

文章编号:1000-1972(1999)02-0054-03

平面波入射时二元光学型光栅的衍射场分布

蔡祥宝

(南京邮电学院 基础课部,江苏 南京 210003)

摘要:应用标量衍射理论分析了平面波入射时二元光学型光栅的衍射场分布规律,并进行了数值分析和实验验证。

关键词:二元光学;夫琅和费衍射;衍射效率

中图分类号:O43

文献标识码:A

1 引言

二元光学是基于光波衍射理论发展起来的一门具有应用前景的新学科,它能够实现许多传统光学元件难以达到的目的和功能。用电子计算机设计和微电子工艺制作的二元光学元件是一种纯位相衍射光学元件,为了获得较高的衍射效率将其制成多位相阶数的浮雕结构,一般使用 n 块模版得到 2^n 个位相台阶数。在实际使用中,需要知道二元光学元件的衍射效率和衍射场分布。本文应用标量衍射理论分析了平面波垂直入射时,周期性结构二元光学型光栅的衍射场分布和衍射效率,得到了更加普遍适用的公式,这对实际工作中更好地利用二元光学型光栅是十分有益的。在衍射场的表达式中,除了共有的振幅因子和传播位相因子外,还包含与场分布相关的两个单缝衍射因子和两个多光束干涉因子。两个衍射因子中一个与缝宽 b 相对应,另一个与 y 方向通光宽度 L_y 相对应;两个干涉因子中一个与周期内 N 条光束相对应,另一个与 x 方向通光宽度 L_x 内总光束数 $2M$ 相对应。本文对理论结果进行了数值分析,并对 $N=2$ 和 4 的二元光学型光栅的衍射场进行了测量,数值分析结果与实验结果取得了很好的一致。

2 原理

本文研究的二元光学型光栅是一种具有周期结构的衍射光学元件,每一个周期单元由 $N=2^n$ 个台阶构成,各个台阶所产生的位相差依次为 $1 \cdot 2\pi/N, 2 \cdot 2\pi/N, \dots, (N-1) \cdot 2\pi/N, 2\pi$, 实质是一种位相光栅。其结构如图 1 所示。

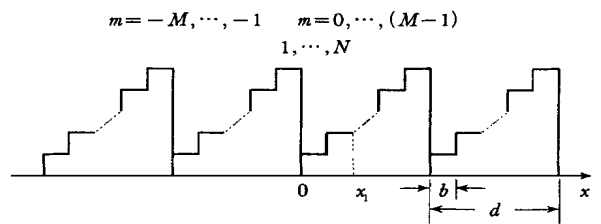


图 1 二元光学型光栅结构图

对图 1 所示的周期性结构阶梯型二元位相光栅,其透过率函数可设为

$$P(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{L_y}\right) P_1(x_1, y_1) \quad (1a)$$

式中, L_x, L_y 分别为 x, y 方向的通光宽度, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数, $P_1(x_1, y_1)$ 为

$$P_1(x_1, y_1) = \sum_{m=-M}^{M-1} \sum_{n=1}^N \text{rect}\left[\frac{x_1 - md - (n-1/2)b}{b}\right] e^{in^2 \frac{2\pi}{N} x_1} \quad (1b)$$

由标量衍射理论,当一单位振幅的单色平面波 ($(x_1, y_1, z) = 1$) 垂直入射于二元光学型光栅时(如图 2 所示),衍射波为

$$(x_0, y_0, z) = \frac{\exp(ikz)}{iz} \sum_{\dots} (x_1, y_1, z=0) P(x_1, y_1) \cdot$$

$$\exp\left\{i \frac{k}{2z} [(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (2a)$$

若考虑夫琅和费衍射,则

$$\begin{aligned} & \Psi(x_0, y_0, z) = \\ & \frac{\exp(ikz)}{iz} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right] \cdot P(x_1, y_1) \cdot \\ & \exp\left[-\frac{ik}{z}(x_0 x_1 + y_0 y_1)\right] dx_1 dy_1 \end{aligned} \quad (2b)$$

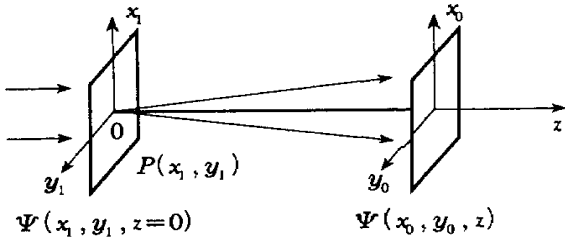


图 2 平面波垂直入射于二元光学型光栅的光路图

将式(1a)、(1b)、(2a)代入式(2b),考虑到 L_x 内共包含 $2M$ 个周期单元,积分后得

$$\begin{aligned} & \Psi(x_0, y_0, z) = \\ & L_y b \frac{\exp(ikz)}{iz} \exp\left\{i\left[\frac{k}{2z}(x_0^2 + y_0^2) + \left(\frac{1}{N} + 1\right)z\right]\right\} \cdot \\ & \frac{\sin x}{x} \frac{\sin y}{y} \frac{\sin(2M \frac{2M}{2M})}{\sin 2M} \frac{\sin(N \frac{N}{N})}{\sin N} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $x = \frac{x_0 b}{z}$, $y = \frac{y_0 L_y}{z}$, $2M = \frac{x_0 d}{z}$, $N = \left[1 - \frac{x_0 d}{z}\right] \cdot \frac{1}{N}$ 。式(3)即为衍射场表达式。可以看出,衍射场中除了包含有 x 方向透光宽度 b 引起的单缝衍射因子和台阶数 N 引起的 N 条光束干涉因子外,还包含有 y 方向透光宽度 L_y 引起的单缝衍射因子和 x 方向总透光数 $2M$ 引起的 $2M$ 条光束干涉因子,后者在一般的分析中常常被忽略了^[1]。以上得到的式(3)是衍射场更加普遍的表达式。由式(3)可以分别求出衍射场光强分布和衍射效率为:

$$\begin{aligned} I(x_0, y_0, z) &= \left(\frac{L_y b}{z}\right)^2 \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \left(\frac{\sin y}{y}\right)^2 \cdot \\ & \left[\frac{\sin(2M \frac{2M}{2M})}{\sin 2M}\right]^2 \left[\frac{\sin(N \frac{N}{N})}{\sin N}\right]^2 \quad (4) \\ &= \left(\frac{1}{2MN}\right)^2 \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \left(\frac{\sin y}{y}\right)^2 \cdot \\ & \left[\frac{\sin(2M \frac{2M}{2M})}{\sin 2M}\right]^2 \left[\frac{\sin(N \frac{N}{N})}{\sin N}\right]^2 \end{aligned} \quad (5a)$$

式(5a)中,当 $\frac{x_0 d}{z} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时,分别对应于 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 级衍射效率。不难看出,当满足条件

$$\begin{aligned} & \sin x = x_0 / z \quad (x \text{ 为衍射角}) \text{ 时,利用光栅方程 } d \sin x \\ & = k \quad (k \text{ 为级次}), \text{ 可得 } \frac{x_0 d}{z} = k, \quad x = \frac{k}{N}, \quad 2M = \\ & k, \quad N = (1 - k) \frac{1}{N}。 \text{ 于是,衍射效率又可表示为} \\ & \eta_k = \left(\frac{1}{2M}\right)^2 \left[\frac{\sin(k/N)}{k}\right]^2 \left(\frac{\sin y}{y}\right)^2 \cdot \\ & \left[\frac{\sin(2Mk)}{\sin(k)}\right]^2 \left\{\frac{\sin[(k-1)/N]}{\sin[(k-1)/N]}\right\}^2 \end{aligned} \quad (5b)$$

由式(4)可进一步求出光强极大值处谱线的角宽度为

$$\Delta x = \frac{1}{2M d \cos x} \quad (6)$$

3 数值分析与实验结果

由式(4)可知,衍射场光强在 x 轴方向的分布主要由两个干涉因子决定,单缝衍射因子对光强起调制作用。由干涉因子 $\left[\frac{\sin(N/N)}{\sin N}\right]^2$ 决定的极大值位置为 $\frac{x_0 d}{z} = 1 \pm m_1 N, m_1 = 0, 1, 2, \dots$; 极小值位置为 $\frac{x_0 d}{z} = 1 \pm m_2, m_2 = 1, 2, \dots, m_2 \neq N, 2N, \dots$ 。由干涉因子 $\left[\frac{\sin(2M \frac{2M}{2M})}{\sin 2M}\right]^2$ 决定的极大值位置为 $\frac{x_0 d}{z} = \pm m_3, m_3 = 0, 1, 2, \dots$; 极小值位置为 $\frac{x_0 d}{z} = \frac{\pm m_4}{2M}, m_4 = 1, 2, \dots, m_4 \neq 2M, 4M, \dots$ 。由单缝衍射因子决定的极小值位置为 $\frac{x_0 b}{z} = \pm 1, \pm 2, \dots$, 而 $b = d/N$, 这就等价于 $\frac{x_0 d}{z} = \pm N, \pm 2N, \dots$, 实际上这些极小值位置全都包含在干涉极小值位置上了。当 $\pm m_3 = 1 \pm m_1 N$ 时,两个干涉因子的极大值位置重合,形成总场的极大值,与总场极大值相邻的零点的角宽度决定了各极大值的角宽度, M 越大,角宽度越小,光强分布曲线的峰越尖锐。根据式(4)分别对 $N = 2, 4, 8, 16$ 的情况进行数值模拟,结果见图 3。

衍射场在 y 轴方向的分布则由因子 $\left(\frac{\sin y}{y}\right)^2$ 决定,实质是缝宽为 L_y 的单缝衍射。极小值位置为 $\frac{y_0 d}{z} = \frac{\pm m_5}{2M}, m_5 = 1, 2, 3, \dots$, 数值模拟结果见图 4。

图 5 给出了二元光学型光栅衍射场分布的实验结果。

比较图3和图5可以看出,实验结果中各级极大位置与数值计算结果基本一致。由于器件制造过程误差的存在和实际光波不是严格的平面波,使偶级次光强不为零,对衍射场各级的光能量也产生了影响,1级的衍射效率有所降低。

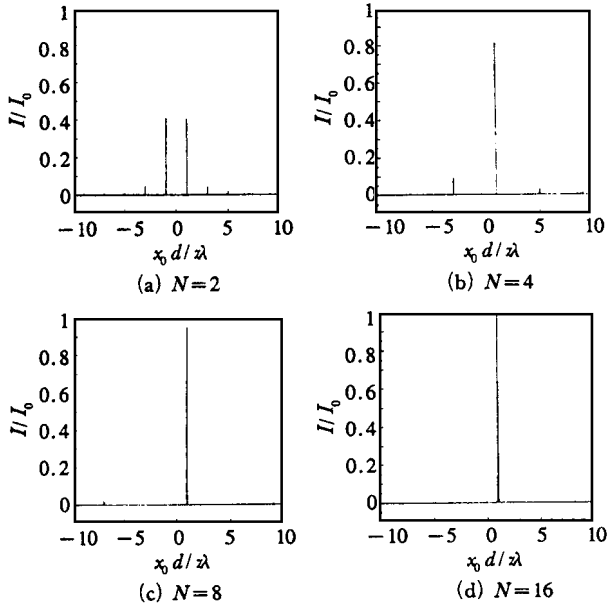


图3 x方向衍射场分布数值计算结果
($z = 1.0 \text{ m}$, $b = 5 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,
 $L_x = L_y = 2.0 \text{ mm}$, $y_0 = 0$)

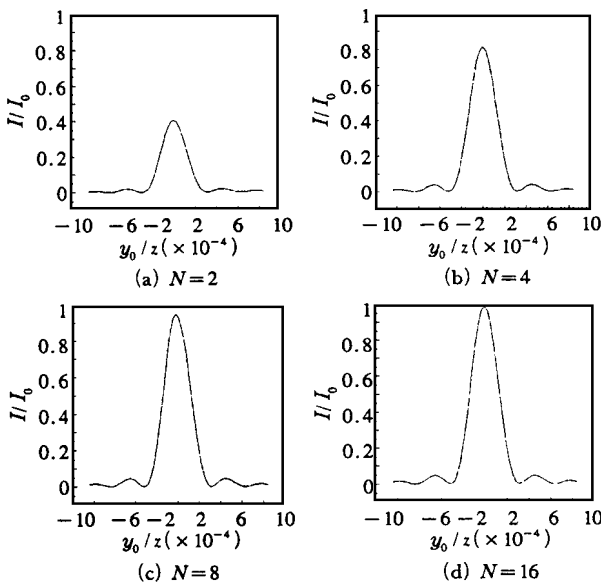


图4 y方向衍射场分布数值计算结果
($z = 1.0 \text{ m}$, $b = 5 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,
 $L_x = L_y = 2.0 \text{ mm}$, $\frac{x_0 d}{z} = 1$)

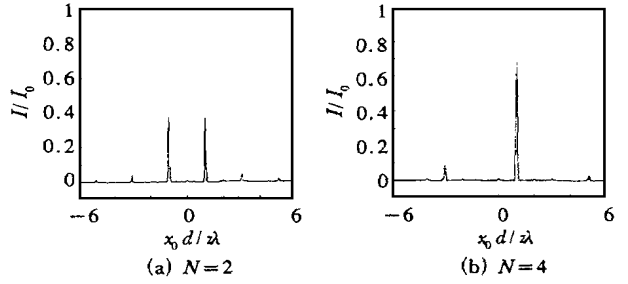


图5 实验结果($z = 1.0 \text{ m}$, $b = 5 \mu\text{m}$,
 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $L_x = L_y = 2.0 \text{ mm}$, $y_0 = 0$)

4 结论

本文根据标量衍射理论分析了平面波垂直入射时二元光学型光栅的衍射场分布规律,得到了衍射场分布和衍射效率的解析表达式。从结果中可以看出,衍射场分布和衍射效率与衍射级次 k ($k = \frac{x_0 d}{z}$) 和台阶数 N 有关,衍射场光强在 x 轴向极大值位置主要由因子 $\left[\frac{\sin(N \frac{x_0 d}{z})}{\sin \frac{x_0 d}{z}} \right]^2$ 决定,其角度宽度由因子 $\left[\frac{\sin(2M \frac{x_0 d}{z})}{\sin 2M \frac{x_0 d}{z}} \right]^2$ 决定,衍射场光强在 y 轴方向的分布由单缝衍射因子 $\left[\frac{\sin y}{y} \right]^2$ 决定。数值模拟结果与实验结果基本一致。从实验中知道,为了更好地发挥二元光学元件的作用,获得较高的1级衍射效率,必须提高工艺水平,减少器件制造过程中的误差。

参考文献:

[1] 周进, 韩良恺, 高文琦等. 二元光学元件各级光强的分布规律和衍射效率[J]. 中国激光, 1996, 23(5): 449~452.
[2] GHATAK A K, THYAGARAJAN K. Contemporary optics[M]. New York: Plenum Press, 1978.

作者简介:



蔡祥宝 1957年生,江苏镇江人。南京邮电学院基础课部物理教研室主任,副教授。1982年毕业于南京邮电学院物理师资班,1987年毕业于南京邮电学院通信与电子系统专业研究生班。目前主要从事“大学物理”、“大学物理实验”等课程的教学工作。

(下转第63页)

Distribution of Death Point of Super-Brownian Motion

TANG Jia-shan

Department of Basic Courses, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, 210003, Nanjing, PRC

Abstract : This paper presents the distribution of death point of the super-Brownian motion with branching mechanism given by $(z) = z^2$.

Key words : Super-Brownian motion ; Death point ; Distribution

(上接第 56 页)

Diffraction Field Distribution in a Binary Optical Element Illuminated by Planar Wave

CAI Xiang-bao

Department of Basic Courses, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, 210003, Nanjing, PRC

Abstract : In this paper, the diffraction field distribution in a binary optical element illuminated by planar wave is analyzed by using scalar wave diffraction theory. Some numerical results have been obtained. The theoretical analysis has been proven successful in experimental observations.

Key words : Binary optics ; Fraunhofer diffraction ; Diffraction efficiency

(上接第 60 页)

Application of Asphere in the Optical Design of the Pin-hole Pickup Objectives with Broad Field

WAN Jing, YANG Mao-tian

Department of Basic Courses, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, 210003, Nanjing, PRC

Abstract : As the distortion of the broad field optical system is very serious and the composition is not symmetrical, the field of the CCD pinhole objectives is usually no more than 70. In this paper, by the aspherical optical design, this kind of lens has not only the more than 80 field but also the small distortion. It is also proved that the aspherical optical design is superiors to the spherical optical design.

Key words : CCD pick-up cameras ; Aberration ; Distortion ; Aspherical optical design