

极小刻划间隙下的衍射光强度变化规律分析

付永启 赵兴国

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 讨论了极小刻划间隙下的衍射场光强度分布规律,并以单缝为例分析了当缝宽与波长改变时,相对光强度变化规律,补充和完善了使用普通平行光照明系统时的接近式光刻衍射场理论。

关键词:极小刻划间隙;衍射;相对光强度

1 引言

接近式光刻的衍射场光强度是随刻划间隙的不同而变化的,同时它对曝光后的刻线质量有很大影响,因而讨论不同间隙下的衍射场变化规律对使用普通平行光照明系统的接近式光刻(使用复眼柱面透镜时的光强度随刻划间隙不同变化规律与此不同,详见文献[1])具有重要意义。刻划间隙变化范围可分为两类,一类是极小间隙(与照明光源波长相当)的变化,另一类是远大于照明光源波长的间隙。这两类刻划间隙下的衍射光强度变化规律是不同的,本文着重讨论前者,对于后者另有文章详述。

2 极小刻划间隙下的光强度分布

由于间隙与照明光源波长相当,标量衍射理论中的基尔霍夫边界条件已不满足,基尔霍夫衍射公式亦不再适用。考虑到实际光刻线条长度(线长远大于线宽)及数学推导的简化,只讨论二维($X-Z$)情况下的衍射。

按照 Massey 理论^[3],此时的入射光经衍射后可分离为两类:均匀波和非均匀波。由 Helmholtz 方程及角谱理论可知^[4]。

$$U(x, z) = U_h(x, z) + U_i(x, z) \quad (1)$$

式中

$U(x, z)$ ——总光场分布函数;

$U_h(x, z)$ ——均匀波函数;

$U_i(x, z)$ ——非均匀波函数

在 $Z > 0$ 的半空间, $U_h(x, z), U_i(x, z)$ 分别为

$$U_h(x, z) = \int_{|u_x| < 1} A(u_x) e^{ik_x \cdot x} e^{ik_z(1-u_x^2)^{1/2}} du_x \quad (2)$$

$$U_i(x, z) = \int_{|u_x| > 1} A(u_x) e^{ik_x \cdot x} e^{-ik_z(u_x^2-1)^{1/2}} du_x \quad (3)$$

衍射后迭加的非均匀平面波随刻划间隙 z 增大呈指数规律衰减。均匀波和非均匀波分别满足 Helmholtz 方程。对 $z=0$ 处的波函数 $U(x, 0)$ 进行傅立叶变换得幅值函数 $A(u_x)$

$$A(u_x) = \frac{k}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(x', 0) e^{-ik_x x'} dx' \quad (4)$$

由光强度定义

$$I(x, z) = |U(x, z)|^2 \quad (5)$$

可得

$$I(x, z) = I_h(x, z) + I_i(x, z) + I_{hi}(x, z) \quad (6)$$

其中

$$I_h(x, z) = |U_h(x, z)|^2 \quad (7)$$

$$I_i(x, z) = |U_i(x, z)|^2 \quad (8)$$

$I_{hi}(x, z)$ 由衍射后的均匀波和非均匀波相干涉而产生, 可表达如下

$$I_{hi}(x, z) = U_h^*(x, z) U_i(x, z) + U_h(x, z) U_i^*(x, z) \quad (9)$$

定义沿 x 方向分布的总光强如下

$$I_{tot}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, z) dx \quad (10)$$

$$I_{tot}^{(h)}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} I_h(x, z) dx \quad (11)$$

$$I_{tot}^{(i)}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} I_i(x, z) dx \quad (12)$$

$$I_{tot}^{(hi)}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{hi}(x, z) dx \quad (13)$$

由卷积性质可知, 式(13)中积分结果为零, 故有

$$I_{tot}(z) = I_{tot}^{(h)}(z) + I_{tot}^{(i)}(z) \quad (14)$$

$$I_{tot}^{(h)}(z) = \frac{2\pi}{k} \int_{|u_x| < 1} |A(U_x)|^2 du_x \quad (15)$$

$$I_{tot}^{(i)}(z) = \frac{2\pi}{k} \int_{|u_x| > 1} |A(U_x)|^2 e^{-2kz(u_x^2-1)^{1/2}} du_x \quad (16)$$

由式(15)可见, 均匀波总光强完全独立于刻划间隙 z (即与 z 无关), 非均匀波总光强由于存在衰减因子将随 z 增大而很快衰减。

3 单缝的衍射光强度分布

以单缝为例, 设缝宽为 d (见图 1), 在衍射屏 ($z=0$) 处波函数为

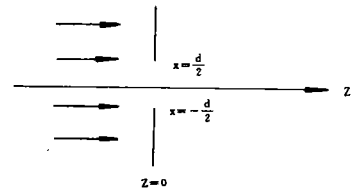


图 1 宽度 d 的狭缝经平面入射光照明
Fig. 1 illuminated by parallel light through slit of width d

$$U(x,0) = \begin{cases} U_{inc}(x,0) & -\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

对于通常的入射光波

$$U_{inc}(x,0) = K (\text{常数})$$

为分析方便起见,取 $K=1$,则有波函数及总光强度如下:

$$U_h(x,0) = \frac{1}{\pi} \{ S[k(x + \frac{d}{2})] - S[k(x - \frac{d}{2})] \} \quad (18)$$

$$U_i(x,0) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \{ \pi - S[k(x + \frac{d}{2})] + S[k(x - \frac{d}{2})] \} & -\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2} \\ -\frac{1}{\pi} \{ S[k(x + \frac{d}{2})] - S[k(x - \frac{d}{2})] \} & \text{其它} \end{cases} \quad (19)$$

$$I_{tot}^{(h)} = I_{tot}(0) \left[\frac{2}{\pi} S(kd) - \frac{4}{\pi kd} \sin^2\left(\frac{kd}{2}\right) \right] \quad (20)$$

$$I_{tot}^{(i)} = I_{tot}(0) \left[1 - \frac{2}{\pi} S(kd) + \frac{4}{\pi kd} \sin^2\left(\frac{kd}{2}\right) \right] \quad (21)$$

$$S(a) = \int_0^a \frac{\sin t}{t} dt \quad (22)$$

相对总光强随缝宽 d 及刻划间隙 z 变化情况如图 2(a)、(b) 所示。

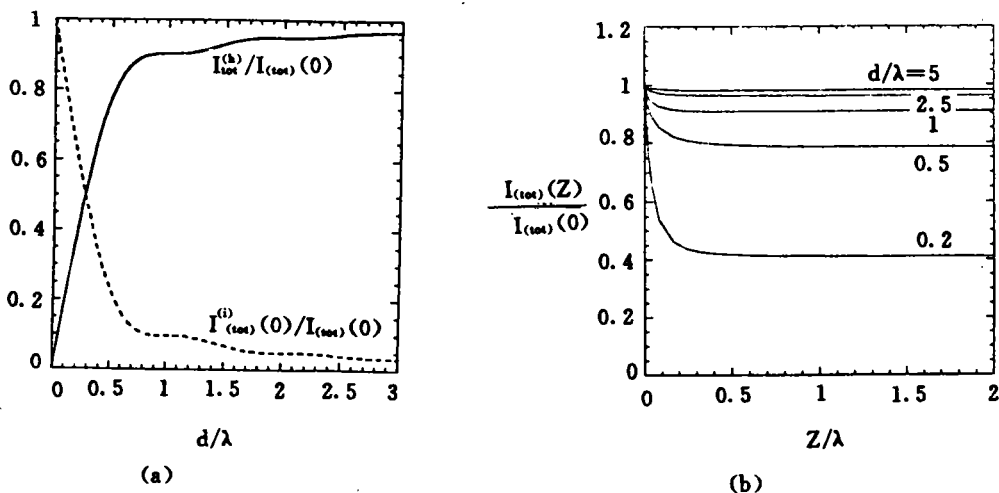


图 2 相对总光强随 d, z 变化关系图

Fig. 2 scheme of relative intensity changing with d, z

由图 2(a) 可看出, 均匀波相对光强度随 d 增大呈指数上升, 而非均匀波则呈指数衰减, 当 $d = \lambda$ 时二者趋于稳定, 此时均匀波起主要作用; 当 $d > 1.5\lambda$ 时, 可近似认为只有均匀波场存在。

由图 2(b) 可知, 在 $z = 0 \sim 0.5\lambda$ 区段, 相对光强度很快衰减至最小, 然后随 z 增大呈稳定不变状态, 此刻缝宽 d 越大, 总相对光强度就越大。当 $d = 5\lambda$ 时, 相对光强近似为 1。

4 结 结

本文从理论上详细分析了极小刻划间隙下使用普通平行光照明系统的接近式光刻衍射场光强度随 z 改变时的变化规律,并以单缝为例给出了相对光强度随缝宽 d 的不同而呈指数衰减的规律,进一步找出相对光强度稳定时对应的间隙范围。

应当指出,在实际的接近式光刻中,与波长相当的刻划间隙是很难调出的,通常都希望在尽量大的间隙下刻划。本文的理论分析旨在从理论上揭示极小刻划间隙下的衍射光强度变化规律,以完善接近式光刻的衍射理论。

参 考 文 献

- [1] 郝沛明,利用复眼柱面透镜的非接触光刻系统. 光学学报,1985,5(8),717—723
- [2] 严瑛白,应用物理光学,机械工业出版社,1990:214—280
- [3] G. A. Massey, Microscopy and Pattern Generation with Scanned Evanescent Waves. Appl. Opt., 23, 1984, 23: 658—660
- [4] E. Betzig and J. K. Trantman, Near-field optics: Microscopy, Spectroscopy, and Surface Modification beyond the Diffraction Limit. Science, 1992, 257: 189—195.
- [5] Marek W. Kowarz, Homogeneous and Evanescent Contributions in Scalar Near-field diffraction. Applied Optics, 1995, 34: 3055-3063

Analysis of Diffraction Intensity Changing Ruling under Extreme Small Lithography Gap

Fu Yongqi, Zhao Xingguo

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022)

Abstract

Distribution rule of diffraction intensity under extreme small lithographic gap was discussed in this paper. The relative intensity changing rule was analysed when slit width and wavelength changed using single slit as example, complemented the diffraction theory of proximity photolithography using ordinary parallel light illumination system.

Key words: Extreme small lithographic gap, Diffraction intensity

付永启 男,生于1967年5月20日。1988年毕业于吉林工业大学农机工程系,获工学学士学位;1994年元月毕业于长春光学精密机械学院精密机械工程系,获工学硕士学位;现为中国科学院长春光学精密机械研究所机械制造专业博士研究生,研究方向为精密光学刻划,目前正在从事动态目标盘柱面图形光学刻划的研究,已撰写论文14篇。