

# 深蚀刻二元光学元件\*

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)

姜念云 李 展 杜春雷

(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)

**摘 要** 提出一种新颖的、蚀刻位相深度超过  $2\pi$  的深蚀刻二元光学技术, 并从理论上分析深蚀刻二元光学元件与衍射效率的关系, 然后用计算机进行模拟与分析, 得到深蚀刻二元光学元件特性的一些初步研究结果。

**关键词** 深刻蚀, 衍射光学, 二元光学, 元件.

## 1 引 言

传统的二元光学技术是利用计算全息相息图方法与大规模集成电路技术相结合, 从而在任意片基材料上制作出位相深度为  $2\pi$  的衍射微光学元件。随着微光学技术的不断发展, 在某些应用中, 比如, 制作宽带微快透镜列阵<sup>[1]</sup>(fast broadband microlens array)、分色光学<sup>[2,3]</sup>(color discrimination optics)、焦平面微透镜列阵<sup>[1]</sup>(focal-plane microlens arrays) 等, 需要突破传统的二元光学技术, 发展一种新颖的、蚀刻位相深度超过  $2\pi$  的、具有高纵横比的深蚀刻二元光学技术。

系统地研究深蚀刻二元光学技术, 是一个全新的课题。本文在研究一般二元光学元件工作<sup>[4,5]</sup>的基础上, 从理论上分析了深蚀刻二元光学元件与衍射效率的关系; 并用计算机进行模拟与分析, 得到深蚀刻二元光学元件特性的一些初步研究结果。

## 2 深蚀刻二元光学元件衍射分析

下面以二元菲涅尔透镜为例, 推导深蚀刻衍射光学元件的衍射效率公式。如图 1 所示为二元菲涅尔透镜 (FL) 结构示意图, 由此可导出第  $m$  主带半径  $r_m$  为:

$$r_m^2 = m2Nf = mr_1^2 \quad (1)$$

第  $m$  主带、 $l$  子带的半径  $r_{m,l}$  为:

$$r_{m,l}^2 = r_1^2 \sqrt{(m-1) + l/L}, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

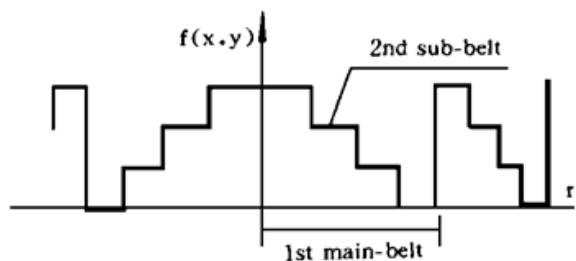


Fig. 1 Sketch map showing Fresnel lens

\* 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。

$$r_1 = \sqrt{2\mathcal{N}} \quad (3)$$

$$\text{而量化带数 } M \text{ 为: } M = R^2 / (2f\lambda) \quad (4)$$

$$\text{第 } l \text{ 子带的蚀刻深度 } h_l \text{ 为: } h_l = \frac{l-1}{L} \frac{\lambda}{n-1} t, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

式中  $\lambda$  为所使用的光波波长,  $f$  为二元菲涅尔透镜的焦距,  $R$  为二元菲涅尔透镜的通光半径,  $L$  为量化级数,  $n$  为透镜材料的折射率,  $r_1$  为第一主带的半径,  $t$  称作深蚀刻因子, 一般取整数, 它表示蚀刻位相深度为  $2\pi$  的  $t$  倍。  $t = 1$  即一般二元光学情形。令  $\rho = x^2 + y^2$ , 则有:

$$\rho_{m,l} - \rho_{m,l-1} = \rho_1 / L, \quad \rho_m - \rho_{m-1} = \rho_1, \quad \rho_1 = r_1^2 = 2\mathcal{N} \quad (6)$$

因此, 对  $\rho$  而言, 菲涅尔透镜的主带和子带都是等间隔的, 其位相函数  $f(\rho)$  为一具有旋转对称的周期函数。从而有:

$$f(\rho) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[ \frac{\rho - (m-1)\rho_1 - (l-1)\rho_1/L - \rho_1/(2L)}{\rho_1/L} \right] \exp[-i2\pi(l-1)t/L] \quad (7)$$

将  $f(\rho)$  用球面波展开,

$$f(\rho) = \sum_q Q_q \exp(-i2\pi\rho q / \rho_1) \quad (8)$$

展开系数为对  $f(\rho)$  在任一周期内积分(这里选择  $m = 1$ ):

$$\begin{aligned} Q_q &= \frac{1}{T} \int_0^\pi f(\rho) \exp(-i2\pi\rho q / \rho_1) d\rho = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{\rho_1} f(\rho) \exp(-i2\pi\rho q / \rho_1) d\rho \\ &= \frac{1}{\rho_1} \sum_{l=1}^L \int_0^{\rho_1} \text{rect} \left[ \frac{\rho - (l-1)\rho_1/L - \rho_1/(2L)}{\rho_1/L} \right] \exp[-i2\pi(l-1)t/L] \exp(-i2\pi\rho q / \rho_1) d\rho \end{aligned} \quad (9)$$

利用 sinc 函数的定义式  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$  和  $N$  项等比级数求和公式  $S_n = a_1(1 - q^n) / (1 - q)$  ( $q$  为公比,  $a_1$  为首项) 及指数函数与三角函数之间的关系式  $\sin(x) = (e^{ix} - e^{-ix}) / 2i$ ,  $\cos(x) = (e^{ix} + e^{-ix}) / 2$  对(10)式进行化简, 得到

$$\begin{aligned} Q_q &= e^{i\pi q/L} \text{sinc}[q/L] = \exp[i\pi(k + t/L)] \text{sinc}(k + t/L), \\ q &= kL + t, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

将此式代回到(8)式, 并将  $\rho$  用  $x, y$  表示; 再用单位振幅平面波垂直入射其上, 在透镜后表面处得复振幅分布为:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{q=-\infty}^{+\infty} Q_q f(x, y) \\ &= \sum_{k=0, \pm 1, \pm 2, \dots} \exp[i\pi(k + t/L)] \text{sinc}(k + t/L) \exp\{-i2\pi[(kL + t)/r_1^2](x^2 + y^2)\} \end{aligned} \quad (12)$$

按惠更斯-菲涅尔原理, 此即表示一系列的会聚、发散球面波, 会聚(发散)中心在:

$$F_k = \frac{r_1^2}{2\lambda(kL + t)}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13)$$

由(11)式即可得到各球面波的规一化能量表达式:

$$\eta_k = |Q_q|^2 = \text{sinc}^2(k + t/L), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (14)$$

讨论:

1) 在  $k = 0$  级得会聚球面波的主焦点位置:

$$F = r_1^2 / 2\lambda t = f / t \quad (15)$$

此时相应的衍射效率最大, 表达式为:

$$\eta = \text{sinc}^2(t/L) \quad (16)$$

(14) 式与(15)式表明, 深蚀刻后, 当位相深度是  $2\pi$  的  $t$  倍时, 衍射光学元件的焦距是深蚀刻前的  $1/t$ ; 这里应注意对  $f$  和  $F$  的理解。 $f$  实际上是透镜的结构参数, 即  $f = r_1^2/(2\lambda)$ , 它仅与波长和第一主带半径有关, 所反映的是深蚀刻前透镜的主焦点; 即使深蚀刻后, 这个  $f$  值也仍然没有变化, 只有改变入射波长或第一主带半径才会改变  $f$ 。 $F$  为深蚀刻后透镜的主焦距, 它的大小不仅与  $f$  有关, 且随着蚀刻因子的变化而改变, 与  $f$  的关系由(15)式表示。

另外, 由(16)式可知, 当  $t = 1$  时, 该式即过渡到一般二元光学情形, 说明此结论具有一般性。

2) 在  $k = -1, -2, -3, \dots$  和  $k = 1, 2, 3, \dots$  等其它级, 也有发散和会聚球面波即次焦点, 次焦点的位置和相应的衍射效率分别为:

$$F_k = \frac{r_1^2}{2\lambda(kL + t)}, \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17)$$

$$\eta_k = \text{sinc}^2(k + t/L), \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (18)$$

这些级次的光能量实际上是由二元量化引起的, 当  $L \rightarrow \infty$  时, 这部分量化噪声为零。

### 3 深蚀刻二元光学元件特性研究

#### 3.1 焦距缩短效应

现在来讨论一下焦点位置、衍射效率分布与蚀刻深度的关系。由(13)和(14)式, 选取十个次焦点, 可对这些次焦点和主焦点的位置、衍射效率分布进行计算。为不失一般性, 计算焦点位置时, 以因子  $f$  为单位, 即

$$F_k = \left[ \frac{1}{kL + t} \right] f = C_k f \quad (19)$$

其中  $f$  是未深蚀刻时, 该衍射光学元件的主焦点焦距,  $C_k$  是与  $k$  有关的常系数。表 1 所列的是  $C_k$  的数值, 计算时取  $L = 8$  即 8 台阶情形。

Table 1. Relationship about primary and secondary focus and diffractive efficiency with etching depth

		$k = -1$	$k = -2$	$k = -3$	$k = -4$	$k = -5$	$k = 5$	$k = 4$	$k = 3$	$k = 2$	$k = 1$	$k = 0$
$t = 1$	$C_k$	-0.1429	-0.0667	-0.0435	-0.0323	-0.0256	0.0244	0.0303	0.0400	0.0588	0.1111	1.0000
	$\eta_k$	0.0194	0.0042	0.0018	0.0010	0.0006	0.0006	0.0009	0.0015	0.0033	0.0117	0.9496
$t = 2$	$C_k$	-0.1667	-0.0714	-0.0455	-0.0333	-0.0263	0.0238	0.0294	0.0385	0.0556	0.1000	0.5000
	$\eta_k$	0.0901	0.0165	0.0067	0.0036	0.0022	0.0018	0.0028	0.0048	0.0100	0.0324	0.8106
$t = 3$	$C_k$	-0.2000	-0.0769	-0.0476	-0.0345	-0.0270	0.0233	0.0286	0.0370	0.0526	0.0909	0.3333
	$\eta_k$	0.2214	0.0328	0.0126	0.0066	0.0040	0.0030	0.0045	0.0076	0.0153	0.0457	0.6150
$t = 4$	$C_k$	-0.2500	-0.0833	-0.0500	-0.0357	-0.0278	0.0227	0.0278	0.0357	0.0500	0.0833	0.2500
	$\eta_k$	0.4053	0.0450	0.0162	0.0083	0.0050	0.0033	0.0050	0.0083	0.0162	0.0450	0.4053

由表 1 的计算可分析得到如下结果:

1) 主焦点的位置 ( $k = 0$ ) 随着蚀刻深度的变化而改变, 它与台阶数无关(由(19)式看出, 当  $k = 0$  时  $F$  与  $L$  无关), 即不能用增加台阶数来改变主焦距; 当蚀刻深度加大  $t$  (即蚀刻深度因子) 倍时, 主焦点的位置即焦距正好缩短  $t$  倍; 把这种深蚀刻元件比一般二元光学元件的焦距缩短  $t$  倍的现象称作深蚀刻元件的焦距缩短效应。

2) 光能量主要集中在主焦点上。对同一个光学元件, 当蚀刻深度加大而缩短其焦距时, 衍射效率略有减小; 由(16)式可知, 当台阶数较大时, 衍射效率减小的现象不会明显。

3) 次焦点的位置由台阶数和蚀刻深度因子共同决定。

4) 当蚀刻深度和台阶数满足  $t/L = 1/2$  时(如表中最后两行所示), 其作用相当于一个二元菲涅尔波带片。

由于深蚀刻可缩短元件的焦距, 因此, 可以利用深蚀刻技术来提高二元光学元件的相对孔径( $D/F$ ), 这对于减少像差、提高像质等许多方面有着极其重要的意义。

### 3.2 作宽带微快透镜

现在来考察深蚀刻对透镜焦斑密度的影响。若设计一个八灰阶二元菲涅尔透镜, 焦距为 31.8 mm, 口径大小为  $0.375 \times 0.375 \text{ mm}^2$ , 且为正方形, 该菲涅尔透镜带数为 4.5。深蚀刻前、后的情形用计算机进行模拟, 得到下列结果。

#### 3.2.1 深蚀刻前

图 2 和图 3 是用一般二元光学技术制作的二元菲涅尔透镜, 最大蚀刻位相深度是  $2\pi$ (由图 2(b)可知)。由图 3(b)可知, 在主焦点  $F = 31.8 \text{ mm}$  处中央焦斑的孔径为  $2 \times 0.0237 \text{ mm}$ , 最大衍射效率为 0.9492。由此可近似计算出能量密度正比于  $E_1 \propto 0.9492/\pi(0.0237)^2$ 。

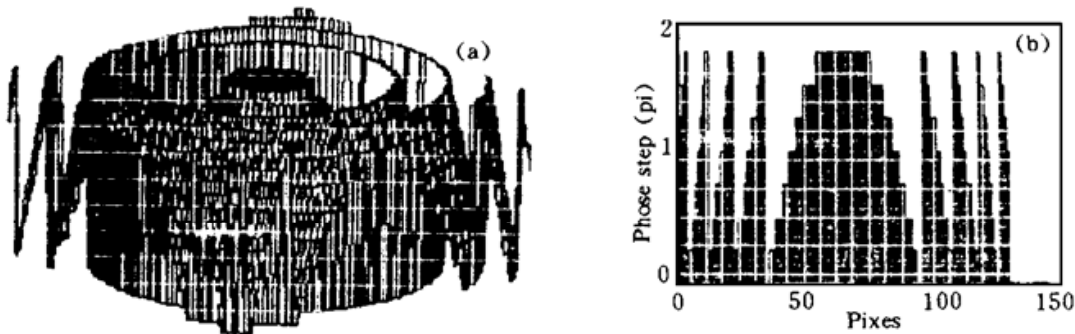


Fig. 2 8-level phase relief profile of binary Fresnel lens  
(a) 3-D profile; (b) 2-D sectional drawing (along diagonal)

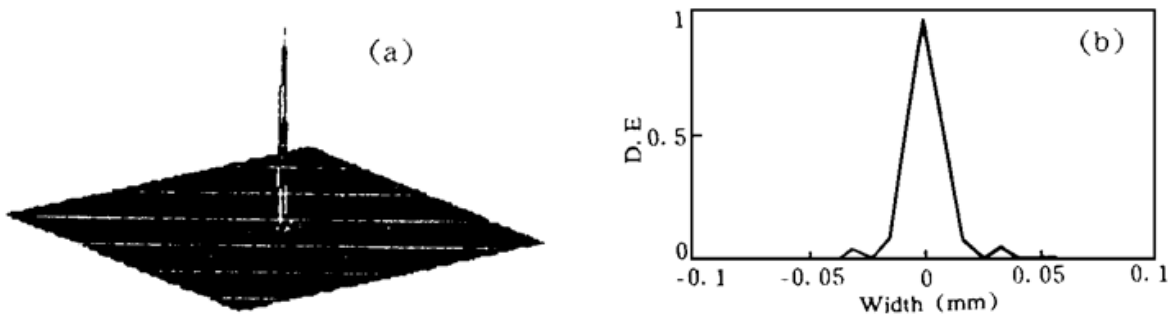


Fig. 3 Intensity distributions in the focal plan of the Fresnel lens  
(a) 3-D profile; (b) 2-D sectional drawing (along diagonal)

#### 3.2.2 深蚀刻后

图 4 和图 5 则是采用深蚀刻二元光学技术后制作的二元菲涅尔透镜, 这里选择深蚀刻因子  $t = 2$ , 即得到最大刻蚀位相深度是  $4\pi$ (由图 4(b)可看出)。由于采用了深蚀刻技术, 使得该透镜的焦距缩短为  $F/t = 15.9 \text{ mm}$ , 由图 5(b)可知, 在现在的主焦点  $F = 15.9 \text{ mm}$  处中央焦斑的孔径为  $2 \times 0.0118 \text{ mm}$ , 最大衍射效率为 0.8095。同样, 可近似计算出能量密度正比于  $E_2 \propto 0.8095/\pi(0.0118)^2$ 。由  $E_2/E_1 = 3.44$ , 表明深蚀刻技术可提高透镜会聚斑能量密度。

将这里的条件推广到一般情形, 即若用  $L$  表示二元透镜的台阶数, 则用深蚀刻技术可使元件的光能量密度提高

$$\frac{\text{sinc}^2(t/L)}{\text{sinc}^2(1/L)} \cdot t^2 \quad (20)$$

倍。因此深蚀刻技术可用来制作宽带微快透镜。

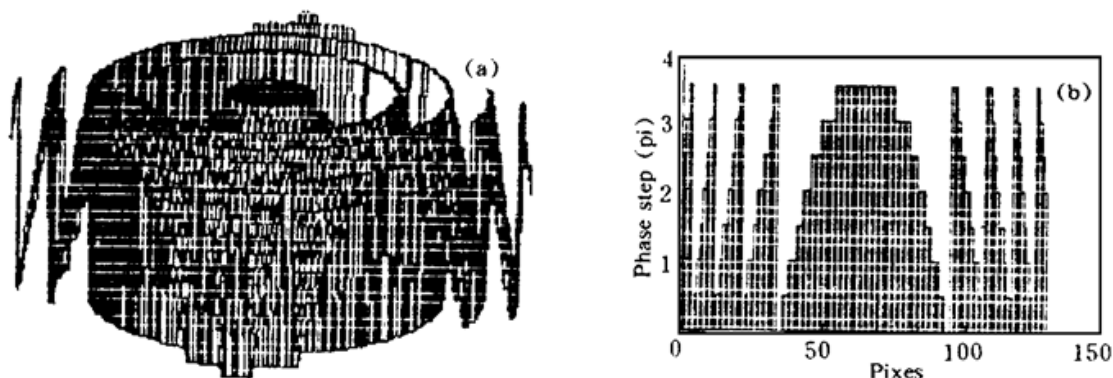


Fig. 4 Deep etched 8-level phase relief profile of binary Fresnel lens

(a) 3-D profile; (b) 2-D sectional drawing (along diagonal)

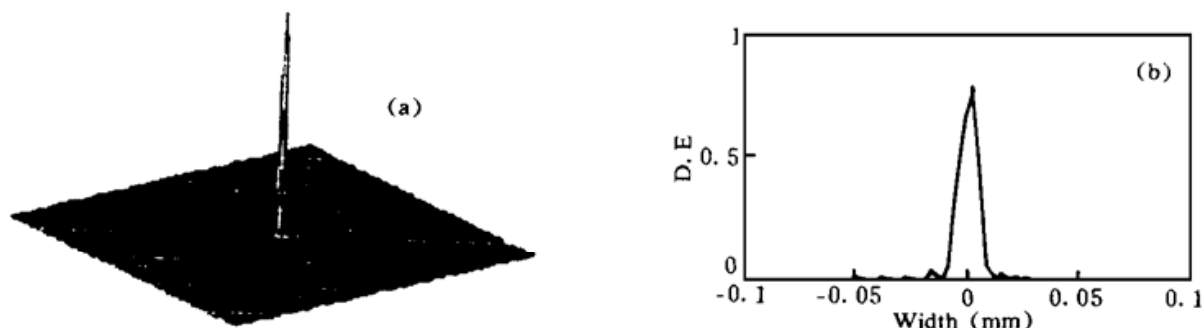


Fig. 5 Intensity distributions in the focal plan of the deep etched Fresnel lens

(a) 3-D distribution; (b) Enlarged sectional drawing around the center spot

### 3.3 降低对制作系统的精度要求

由(2)式可得  $m$  主带第  $l$  子带的宽度  $\Delta r_{m,l}$  为:

$$\Delta r_{m,l} = r_{1,1} [ \sqrt{(m-1)L + l} - \sqrt{(m-1)L + (n-l)} ] \quad (21)$$

因此, 当  $m = M, l = L$  ( $M$  是最大主带数,  $L$  是台阶数) 时, 得最外主带中最外子带的宽度  $\Delta r_{\min}$  为:

$$\Delta r_{\min} = R - \sqrt{R^2 - 2fNL} \quad (22)$$

式中  $R$  为菲涅尔透镜的半径。宽度  $\Delta r_{\min}$  即是制作上的最小间隔。由于  $(2fNL) \ll 1$ , 可对上式化简, 得到

$$\Delta r_{\min} \approx fNL \quad (23)$$

此式中  $\lambda, R, L$  为常量, 因此最小制作间隔  $\Delta r_{m,l}$  仅由焦距  $f$  决定。

如果所要制作的菲涅尔透镜的焦距要求为  $f_0$ , 由前面讨论得到的深蚀刻元件的焦距缩短效应, 设计时焦距可放大  $t$  倍, 即取  $f = tf_0$ , 采用深蚀刻技术, 可使制作出来的元件的焦距为预定值  $f_0$ , 由于设计时焦距放大了  $t$  倍, 由(23)式可知, 最小制作间隔  $\Delta r_{m,l}$  相应地扩大了  $t$  倍。对于制作不需要缩短焦距的应用元件, 采用深蚀刻技术, 可降低对制作系统的精度要求。

由此分析可知, 深蚀刻技术可将横向的对位精度转化为纵向的深度控制, 这正是该技术的一大优点。理论研究表明<sup>[4]</sup>, 对位误差对衍射效率的影响比深度误差严重得多; 另一方面从作者最近已完成的实验制作上看(另文报道), 深度控制比对位控制容易实现更高的精度。例如, 就目前使用的曝光机而言, 深度误差可以较容易地控制在 10 nm 以内, 而对位误差要

达到  $0.8 \mu\text{m}$  则很困难。因此,从技术上考虑,将横向的对位困难转化为纵向的深度控制或许是提高元件制作精度的一种有效途径。

### 3.4 提高色散率

色散光栅的原理图如图 6 所示,当用深蚀刻技术加深光栅刻槽深度时,从而提高了光栅的闪耀角,这样一来,就有可能在较高衍射级次使用该光栅。由光栅角色散率公式:

$$\frac{\delta\theta}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (24)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $\theta$  为衍射角,  $m$  为衍射级次。由于提高了  $m$  的值,  $\theta$  值相应增大,  $\cos(\theta)$  则减小,从而提高了角色散率  $\delta\theta/\delta\lambda$  和相应的线色散  $\delta l/\delta\lambda$ 。

因此深蚀刻技术可提高色散元件的色散率,这种特性在折衍混合系统的设计中对消像差尤其有用。同时由图 6(a) 与图 6(b) 比较可知,深蚀刻可使系统装置紧凑化。

**结束语** 本文提出了一种深蚀刻二元光学元件,并给出了这种元件特性的初步研究结果,即深蚀刻元件具有焦距缩短效应、可提高元件的相对孔径、可作 fast 透镜、可提高元件的色散率以及能够降低对制作系统的精度要求。可望在 fast 带宽透镜列阵、分色光学以及焦平面微透镜列阵等方面获得新的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Wilfrid B. Veldkamp. Overview of microoptics: past, present, future. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 287 ~ 299
- [2] Michael W. Farn, Margaret B. Stem, Wilfrid B. Veldkamp *et al.*. Color separation by use of binary optics. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1214~ 1216
- [3] Margaret B. Stem, Shirley S. Medeiros. Deep three-dimensional microstructure fabrication for infrared binary optics. *J. Vac. Sci. & Technol. B.*, 1992, **10**(6): 2520~ 2525
- [4] 徐 平, 张晓春, 周 祥等. 二元光学元件制作误差分析与模拟, *光学学报*, 1996, **16**(6): 833~ 838
- [5] Ping Xu, Xiang Zhou, Xiaochun Zhang *et al.*. Optical perfect shuffle interconnection using computer-generated blazed grating array. *Opt. Rev. (Japan)*, 1995, **2**(5): 362~ 365

## Deep Etch Binary Optics Element

Xu Ping Tan Jiyue Guo Lurong Guo Yongkang Yang Jiafa  
(Information Optics Institute of Sichuan University, Sichuan Chengdu 610064)

Jiang Niangyun Li Zhan Du Chunlei

(The State Laboratory for Optical Technologies on Microfabrication,  
Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Science, Chengdu 610209)

(Received 26 September 1995; revised 22 January 1996)

**Abstract** A novel deep-etch binary optics element with phase depth exceeded  $2\pi$  is developed. The relationship between deep-etch binary element and diffractive efficiency is analysed theoretically and simulated by computer. The preliminary results about characteristics of the deep-etch binary optics element are obtained.

**Key words** deep-etch, diffractive optics, binary optics, element.

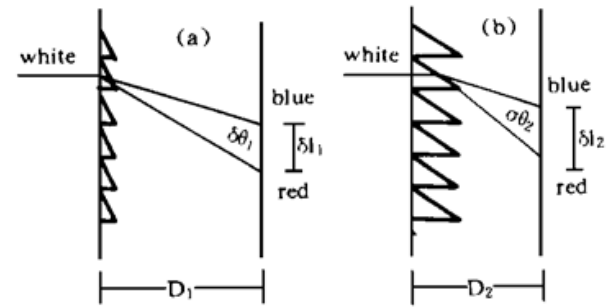


Fig. 6 Enhancing dichroic with deep-etch technique  
(a) before deep-etch; (b) after deep-etch