

深刻蚀连续浮雕微光学元件的衍射分析*

徐平 唐继跃 郭履容 郭永康 杨家发

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

杜春雷 李展 周明宝

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

提要 讨论了深蚀刻连续浮雕位相微光学元件的衍射特性, 给出了槽形与衍射效率关系的初步研究结果, 对实际制作具有指导意义。

关键词 深刻蚀, 连续位相, 衍射光学, 微光学, 元件

1 引言

衍射光学元件以其能够灵活的变换波前、集多种功能于一体和可复制等优良特性, 促使光学系统和器件走向轻型化、微型化和集成化。这种新型的光学元件可广泛地应用于光束整形、光束列阵发生器、光学互连、微型光通信等方面。

衍射光学元件的制作可分为二元光学元件和连续浮雕位相衍射光学元件两大类。二元光学元件的制作是通过微电子加工工艺中的光束或电子束制版技术, 将计算机设计的衍射图案写到感光材料上(比如光致抗蚀剂上), 再通过蚀刻技术(反应离子蚀刻等), 将感光层上图案复制到衬底片基上, 从而最终形成深度为亚微米量级的表面刻蚀结构。

连续浮雕位相衍射光学元件则是采用激光束直写系统^[1~4]、激光辅助化学刻蚀^[5]或其他方法^[6~10]来获得。由于连续的深度分布的衍射元件比台阶式分布的衍射元件有更高的衍射效率, 因而这种元件更具有吸引力。本文针对连续刻蚀时易于产生的槽形, 讨论使用我们提出的深蚀刻技术(该技术另文详细叙述)时, 连续浮雕位相微光学元件的衍射特性。

2 原理

为了简单起见, 这里讨论深蚀刻时连续位相浮雕闪耀光栅衍射效率与槽型的关系。根据我们制作连续位相浮雕闪耀光栅^[6~8]的实验结果, 实际制作闪耀光栅时, 不可能获得理想的90°直角锯齿槽形而总是存在匀化现象。于是, 我们抽象出一个连续位相闪耀光栅表面浮雕槽形的简化模型(如图1所示)。下面, 在此模型上应用我们提出的微光学元件的深蚀刻技术, 来推导深

* 国家自然科学基金、中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室资助项目。

收稿日期 · 1995年9月27日; 收到修改稿日期 · 1996年1月10日

刻蚀连续浮雕闪耀光栅的衍射效率公式。

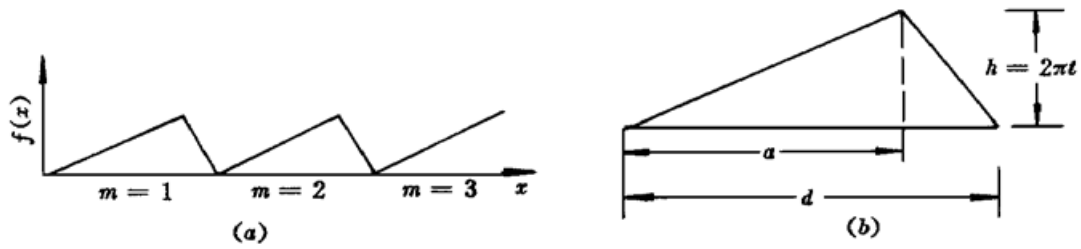


Fig. 1 Simplified model of the continuous phase relief blazed grating

如图1所示,该闪耀光栅第 m 周期内的透过率函数为:

$$f_m(x) = \text{rect}\left[\frac{x - md - a/2}{a}\right] \exp\left[i\frac{2\pi}{a}(x - md)\right] + \text{rect}\left[\frac{x - md - a - (d - a)/2}{d - a}\right] \exp\left[i\frac{2\pi}{d - a}[(m + 1)d - x]\right] \quad (1)$$

由我们所推导的周期物衍射效率公式^[11]

$$A_k = \frac{1}{d} \int_0^d f_0(x) \exp\left[-i\frac{2\pi kx}{d}\right] dx \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,并利用

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, \quad \exp(i2\pi k) = 1, \quad \exp(i\pi k) = (-1)^k, \quad k = \pm 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

进行化简和整理,可以得到衍射效率为:

$$\eta_k = A_k^2 = \left[\frac{a}{d} \cdot \text{sinc}\left[t - \frac{ka}{d}\right] + (-1)^k \cdot \frac{d - a}{d} \cdot \text{sinc}\left[t + \frac{d - a}{d}k\right] \right]^2, \quad k = \pm 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

其中 k 为衍射级次, t 为深蚀刻因子, a, d 为槽形参数。

下面根据该式展开分析和讨论。

3 结果分析与讨论

现在,分别取不同的蚀刻深度因子 t 和槽形参数 a, b ,利用(4)式展开讨论,通过计算机编程计算,将主要的结果列于表1,并将有代表意义的典型值分别绘制成图2和图3。

根据上述推导与计算机模拟结果,可对各种槽形与衍射效率的关系展开分析与讨论:

3.1 $R = 1$ 即理想锯齿槽形时,不论光栅槽刻蚀多深,其衍射效率都为100%;当刻蚀位相深度为 2π 时(即 $t = 1$),衍射光都闪耀在 $k = 1$ 级上;当刻蚀位相深度为 2π 的整数倍 t 时,即位相为 $t \cdot 2\pi$ ($t = 1, 2, 3, \dots$) 时,衍射光分别闪耀在 $k = t$ 级上。此即表明,随着位相刻蚀深度增加为 2π 的整数倍,相应闪耀光栅的闪耀级也增大相应的倍数(闪耀光栅的闪耀角也近似增大相应的倍数),两者之间成一线性关系,并且光栅的衍射效率保持100%不变。

由相息图理论可知,一般相息图刻蚀位相深度为 2π ,使用的是一级衍射光。当仅仅加深刻蚀深度时,由图1可知,闪耀光栅的闪耀角要增大,如果位相刻蚀深度增加为 2π 的整数倍时,闪耀级次也提高整数倍;由于 $R = 1$ 是考虑纯理想的情形,因此衍射效率保持100%。这个结论

与我们讨论的深蚀刻二元光学元件的规律相吻合。

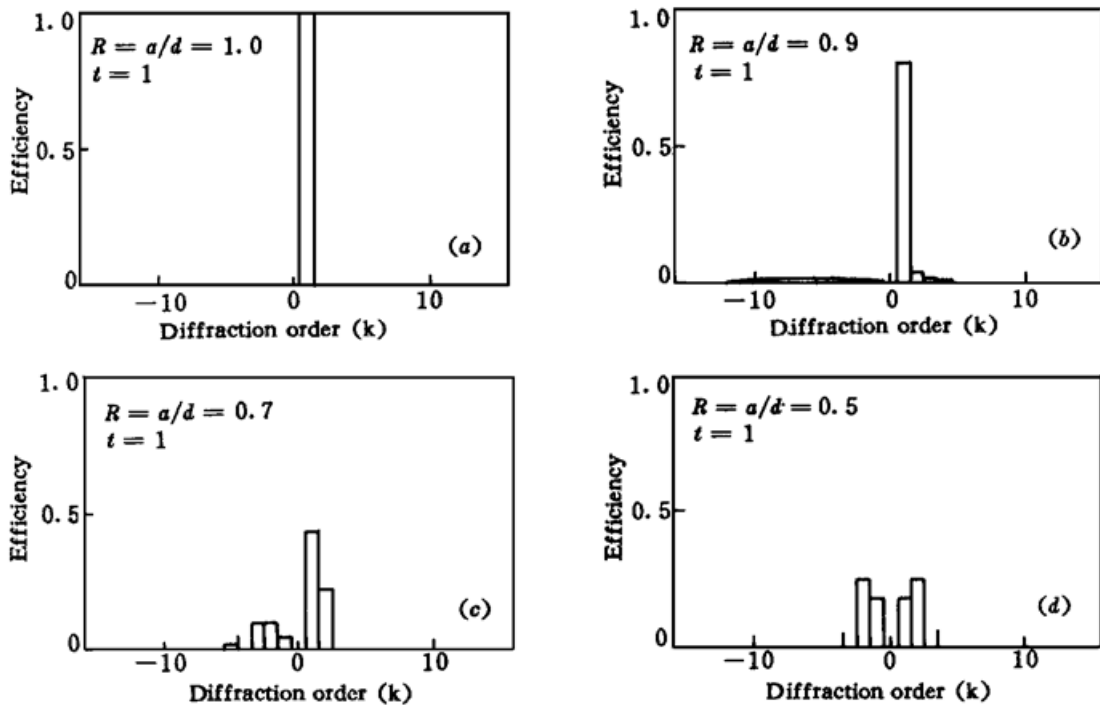


Fig. 2 Diffraction efficiency curves with the etching phase depth of 2π and different groove profiles

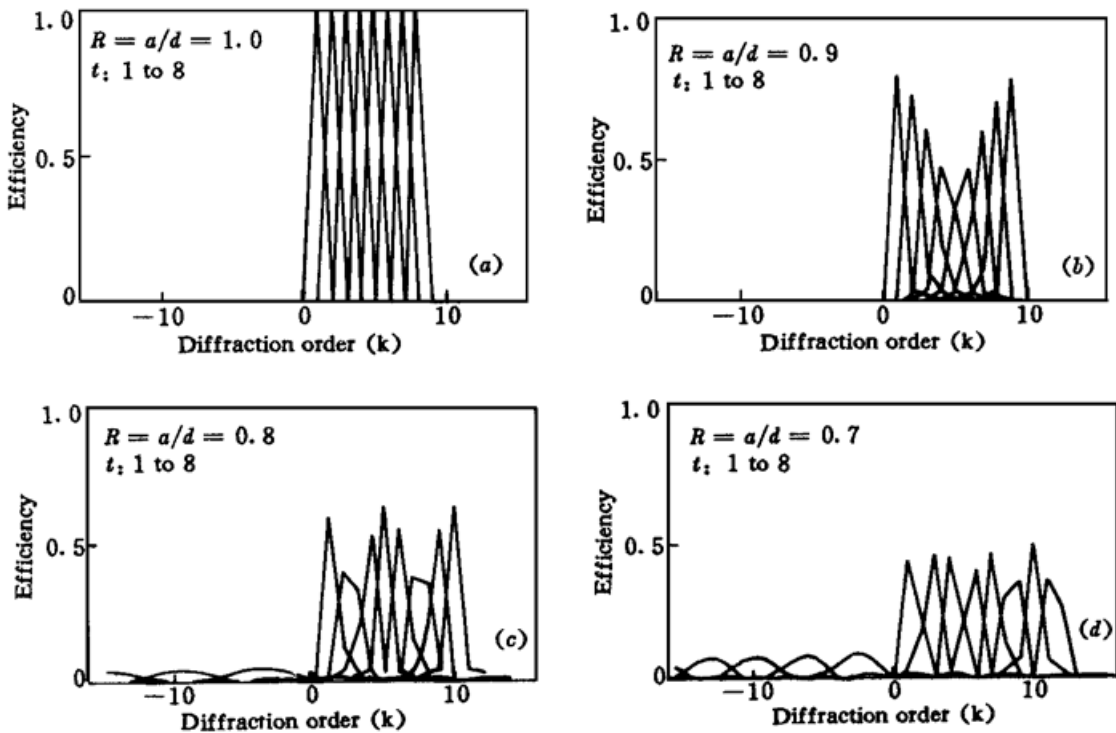


Fig. 3 Diffraction efficiency curves with etching phase depths larger than 2π and different groove profiles

3.2 $R = 0.5$, 实际上形成的是等腰三角槽形浮雕光栅。当刻蚀位相深度为 2π 时(即 $t = 1$)，这时的衍射光已不能集中于某一级上，而是一种对称分布，主要在 $k = \pm 1, \pm 2$ 四个级次上。

很显然，由于这时槽形是等周期的对称型，因此只能形成对称的衍射光分布而不能聚集到某一级次上。

3.3 当 $0.5 < R < 1$ 时，不论光栅槽刻蚀多深，其衍射光是一种非对称分布，主要集中于某一

级上,其衍射级次和该级衍射效率的极大值由槽形参数 R 和刻蚀深度参数因子 t 决定。

衍射效率主要由 R 决定,但也应该注意到,槽深的加深也对衍射效率有一定的影响,尤其是在 $R > 0.75$ 时,衍射效率随槽深的变化还比较大。而当 $R < 0.75$ 时,槽深的加深对衍射效率的影响就比较小了。

Table 1 The diffraction efficiency with different etch depths and profiles

		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$	$t = 7$	$t = 8$
$R = 1.0$	D. E	100	100	100	100	100	100	100	100
	k	1	2	3	4	5	6	7	8
$R = 0.95$	D. E	90.0	87.8	84.2	79.4	73.5	66.9	59.6	52.0
	k	1	2	3	4	5	6	7	8
$R = 0.9$	D. E	80.0	72.3	60.9	47.3	45.7	59.1	70.5	78.2
	k	1	2	3	4	6	7	8	9
$R = 0.85$	D. E	70.2	55.7	39.8	57.5	69.5	71.8	63.8	48.1
	k	1	2	4	5	6	7	8	9
$R = 0.8$	D. E	60.8	39.8	54.5	64.0	56.9	37.7	55.4	64.0
	k	1	2	4	5	6	7	9	10
$R = 0.75$	D. E	51.9	42.9	56.3	47.1	44.5	56.3	46.4	44.9
	k	1	3	4	5	7	8	9	11
$R = 0.7$	D. E	43.6	46.0	44.7	41.6	48.0	35.1	49.0	37.0
	k	1	3	4	6	7	9	10	11
$R = 0.65$	D. E	36.0	42.7	32.3	41.6	36.0	40.0	38.6	37.6
	k	1	3	5	6	8	9	11	12
$R = 0.6$	D. E	29.2	31.2	36.0	30.3	32.5	36.0	30.8	32.1
	k	1	3	5	7	8	10	12	13

D. E represents diffraction efficiency; k diffractive order; t the times of the maximum phase 2π ; $R = a/d$, a , and d represent profile parameters of the blazed grating. The data in this table are the maximum diffraction efficiency (%).

当 R 取定之后,衍射效率极大值的位置(即衍射级次)主要由槽深决定。衍射级次 k 随位相深度因子 t 的增加而变大,但这两者之间不是严格的线性关系,这与理想槽形时稍有不同。

R 值在这个范围时,描述了实际制作闪耀光栅时发生的匀化现象,使得所制作的闪耀光栅偏离理想槽形。由 R 值的定义可知, R 值越大,所对应的槽形越接近于理想情形,因此,这时槽形对衍射效率的影响越小。

3.4 不论 R 为何值,都可以用加深位相刻蚀深度的技术来得到高级次的闪耀输出光,这在需要加大色散或提高闪耀角的应用场合非常有用。关于深蚀刻元件特性的研究,将在另文详细讨论^[12]。

4 结束语

本文在我们制作连续位相浮雕闪耀光栅的基础上,根据实验中刻蚀制作连续位相元件时产生的表面浮雕沟槽形状,抽象出一个连续位相闪耀光栅表面浮雕槽形的简化模型。在该模型上,应用我们提出的微光学元件的深蚀刻技术,导出了深刻蚀连续浮雕闪耀光栅的衍射效率公

式。在此公式的基础上展开了分析和讨论, 得到连续浮雕深刻蚀元件槽形与衍射效率关系的初步研究结果, 这对于实际制作具有一定指导意义。

参 考 文 献

- 1 Masamitsu Haruna *et al.*. Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34) · 5120
- 2 P. Langlois *et al.*. DOE fabricated by laser direct writing and other techniques. *SPIE*, 1992, **1751** · 2
- 3 M. T. Galc *et al.*. Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14) · 2526~ 2533
- 4 杜春雷, 郭履容, 徐 平. 激光直接光刻制作微透镜列阵的方法研究. *光学学报*, 1996, **16**(8) · 1194~ 1196
- 5 E. J. Gratrix *et al.*. Fabrication of microlenses by laser assisted chemical etching. *SPIE*, 1991, **1544** · 238
- 6 L rong Guo, Xiaoxue Cheng, Yongkang Guo *et al.*. Fabricating blazing grating on NGD by photochemical etching. *Chinese J. of Lasers*, 1992, **B1**(4) · 361~ 365
- 7 L rong Guo, Xiaoxue Cheng, Yongkang Guo *et al.*. A new method of making HOE by copying CGH on NGD. *SPIE*, 1991, **1555** · 300~ 303
- 8 徐 平, 杜春雷, 郭履容 等. 双闪耀光栅的计算机设计与制作方法. *应用激光*, 1996, **16**(1) · 22~ 24
- 9 Kuoping Wang, L rong Guo, Qirui Chen *et al.*. Red sensitivity of dichromated cellulose triacetate as a holographic recording material. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(16) ·
- 10 Guoping Wang, L rong Guo, Ping Xu *et al.*. Beam splitter made of stratified grating in a novel positive photoetching film; ICO topical meeting. *Frontiers in information optics*, Kyoto, Japan, 1994. (4p-54) · 292
- 11 徐 平, 郭履容, 郭永康. N 阶闪耀光栅衍射理论分析. *大学物理*, 1996, **15**(4) ·
- 12 徐 平, 唐继政, 郭履容 等. 深刻蚀二元光学元件. *光学学报*, 1996, **16**(待发表)

Diffraction Analysis on Deep-etch Continuous Phase Relief Microoptical Elements

Xu Ping Tang Jiyue Guo L rong Guo Yongkang Yang Jiafa
(*Information Optics Insitute of Sichuan University, Chengdu 610064*)

Du Chunlei Li Zhan Zhou Mingbao
(*The State Lab. for Optical Technologies on Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

Abstract This paper discusses the diffractive characteristics of the deep-etch continuous phase relief microoptical elements. The preliminary results about the relationship between the profiles of the deep-etch elements and the diffraction efficiency are presented. This may provide useful guidance for the fabrication of the elements.

Key words deep-etch, continuous phase, diffractive optics, microoptics, elements