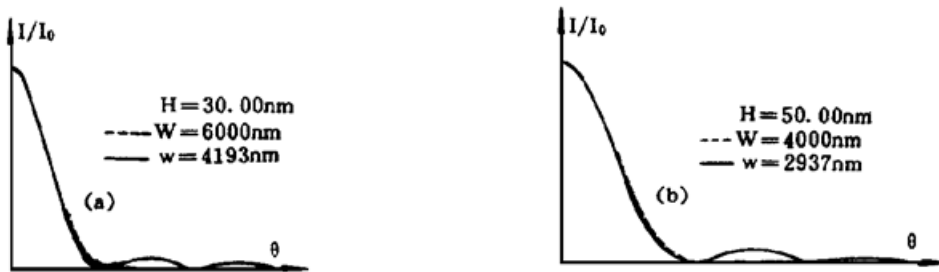


Fig. 2 The similar diffraction spectrum of scratches with different cross section. (a) Rectangular and triangular; (b) Rectangular and cosinoidal

图 2 中两对曲线在主光强部分近似重合, 因此可以用测量矩形截面划痕宽度的方法测量实际划痕宽度。

3 衍射光强取样分析法测定矩形截面划痕宽度

矩形截面划痕的衍射光复振幅分布为

$$\begin{aligned} G(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx \\ &= \left(\int_{-d}^d + \int_d^D \right) \exp(-i2\pi f x) dx + \int_{-d}^d \exp(i\Delta) \exp(-i2\pi f x) dx \\ &= \sin 2\pi f D/\pi f + [\exp(i\Delta) - 1] \sin 2\pi f d/\pi f \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式等号后第一项与划痕衍射无关, 为消除它的干扰, 可采用滤波成像照明的办法来解决, 其装置如图 3 所示。平行光经过宽度为 $2D$ 的光阑(x_1 面), 被焦距为 f_0 的透镜 L_1 会聚到焦面(x_2 面)上, 焦面上有一宽度为 $2b$ 的狭缝, 滤除空间频率为高频的光, 低频的光被焦距为 f_0 透镜 L_2 准直为平行光, 照到距它为 f_0 的样品(x_3 面)上, 通过样品的光被焦距为 f_1 的透镜 L_3 会聚到焦面(x_4 面)上。

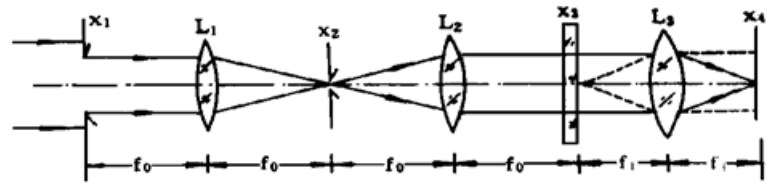


Fig. 3 Optical arrangement for illumination with filtered light

被测件(样品)前表面上的光复振幅分布为

$$g_0(x_3) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}_1(x_1) \exp(-i2\pi f' x_1) dx_1 \text{rect}_2(\mathcal{N}of') \exp(i2\pi f' x_3) df' \quad (4)$$

透过被测件(样品)后的光复振幅分布为

$$g(x_3) = \begin{cases} \exp(i\Delta) g_0(x_3) & |x_3| \leq d \\ g_0(x_3) & |x_3| > d \end{cases} \quad (5)$$

衍射光的复振幅分布为

$$\begin{aligned} G(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(x_3) \exp(-2\pi f x_3) dx_3 \\ &= \left(\int_{-\infty}^{-d} + \int_d^{\infty} \right) g_0(x_3) \exp(-2\pi f x_3) dx_3 + \int_{-d}^d \exp(i\Delta) g_0(x_3) \exp(-i2\pi f x_3) dx_3 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x_3) \exp(-i2\pi f x_3) dx_3 + [\exp(i\Delta) - 1] \int_{-d}^d g_0(x_3) \exp(-i2\pi f x_3) dx_3 \quad (6) \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} Q(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x_3) \exp(-i2\pi f x_3) dx_3 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}_1(x_1) \exp(-i2\pi f' x_1) dx_1 \right] \text{rect}_2(\mathcal{N}of') \right. \\ &\quad \left. \times \exp(i2\pi f' x_3) df' \right\} \exp(-i2\pi f x_3) dx_3 \\ &= \text{rect}_2(\mathcal{N}of) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}_1(x_1) \exp(-i2\pi f x_1) dx_1 \quad (7) \end{aligned}$$

其中

$$\text{rect}_2(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq b \\ 0 & |x| > b \end{cases} \quad (8)$$

则当 $\mathcal{N}of > b$, 即 $x_4 > \frac{f_1}{f_0} b$ 时, $Q(f) = 0$ 。又

$$g_0(x_3) = 2 \int_0^{\frac{b}{\mathcal{N}f_0}} \frac{\sin 2\pi f' D}{\pi f'} \cos 2\pi f' x_3 df' \quad (9)$$

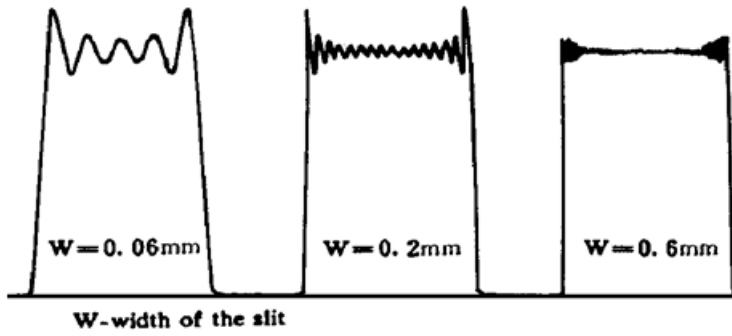


Fig. 4 Distribution of illumination intensity. $w \sim$ width of slit

它的分布如图 4 所示。

从图 4 中可以看出当 $|x_3| < D$ 时, $g_0(x_3)$ 的值波动很小, 姑且认为是保持一个常数 C ; 当 $|x_3| > D$ 时, $g_0(x_3)$ 近似为零。

则当 $x_4 > \frac{f_1}{f_0} b$ 时,

$$g(f) = C[\exp(i\Delta) - 1] \times \int_{-d}^d \exp(-i2\pi f x_3) dx_3 = C[\exp(i\Delta) - 1] \frac{\sin 2\pi f d}{\pi f} \quad (10)$$

衍射光强分布为

$$\begin{aligned} I(f) &= G(f) G^*(f) \\ &= C^2[(1 - \cos \Delta)^2 + \sin^2 \Delta] \left[\frac{\sin 2\pi f d}{\pi f} \right]^2 \\ &= 4C^2 \sin^2 \frac{\Delta}{2} \left[\frac{\sin 2\pi f d}{\pi f} \right]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

由(11)式可得, 划痕的衍射光强的第一零级在 $\theta = \arcsin(\lambda/2d)$ 的位置, 由于在实际中第一零级很难找, 或者就找不到, 为能测得最能代表划痕特性的实际宽度, 采用衍射光强取样分析法。步骤是这样的, 取两个位置 θ_1 和 θ_2 , 使得

$$\sin \theta_1 = \frac{1}{2} \sin \theta_2 \quad (12)$$

并对两处的光强 I_1 和 I_2 取样, 由(11)式可得

$$\frac{I_2}{I_1} = \cos^2 \frac{2\pi d \sin \theta_1}{\lambda} \quad (13)$$

则

$$d = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_1} \cos^{-1} \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \quad (14)$$

由于受到接收器的动态范围及光强的数字化转换位数的影响, 可能使 I_2 很接近于 I_1 而降低了灵敏度, 为提高灵敏度可采用三个或三个以上的位置取样, 并使得

$$\sin \theta_1 = \frac{1}{2} \sin \theta_2 = \frac{1}{4} \sin \theta_3 = \dots = \frac{1}{2^n} \sin \theta_n = \dots \quad (15)$$

因此有

$$d = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_1} \cos^{-1} \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{I_3}{I_2}} = \dots = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_{n-1}} \cos^{-1} \sqrt{\frac{I_n}{I_{n-1}}} = \dots \quad (16)$$

这样一来, 就可以保持在一个较大的宽度范围内使得 I_n/I_{n-1} 中至少有一个在 0.2~0.8 之间, 灵敏度因此得以保证。本方法可用来测定实际宽度为 $1 \mu\text{m} \sim 80 \mu\text{m}$ 的划痕, 在常用的 $2 \mu\text{m} \sim 40 \mu\text{m}$ 的范围内, 误差将小于 $\pm 8\%$ 。

4 划痕的衍射光强的采样及处理

实际划痕的衍射光总是叠加在粗糙度散射光上, 划痕愈浅愈窄, 受粗糙度的影响也就愈大。为排除干扰特采用如图 5 所示的取样办法。一般光学元件的表面轮廓的微观不平度分布是各向同性的^[8], 因此其散射光强是旋转对称的。对谱面光强作环形采样如图 5 所示, 所得采样结果如图 6 所示。考虑到接收器象素的大小和划痕的可能弯曲, 以光强积分取代光强计算划痕宽度。

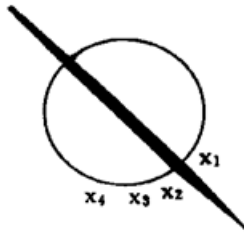


Fig. 5 Schematic of circular sampling

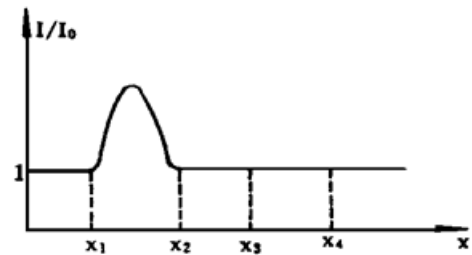


Fig. 6 Distribution of sampled intensity

如图 6 所示, 区间 $[x_1, x_2]$ 中含有划痕的衍射光, 对该区间光强积分有

$$E = \int_{x_1}^{x_2} I(x) dx \quad (17)$$

区间 $[x_3, x_4]$ 中基本不含有划痕的衍射光, 其光强积分为

$$E_0 = \int_{x_3}^{x_4} I(x) dx \quad (18)$$

则在该环带上由划痕的衍射产生的光强积分为

$$E_{SC} = 2 \left(E - E_0 \frac{x_2 - x_1}{x_4 - x_3} \right) \quad (19)$$

此时划痕的宽度计算公式改写为

$$d = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_1} \cos^{-1} \sqrt{\frac{E_{SC2}}{E_{SC1}}} = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{E_{SC3}}{E_{SC2}}} = \dots = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_{n-1}} \cos^{-1} \sqrt{\frac{E_{SCn}}{E_{SCn-1}}} = \dots \quad (20)$$

结 论 本文从理论上分析了矩形截面划痕的衍射光强分布特点, 提出了衍射光强取样分析法。虽然实际划痕并非都是矩形截面, 但其衍射光强分布与矩形截面划痕的非常相似, 完全可以用衍射光强取样分析法测定其宽度。需要指出的是用该方法得出的宽度是等效的矩形截面划痕宽度, 也就是衍射光强分布与之相似的矩形截面划痕宽度, 而非通常所说的以散射光量的多少为依据的等效宽度^[4], 也非实际宽度, 但与实际宽度接近, 对于三角形截面划痕, 其实际宽度大约是测量值的 1.42 倍, 对于余弦形截面的划痕大约为 1.33 倍。

文中提及的光阑衍射光和粗糙度散射光的干扰, 并拿出消除干扰的确实可行的办法, 为提高该方法的测量精度铺平了道路。

衍射光强取样分析法测量划痕宽度将能大大减少计算量, 测量效率也随之提高, 并且还能保证颇高的精度。实验工作正在进行中, 并将另文发表。

参 考 文 献

- [1] 徐德衍, 林尊琪, 光学表面粗糙度的进展与方向. 光学仪器, 1996, **18**(1) : 32~ 37, **18**(2) : 35~ 41
- [2] 戴名奎, 徐德衍, 光学元件的疵病检验与研究现状. 光学仪器, 1996, **18**(3) : 33~ 36, **18**(4) : 32~ 39
- [3] Matt Young, Eric G. Johnson, Jr. Richard Goldgraben, Tunable scratch standards. *Proc. SPIE*, 1985, **525** : 70~ 77
- [4] L. R. Baker, On-machine measurement of roughness, waviness and flaws. *Proc. SPIE*, 1992, **1333** : 248~ 256
- [5] Matt Young, Objective measurement and characterization of scratch standards. *Proc. SPIE*, 1982, **362** : 82~ 92
- [6] Horst Truckenbrodt Angela Duparré and Uwe Schuhmann, Roughness and defect characterization of optical surfaces by light scattering measurements. *Proc. SPIE*, 1992, **1781** : 139~ 151
- [7] L. R. Baker, Thresholds for surface imperfections. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(8) : 2800~ 2802
- [8] J. C. Stover, *Optical Scattering: Measurement and Analysis*. New York, McGraw-Hill, 1990 : 67~ 75

Measuring Scratch Width by Sampling Diffracted-Light Intensity: Theory

Dai Mingkui Xu Deyan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 9 May 1996; revised 2 July 1996)

Abstract The similarity of scratches diffraction patterns with different cross section, rectangular, triangular and cosinoidal, is discussed. A new method, sampling the diffracted-light, to measure the scratch width is proposed.

Key words diffraction pattern, real width, line-equivalent width.