

# 变频全息光栅的研究及其应用\*

余建国 裴文 徐大雄

(北京邮电大学应用科学技术系, 北京 100088)

**摘 要** 提出了用变频全息光栅实现参物光束夹角可调的方法, 从理论上分析了它的结构特征, 设计了制作变频全息光栅的三种实验装置, 证明了变频全息光栅与透镜结合能产生可变夹角的参物光和大小可变全息光斑。

**关键词** 变频全息光栅, 参物夹角, 全息光斑。

## 1 引 言

全息光栅是一种重要的分光元件, 近年来在光全息、光通信、光互连、光交换、光计算等方面获得了广泛的应用。与刻划光栅相比, 它具有没有鬼线、杂散光少、分辨率高, 适应光谱范围宽、有效孔径大、衍射效率高等特点。变频全息光栅与非变频全息光栅相比具有更大的适用范围。在一块光栅里能分出多种角度的光束, 与镀膜的平板玻璃分束器相比, 光路更简单, 使用更方便<sup>[1]</sup>。本文着重讨论了变频光栅在计算机光刻全息中的应用。计算机光刻全息图是由许许多多像素点组成的。全息图的每一个像素点都是用双光束相干逐点刻出来的小光栅。这些光栅的方向和频率受计算机程序控制。随所刻图像的像素值而变化。在放大镜下观察是一个个的小光斑, 光斑的直径很小, 全息图的分辩率可达  $10 \text{ mm}^{-1}$ , 为了实现动态和彩色, 要求对两光束的夹角进行编码。如果提高编码速度, 就可提高光刻速度。这就要求光学元件在很短的时间里分出多种角度, 这样变频全息光栅就成为了比较理想的分光元件<sup>[2]</sup>。

## 2 变频全息光栅的设计

变频全息光栅的特点就是光栅的条纹间距是可变的。根据需要可以做出各种形状, 各种功能的全息光栅。本文主要研究低频透射式光栅的应用, 因此, 只讨论小角度透射式变频全息光栅的设计。

图 1 是利用迈克尔逊干涉仪制作圆环形变频全息光栅的装置。全息光栅是内疏外密的一簇圆环。迈克尔逊干涉仪的一臂用一凹球面反射镜代替平面镜, 以产生点光源。这种光栅对称性好, 便于切割、安装、定位。

用凹柱面镜替代如图 1 所示的凹球面镜, 即为用柱面波与一参考平面波制作变频直线形

\* 博士点基金资助课题。

收稿日期: 1995 年 11 月 17 日; 收到修改稿日期: 1996 年 4 月 4 日

光栅的装置。光栅是中间疏, 两边密的平行光栅, 这种光栅以中心线对称, 便于切割, 安装, 定位。

图 2 是利用马赫-陈德尔干涉仪和其他一些光学元件产生一平面波与一球面波拍摄变频圆形光栅的装置。光栅中间疏边缘密中心对称, 只要有一个大口径的半透半反射镜就容易实现。要改变光栅的频率, 只要改变干板到  $L_1$  之间的距离即可。

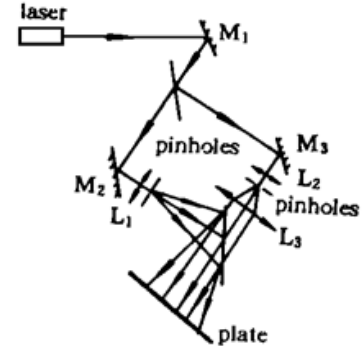
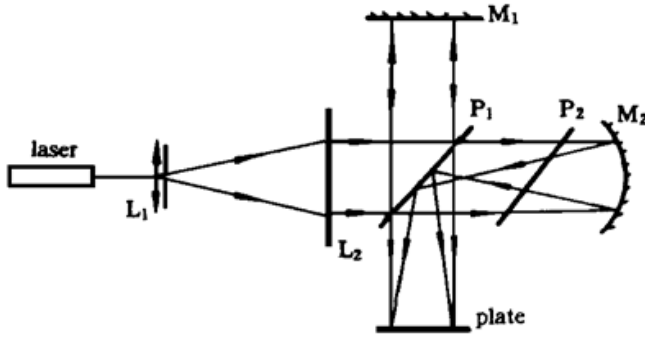


Fig. 1 Schematic of making circular converter holographic grating

Fig. 2 Schematic of making converter holographic with Mach-Zehnder device

### 3 变频全息光栅的结构特征

制作变频全息光栅的原理如图 3 所示。设球面波和平面波在  $z = 0$  的平面里的场分布分别为<sup>[3]</sup>:

$$u_1 = \frac{A_1}{z_1} \exp \left[ -\frac{ik}{2z_1} (x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y) \right] \quad (1)$$

$$u_2 = A_2 \exp (ikx \sin \alpha) \quad (2)$$

(2) 式中  $\alpha$  表示平面波方向与  $z$  轴的夹角。球面波  $u_1(x_1, y_1, z_1)$  和平面波  $u_2$  是相干光波。它们在  $Z = 0$  的平面上相干涉, 现讨论在该平面上任一点  $p(x, y, 0)$  的光强。

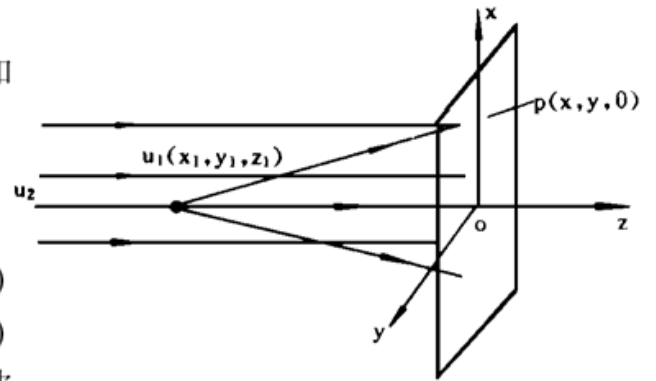


Fig. 3 General schematic of making converter holographic grating

$$\begin{aligned} \therefore I &= |u_1 + u_2|^2 \\ &= \frac{A_1^2}{z_1^2} + A_2^2 + \frac{2A_1A_2}{z_1} \cos \left[ \frac{k}{2z_1} (x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y) - kx \sin \alpha \right] \end{aligned} \quad (3)$$

当  $\alpha = 0$  时,  $x \sin \alpha = 0$ 。因此, 在  $x, y$  方向记录的强度图样的空间频率为:

$$f_x = \frac{d}{dx} \left[ \frac{k}{2z_1} (x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y) \right] \quad (4)$$

$$f_y = \frac{d}{dy} \left[ \frac{k}{2z_1} (x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y) \right] \quad (5)$$

设:  $x_1 = y_1 = 0$ , 则有:

$$f_x = x/\lambda z_1, \quad f_y = y/\lambda z_1 \quad (6)$$

由上式可知: 强度图样的空间频率随  $x, y$  的增大而增大,  $z_1$  越大, 条纹的空间频率越小。若点源产生柱面波, 则:  $f_x = 0$ 。

## 4 变频全息光栅的衍射效率

### 4.1 振幅型变频全息光栅的衍射效率

正弦型振幅全息光栅的透射系数为<sup>[4]</sup>:

$$\tau_H = \tau_0 + \tau_1 \cos 2\pi f_x x = \tau_0 + (\tau_1/2) [\exp(j2\pi f_x x) + \exp(-j2\pi f_x x)] \quad (7)$$

其中  $\tau_0 = B_0 + B_1[(A_1/x_1)^2 + A_2^2], \quad \tau_1 = 2B_1A_1A_2/x_1$

在理想情况下:  $\tau_0 = \tau_1 = 1/2$ 。

设再现照明光波的振幅为  $a$ , 则正、负一级衍射光的衍射效率为:

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \frac{(a/4)^2 |\exp(j2\pi f_x x)|^2 \sum_H}{a^2 \sum_H} = \frac{1}{16} = 6.25\% \quad (8)$$

矩型全息光栅的透射系数为:

$$\tau_H = \tau_0 + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \tau_m [\exp(j2\pi f_{xm} x) + \exp(-j2\pi f_{xm} x)] \quad (9)$$

在理想情况下,  $\tau_0 = 1/2, \tau_1 = 2/\pi$ 。所以正负一级衍光的衍射效率为:

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \frac{(a/\pi)^2 |\exp(j2\pi f_{1x} x)|^2 \sum_H}{a^2 \sum_H} = \frac{1}{\pi^2} = 10.13\% \quad (10)$$

由(8)式、(10)式可知, 振幅型变频全息光栅的衍射效率与光栅的频率无关, 用于光刻时, 曝光时间相同, 就能使全息图亮度均匀。

### 4.2 位相型变频全息光栅的衍射效率

正弦型位相变频全息光栅的透射系数可以写成:

$$\tau_H(x) = \tau_0 \exp [j(\Psi_0 + \Psi_1 \cos 2\pi f_x x)] \quad (11)$$

其中  $\tau_0 = 1$

$$\exp(j\Psi_1 \cos 2\pi f_x x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m J_m(\Psi_1) \exp(-jm2\pi f_x x)$$

所以正一级衍射的效率为:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{I_1}{I_0} = \frac{[ajJ_1(\Psi_1)]^2 |\exp(-j2\pi f_x x)|^2}{a^2} \\ &= |J_1(\Psi_1)|^2 = 33.9\% \end{aligned} \quad (12)$$

矩型位相变频全息光栅的透射系数为:

$$\tau_H(x) = \frac{2\tau_0}{j\pi} [\exp(i2\pi f_x x) - \exp(-j2\pi f_x x) + \dots] \quad (13)$$

正一级衍射的最大衍射效率为:

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \frac{I_0}{I_1} \\ &= \frac{a^2(2\tau_0/j\pi)^2 |\exp(j2\pi f_x x)|^2}{a^2} = \left[ \frac{2}{\pi} \right]^2 = 40. \% \end{aligned} \quad (14)$$

在理想情况下:  $\tau_0 = 1$ 。

由(12)式、(14)式可知位相型变频全息光栅的衍射效率与光栅频率无关, 且衍射效率

高。因此,在计算机全息中可以采用统一的较短的曝光时间,既可提高工作效率又利于编程方便,与振幅型变频全息光栅相比更有利。

## 5 变频全息光栅的应用

变频全息光栅与透镜结合能产生可变夹角的参物光和大小可变的全息光斑。这个性质应用在计算机光刻全息中可以制作高分辨率的、360°度可视的、动态假彩色全息图。如图 4 所示,用共参考光  $u_2^*$  再现变频光栅  $H_1$ 。

设透射率与  $I$  成正比。则再现光波

$$\begin{aligned} \phi = Iu_2^* = & \left( \frac{A_1^2}{z_1^2} + A_2^2 \right) A_2 \\ & + \frac{A_1 A_2^2}{z_1} \exp \left[ \frac{-ik}{2z_1} (x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y) \right] \\ & + \frac{A_1 A_2^2}{z_1} \exp \left[ \frac{ik}{2z_1} (x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

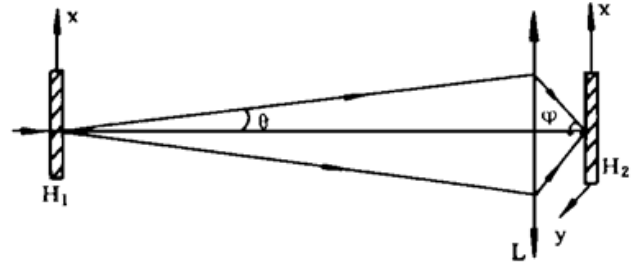


Fig. 4 Applied schematic of converter holographic grating

由上式可得,在  $x-z$  平面有:

$$\cos \theta = \frac{z_1}{r_1} = \frac{2z_1^2}{x^2 - 2x_1x} \quad (16)$$

同理,在  $y-z$  平面有:

$$\cos \theta = \frac{2z_1^2}{y^2 - 2y_1y} \quad (17)$$

由(6)式、(16)式、(17)式可见,随着  $x$ 、 $y$  的增大  $\theta$  亦增大,即随着全息光栅的频率增大,再现角增大。

变频全息光栅的  $\pm 1$  级衍射光经透镜会聚后,有如下关系:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{d_0}{d_1} \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{m} \operatorname{tg} \theta \quad (18)$$

其中,  $m$  为放大倍数,由(16)式可得  $\operatorname{tg} \theta = \arccos [2z_1^2 / (x^2 - 2x_1x)]$ , 又因  $m = f / (d_0 - f)$ ,  $f$  为透镜的焦距由  $f_x = x / \lambda z_1$ , 可得

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{d_0 - f}{f} \operatorname{tg} \left( \arccos \frac{2}{\lambda^2 f_x^2} \right) \quad (19)$$

其中  $d_0$  为全息光栅到物镜的距离。  $x_1 = 0$ , 由(18)式、(19)式可知,变频全息光栅与透镜结合能产生夹角随光栅频率变化的参物光,并且可获得比入射光缩小  $m$  倍的全息光斑。

**结 论** 用  $\lambda = 510 \text{ nm}$  的全息干板制作了频率范围在  $0 \text{ mm}^{-1} \sim 80 \text{ mm}^{-1}$  的变频全息光栅,结合  $F$  数为 1.8 的透镜,能够使激光束缩小 10 倍的同时,参物夹角在  $0^\circ \sim 40^\circ$  的范围连续变化,已获得了空间频率为  $100 \text{ mm}^{-1}$  的由全息光斑组成的光栅图像。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] N. George, Holographic diffraction grating. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**(1): 212~ 214
- [ 2 ] T. H Jeong, Cylindrical holography and some proposed application. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(2): 1396~ 1398
- [ 3 ] 加塔克, 塞格雷键著, 蒙文林译, 现代光学. 呼和浩特市, 内蒙古人民出版社, 1987: 274~ 275
- [ 4 ] 于美文编著, 光学全息及信息处理. 北京, 国防工业出版社, 1986: 142~ 153

## Study of Converter Holographic Grating and Its Applications

Yu Jianguo    Pei Wen    Xu Daxiong

(The Department of Applied Science and Technology,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

(Received 17 November 1995; revised 4 April 1996)

**Abstract** Concept of converter holographic grating is proposed and its structure characteristics are theoretically analysed. Three kinds of experimental device to make converter holographic grating are designed. It is proved that combining converter holographic grating with lens can produce variable angle between reference light and object light and variable size of holographic facula.

**Key words** converter holographic grating, angle between reference light and object light, holographic facula.