

# 均光消色散光束整形薄膜器件的研究

谢桂捷<sup>1,2</sup>, 范长江<sup>1,2</sup>, 杨鑫<sup>3</sup>, 邵杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004;

<sup>2</sup>浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004;

<sup>3</sup>苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006

**摘要** 基于亥姆霍兹-基尔霍夫衍射积分定理, 从理论上推导出消色散均光薄膜微结构参量、入射光参数和透射光参数之间的关系。基于此, 分析了微结构参量对透射光振幅分布和散射角度的影响。光束通过消色散均光薄膜时, 散射光斑具有光强分布均匀、消色散、散射角度可控和散射光型可控等优点。实验制作出结构最大深度为 5  $\mu\text{m}$ , 散射角为  $8^\circ \times 7.5^\circ$  的薄膜样品, 散射角的理论计算值与实际测量值误差在  $\pm 0.5^\circ$  以内。此薄膜器件适用于照明体系、液晶显示器背光显示、投影系统等。

**关键词** 薄膜; 薄膜器件; 消色散; 光束整形; 均光; 散射角

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0503001

## Study on Achromatic Uniform Light Beam Shaping Thin Film Devices

Xie Guijie<sup>1,2</sup>, Fan Changjiang<sup>1,2</sup>, Yang Xin<sup>3</sup>, Shao Jie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China;

<sup>3</sup>Institute of Information Optics Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 210056, China

**Abstract** Based on Helmholtz-Kirchhoff diffraction integral theorem, the relationship among micro-structure parameters, incident light parameters and transmission light parameters of achromatic uniform light thin film are theoretically derived. The influences of micro-structure parameters on transmission light amplitude distribution and scattering angle are analyzed. When light beam passes through the achromatic uniform light thin film, the scattering light spot has many advantages such as uniform light intensity distribution, achromatism, controllable scattering angles and wave shape. The thin film with the maximum depth of 5  $\mu\text{m}$  and scattering angle of  $8^\circ \times 7.5^\circ$  is fabricated. The error of measured scattering angle and the theoretical angle is within  $\pm 0.5^\circ$ . The designed thin films can be used in illumination, LCD backlight display, projection system as well as other applications.

**Key words** thin films; thin-film devices; achromatism; beam shaping; uniform light; scattering angles

**OCIS codes** 310.6845; 140.3300; 290.5880; 230.4000

## 1 引言

光通过随机粗糙表面会发生光散射, 随机表面的微结构特性影响着散射光场的相关性质。常见的散射器件有毛玻璃扩散板, 一般用砂轮磨毛处理, 表面呈颗粒随机结构, 其光能的透射率低、散射角度难控制、散射光呈高斯分布, 限制了其应用的广泛性。Lu Y T 等<sup>[1]</sup>利用光刻胶板记录激光经过毛玻璃的远场散射光

收稿日期: 2016-12-13; 收到修改稿日期: 2017-02-08

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY14D050001)

作者简介: 谢桂捷(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事微光学元件设计与制作等方面的研究。

E-mail: 674198824@qq.com

导师简介: 范长江(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事二元光学、LED 应用照明等方面的研究。

E-mail: fancj@zjnu.cn(通信联系人)

斑,再经过显影,在光刻胶板表面形成凹凸结构,成功制备出具有大视角、高增益和较强光束整形能力的散射薄膜器件,即全息散射器<sup>[2-3]</sup>。虽然全息散射器的散射角度能够较好地控制散射光斑形状,但散射场光强呈高斯分布。衍射光学元件(DOE)<sup>[4-6]</sup>,利用计算机设计衍射图形,采用微加工技术在基片上刻蚀产生多个台阶深度的浮雕结构,可将入射光束整形为光强均匀分布的各种形状。然而衍射光学元件只能用于设计波长,不能适用于宽波段光束整形,且散射角度相对较小,不适于大散射角度,特别是其仅适用于窄光谱,随着入射光波长偏离设计波长,其衍射效率急剧下降。微透镜阵列<sup>[7-9]</sup>的表面微结构是周期性分布的凸透镜,在照明系统应用中对光能利用率高,对光强匀化能力很强,可将高斯型光束整形为平顶型,但是光斑存在色散现象。Méndez等<sup>[10-13]</sup>通过理论研究,设计出在一定空间范围内散射光强均匀分布的随机表面。本文在此基础上,详细推导出表面微结构设计参数与散射角度、散射光强分布和散射形状之间的关系,微结构单元轮廓设计为“V”型,其结构参量满足均匀概率密度分布,光束通过此器件,能实现在任意散射角度内产生矩形或者圆形的均匀散射光斑,且光斑具有消色散特性。实验测量了薄膜样品结构参量,计算表明散射角的理论计算值和实际测量值相符,验证了理论的正确性。

## 2 基本原理

### 2.1 随机表面光散射理论分析

用亥姆霍兹-基尔霍夫衍射积分处理随机表面光散射问题。图1给出一维粗糙表面光散射示意图,把整个体系分为两部分,上半空间 $z > s(x, y)$ 为真空,下半空间 $z < s(x, y)$ 为介质, $z = s(x, y)$ 是表面的轮廓函数。光波可用电矢量 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 表示,它满足亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{r} = x\mathbf{x}_0 + y\mathbf{y}_0 + z\mathbf{z}_0$ 为空间某点, $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$ 为单位基矢。入射波矢为 $\mathbf{k}_i = \mathbf{k}_x + \mathbf{k}_y + \mathbf{k}_z$ ,散射波矢为 $\mathbf{k}'_s$ 。采用格林函数法可得出散射场积分方程<sup>[14]</sup>

$$E_s(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{+\infty} ds' \left[ \frac{\partial G(\mathbf{r}/\mathbf{r}')}{\partial n'} E(\mathbf{r}') - G(\mathbf{r}/\mathbf{r}') \frac{\partial E(\mathbf{r}')}{\partial n'} \right]_{z=s(x', y')}, \quad (2)$$

(2)式与基尔霍夫衍射积分完全等价,式中 $G(\mathbf{r}/\mathbf{r}')$ 是沿 $z$ 方向傅里叶展开的格林函数。设入射到随机表面的平面波为

$$E_{inc}(\mathbf{r}) = a_0 \exp(ik_x x + ik_y y - ik_z z), \quad (3)$$

由电磁波在粗糙表面散射理论可知, $s$ 偏振光波 $E_{inc}(\mathbf{r})$ 在介质分界面 $z = s(x, y)$ 处,须满足狄利克雷边界条件,从而可求出(2)式的标量解,化简可得散射光波

$$E_s(\mathbf{r}) = \iint dk'_x dk'_y R_s \exp(ik'_x x + ik'_y y + ik'_z z), \quad (4)$$

式中散射振幅 $R_s$ 为

$$R_s = \frac{a_0 \chi_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dx' dy' \exp[i(k_x - k'_x)x' + i(k_y - k'_y)y' - ik_b s(x', y')], \quad (5)$$

式中 $k_b = k_z + k'_z$ ,  $\chi_0 = -\frac{1 + \cos \theta_i \cos \theta_s - \sin \theta_i \sin \theta_s \cos(\phi_s - \phi_i)}{\cos \theta_s (\cos \theta_i + \cos \theta_s)}$ ,  $\phi$ 是方位角。可知散射振幅 $R_s$ 与入射光振幅 $a_0$ 、入射角、散射角、波数及表面轮廓有关。为了描述散射光强的相对大小,引入平均微分散射系数 $\partial R_s / \partial \Omega$  ( $\Omega$ 是立体角),定义为散射立体角 $d\Omega$ 内散射光通量与被照粗糙表面的平均入射总通量之比。平均微分散射系数<sup>[13]</sup>为

$$\langle \frac{\partial R_s}{\partial \Omega} \rangle = \frac{\chi_0^2 \cos^2 \theta_s R_s^2}{a_0^2 \cos \theta_i \lambda L_1 \lambda L_2}, \quad (6)$$

式中 $L_1$ 和 $L_2$ 分别是 $x$ 和 $y$ 轴向被照面长度。把二维随机表面看成 $x$ 和 $y$ 轴上两个完全独立的随机过程,由(5)式可知散射光强 $R_s^2 = \left(\frac{a_0 \chi_0}{2\pi}\right)^2 I_x I_y$ ,而 $I_x$ 可以表达为

$$I_x = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} d\nu \exp[i(k_x - k'_x)\nu] \times \exp\{ik_b[s_0(x') - s_0(x)]\}, \quad (7)$$

对(7)式进行数学上的变换,  $x$  和  $x'$  是横轴十分邻近的坐标,  $s_0(x)$  是  $x$  轴向轮廓函数,  $\nu = x' - x$ ,  $d\nu = dx'$ 。从(7)式可知表面微结构的轮廓影响着散射光强分布。

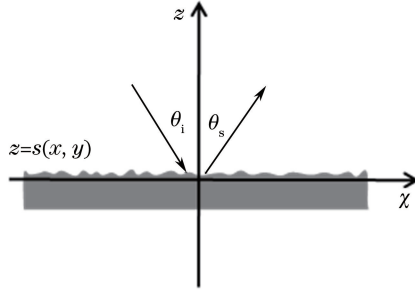


图 1 一维粗糙表面的光散射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of light scattering on one-dimensional rough surface

### 2.2 表面微结构的设计

假设随机轮廓函数是可微、单值函数。设表面微结构轮廓函数为

$$s(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n [s_0(x - nd) + s_0(y - nd)], \quad (8)$$

式中  $c_n$  是随机数, 满足概率密度函数  $f(\gamma)$  分布。整个微表面由连续随机微结构单元构成。以  $x$  轴向为例,  $s_0(x)$  是  $x$  轴向轮廓函数

$$s_0(x) = c_{n+1}(\pm 1)m_x x - H_{n+1}, \quad d_n < x < d_{n+2}. \quad (9)$$

图 2 给出微结构轮廓, 可知微结构单元轮廓设计为“V”型,  $H$  是结构的深度,  $d$  是微结构口径尺寸, 口径形状可设计为圆形或者矩形。  $m_x = 2H/d$  是结构表面斜度,  $n(0, 1, \dots)$  是正整数, 由(9)式可得出

$$s_0(x') - s_0(x) = c_{n+1}(\pm 1)m_x \nu \quad d_n < x < d_{n+2}. \quad (10)$$

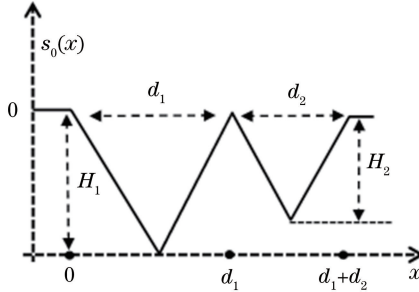


图 2 微结构轮廓

Fig. 2 Microstructure profile

### 2.3 薄膜器件均光、消色散性质

把(10)式代入(7)式后, 对  $x$  从  $(0, L_1)$  积分得

$$I_x = L_1 \int_{-\infty}^{\infty} d\nu \exp[i(k_x - k'_x)\nu] \times \exp\left[ik_b \nu \sum_{n=0}^{\infty} c_{n+1}(\pm m_x)\right], \quad (11)$$

根据统计学中随机变量均值的定义, 式中  $\exp\left[ik_b \nu \sum_{n=0}^{\infty} c_{n+1}(\pm m_x)\right]$  为

$$\exp\left[ik_b \nu \sum_{n=0}^{\infty} c_{n+1}(\pm m_x)\right] = \int_{-\infty}^{\infty} f(\gamma) \exp(\pm ik_b \nu m_x \gamma) d\gamma, \quad (12)$$

引入狄拉克  $\sigma$  函数的傅里叶积分变换

$$2\pi\sigma(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ikx) dk, \quad (13)$$

再利用  $\sigma$  函数的挑选性和伸缩性

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\delta(x-a)dx = f(a), \quad \sigma(ax) = \frac{1}{|a|}\sigma(x), \quad (14)$$

由(12)、(13)、(14)式化简(11)式后,可得出在远场的平均散射光强为

$$R_s^2 = \left(\frac{a_0\chi_0}{2\pi}\right)^2 \frac{2\pi L_1}{k_b m_x} \left[ f\left(\frac{k'_x - k_x}{k_b m_x}\right) \right] \times \frac{2\pi L_2}{k_b m_y} \left[ f\left(\frac{k'_y - k_y}{k_b m_y}\right) \right], \quad (15)$$

再把(15)式代入(6)式中,则平均微分散射系数可表示为

$$\left\langle \frac{\partial R_s}{\partial \Omega} \right\rangle = \frac{\chi_0^2 \cos^2 \theta_s}{4 \cos \theta_i m_x m_y} \left[ f\left(\frac{k'_x - k_x}{k_b m_x}\right) \right] \times \left[ f\left(\frac{k'_y - k_y}{k_b m_y}\right) \right]. \quad (16)$$

由(16)式可知用来描述散射光强均匀性的散射系数还与概率密度函数  $f(\gamma)$  有关。若在一定空间范围内,散射光强大小恒定,则散射系数应是某定值,由此  $f(\gamma)$  应为均匀概率密度函数。均匀概率密度函数可用矩形函数表示,即

$$f(\gamma) = \text{rect}(\gamma), \quad \gamma < \left| \frac{1}{2} \right|, \quad (17)$$

控制光波的入射角和散射角度在  $20^\circ$  以下 ( $\cos 20^\circ \approx 0.94$ ), 可以近似为  $\cos \theta_i \approx 1, \cos \theta_s \approx 1, \sin \theta_i \approx \theta_i \text{ rad}, \sin \theta_s \approx \theta_s \text{ rad}, k_b \approx 2\omega/c, \chi_0^2 \approx 1$ , 化简(16)式后得

$$\left\langle \frac{\partial R_s}{\partial \Omega} \right\rangle \approx \frac{d_x d_y}{16 H_m^2} \times \text{rect} \left[ \frac{\theta_{xs} - \theta_{xi}}{2(2H_m/d_x)} \right] \times \text{rect} \left[ \frac{\theta_{ys} - \theta_{yi}}{2(2H_m/d_y)} \right] \approx \frac{d_x d_y}{16 H_m^2}, \quad \theta_{-m} < \theta_s < \theta_m, \quad (18)$$

式中  $\theta_{xs}, \theta_{ys}$  分别是  $x$  和  $y$  轴向的散射角,  $\theta_{xi}, \theta_{yi}$  分别是  $x$  和  $y$  轴向的入射角,  $d_x$  和  $d_y$  是微结构口径尺寸,  $H_m$  是结构最大深度。由于  $\frac{\theta_{xs} - \theta_{xi}}{2(2H_m/d_x)} < \frac{1}{2}, \frac{\theta_{ys} - \theta_{yi}}{2(2H_m/d_y)} < \frac{1}{2}$ , 所以由矩形函数性质可得最大散射角度

$$\begin{cases} \theta_{xm} = \frac{2H_m}{d_x} \text{ rad} \\ \theta_{ym} = \frac{2H_m}{d_y} \text{ rad} \end{cases} \quad (19)$$

从(18)式可知平均微分散射系数与微结构口径尺寸和最大深度有关,且在最大散射角度内散射系数为某定值,表明散射光斑光强分布均匀。表面微结构的深度  $H$ 、口径尺寸  $d$  都满足均匀概率密度函数分布。从(19)式可知最大散射角度由结构最大深度  $H_m$  与口径尺寸  $d$  的比值决定,与入射光波长无关,当一束复色光通过这样设计的薄膜器件发生散射后,远场散射光斑的边缘不会出现色光的分解现象,因此具有消色散的特性。

### 3 光斑形状、散射角度的控制

由表面轮廓函数(8)式可知整个二维随机表面轮廓是随机线性函数组合,大量随机微结构单元组成粗糙表面。设计微结构口径为矩形,口径尺寸  $d_x \neq d_y$ , 表面为矩形的随机微柱面透镜如图 3 所示,则远场散射光斑形状为矩形。设计微结构口径为圆形,口径尺寸  $d_x = d_y$ , 表面为圆形的随机微透镜阵列如图 4 所示,则远场散射光斑形状为圆形。因此,散射光斑形状取决于微结构单元口径形状。

由(19)式最大散射角的表达式可知,可通过调整微结构口径尺寸  $d$  和最大深度  $H_m$  来控制最大散射角度  $\theta_m$ , 从而限定散射光斑空间分布。表 1~4 是对不同结构口径尺寸均值  $d'$  和最大深度  $H_m$  的组合,计算出的最大散射角。

表 1  $\theta_0 = 0, d'_x = d'_y = 80 \mu\text{m}$ 、方形口径时的最大散射角

Table 1 Maximum scattering angle with  $\theta_0 = 0, d'_x = d'_y = 80 \mu\text{m}$  and square caliber

$H_m$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	7 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$
$\theta_{xm} = \theta_{ym}$	2.8°	4.3°	5.7°	7.2°	8.6°	10°	11.5°

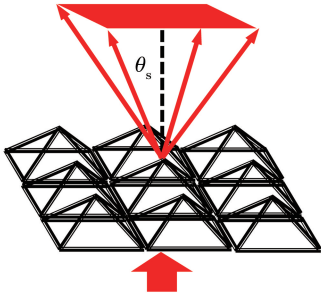


图 3 微结构口径为矩形

Fig. 3 Rectangular microstructure calibrator

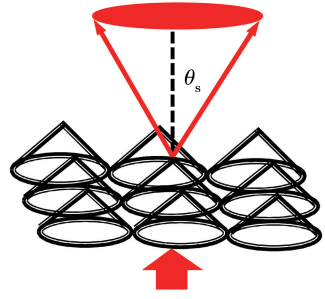


图 4 微结构口径为圆形

Fig. 4 Circular microstructure calibrator

表 2  $\theta_0=0, d'_x=60 \mu\text{m}, d'_y=80 \mu\text{m}$ 、矩形口径时的最大散射角

Table 2 Maximum scattering angle with  $\theta_0=0, d'_x=60 \mu\text{m}, d'_y=80 \mu\text{m}$  and rectangular calibrator

$H_m$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	7 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$
$\theta_{xm}$	3.4°	5.7°	7.6°	9.5°	11.5°	13.3°	15.3°
$\theta_{ym}$	2.9°	4.3°	5.7°	7.2°	8.5°	10°	11.5°

表 3  $\theta_0=0, H_m=6 \mu\text{m}$ 、方形、矩形口径时的最大散射角

Table 3 Maximum scattering angle with  $\theta_0=0, H_m=6 \mu\text{m}$ , square and rectangular calibrator

$d'_x$	152 $\mu\text{m}$	106 $\mu\text{m}$	76 $\mu\text{m}$	160 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	114 $\mu\text{m}$
$d'_y$	152 $\mu\text{m}$	106 $\mu\text{m}$	76 $\mu\text{m}$	138 $\mu\text{m}$	92 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$
$\theta_{xm} \times \theta_{ym}$	4.5° × 4.5°	6.5° × 6.5°	9° × 9°	4° × 5°	5.5° × 7.5°	6° × 10°

表 4  $\theta_0 \neq 0, d'_x=d'_y=100 \mu\text{m}, H_m=5 \mu\text{m}, \theta_{xm}=\theta_{ym}=5.7^\circ$ 、方形口径时的最大散射角

Table 4 Maximum scattering angle with  $\theta_0 \neq 0, d'_x=d'_y=100 \mu\text{m}, H_m=5 \mu\text{m}, \theta_{xm}=\theta_{ym}=5.7^\circ$  and square calibrator

$\theta_0$	1°	3°	5°	7°	9°
$\theta_{xs}=\theta_{ys}$	6.7°	8.7°	10.7°	12.7°	14.7°

表 1 和表 2 为控制微结构口径尺寸和口径形状一定,且平行光束垂直微表面入射时,不同微结构深度  $H_m$  对应的透射光束散射角,可知最大散射角度  $\theta_m$  随深度  $H_m$  加深而变大。表 3 为控制微结构最大深度  $H_m$  和口径形状一定,且平行光束垂直微表面入射时,不同微结构口径尺寸对应的透射光束散射角,可知结构口径尺寸越小,散射角度  $\theta_m$  越大。表 4 为控制微结构口径尺寸、形状和深度都一定时,平行光束以不同角度入射对应的透射光束散射角。计算出薄膜器件的最大散射角度为  $\theta_{xm}=\theta_{ym}=5.7^\circ$ ,透射光束散射角度  $\theta_s$  由光源发光半角  $\theta_0$  和薄膜器件的最大散射角度  $\theta_m$  共同决定,由数值可知: $\theta_s$  随着  $\theta_0$  的增大而增大。

## 4 实验过程

图 5 为制作薄膜器件的实验光路。首先将玻璃基板经超声清洗机清洗,待其烘干后在基板表面涂上 AZP4620 光刻胶,匀胶机转速分别设置为 500,800,1300 r/min,所对应的旋转时间分别为 5,10,35 s,最后对涂好的胶板进行烘胶,温度设置为 90 °C,烘胶时间为 10 min,最终胶厚为 12  $\mu\text{m}$ 。实验室采用半导体激光器,工作波长为 405 nm,最大输出功率为 250mW。激光束首先经过一块柱面透镜后聚焦,接着经过旋转的毛玻璃破坏激光的相干性,再通过宽  $l \approx 200 \mu\text{m}$  的狭缝,最后经数值孔径为  $NA=0.40(\times 20)$  的显微物镜的作用,在光刻胶板上形成一个近似于小矩形的非相干像,其尺寸为  $d_x \times d_y$ ,通过调整物镜与光刻胶之间的距离,可以控制小矩形的尺寸大小。光刻胶板被安放在三维精密移动平台上,以逐点曝光的方式沿着  $x$  轴向移动,每次移动长度为  $d_x$ ,光刻胶面上的微结构曝光量与其显影深度呈一次线性关系<sup>[15]</sup>,即

$$H(x) = k_0 C_e T \left[ \left( \pm \frac{E_0}{0.5d_{n+1}} \right) x + E_0 \right], \quad d_n < x < d_{n+2}, \quad (20)$$

式中  $k_0$  为曝光与显影过程的比例常数,  $C_e$  是显影液浓度,  $T$  是显影时间,  $E_0 = I_0 \times t$  是曝光量,  $I_0$  是每个曝光位置的光强。曝光量是光强与曝光时间的乘积,因此曝光时间  $t_0$  的随机性反映出曝光量的随机性,进而决定了显影后微结构的结构参量随机分布。通过计算机生成满足均匀概率分布的随机数字组,利用此数字

组控制光刻胶面上的曝光时间。曝光完毕后,经显影可得出实验样品。表 5 为激光输出功率在 80 mW,满足均匀概率分布的随机曝光时间在[2 s,15 s]之间,NaOH 显影液体积分数为 1%实验工艺参数和实验结果。

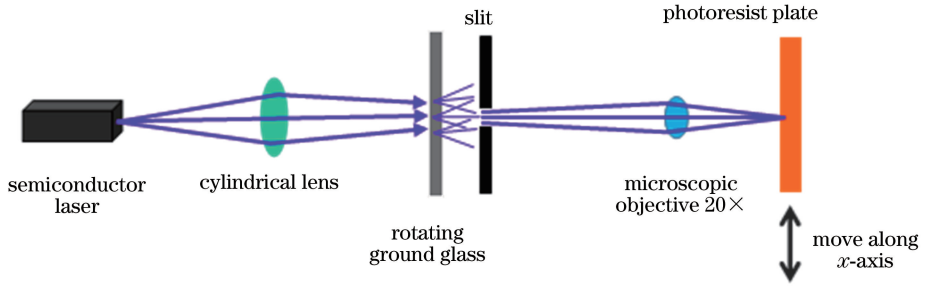


图 5 制作薄膜器件的实验装置

Fig. 5 Experimental setup for thin-film devices fabrication

表 5 实验参数和结果

Table 5 Experimental parameters and results

Parameter	Value			
Speckle patterns	a	b	c	d
Development time $T$	32 s	32 s	39 s	35 s
Caliber size mean $d'_x \times d'_y$	$65 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$	$75 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$	$75 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$	$75 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$
Theoretical angle $\theta_{x_m} \times \theta_{y_m}$	$9.5^\circ \times 4.2^\circ$	$7.7^\circ \times 7.2^\circ$	$10.7^\circ \times 6.5^\circ$	$9^\circ \times 5.3^\circ$
Measured angle $\theta_{x_m} \times \theta_{y_m}$	$9^\circ \times 4^\circ$	$8^\circ \times 7.5^\circ$	$11^\circ \times 6.5^\circ$	$9^\circ \times 5.5^\circ$

图 6 为波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$  激光通过薄膜器件的远场散射光斑图,从图中可见其为光强均匀分布的矩形散射光斑,其所对应的散射角测量值分别是  $9^\circ \times 4^\circ$ 、 $8^\circ \times 7.5^\circ$ 、 $11^\circ \times 6.5^\circ$ 、 $9^\circ \times 5.5^\circ$ 。光刻胶板的曝光方式以逐点曝光进行,有些相邻曝光点的随机曝光时间长,显影后相邻的微结构间有少量的重叠,导致结构口径形状为不规则的矩形,造成矩形散射光斑边缘不规则。实验的相关制作参数如表 5 所示,图 6(a)和(b)的实验样品的微结构口径尺寸不同,其他参数如输出功率、曝光时间、显影浓度、显影时间设置相同,通过改变口径尺寸来控制透射光束散射角;图 6(c)和(d)的实验样品参数如输出功率、曝光时间、显影浓度、结构口径尺寸设置相同,而显影时间不同,则结构深度不同,通过改变结构深度来控制透射光束散射角。表 5 中实际测量的角度  $\theta_{x_m} \times \theta_{y_m}$  验证了通过调整微结构口径尺寸和深度来控制散射角的结论的正确性。

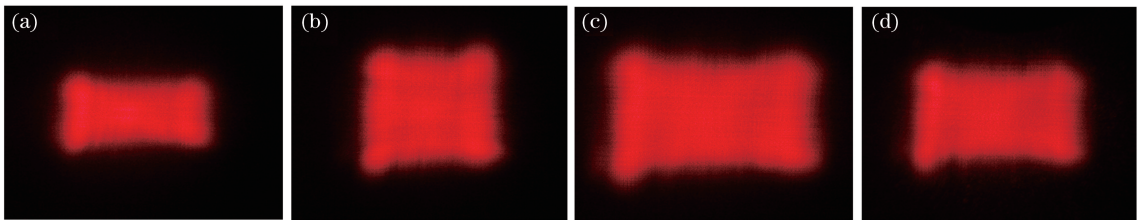


图 6 不同参数下的矩形散射光斑图。(a) 散射角测量值为  $9^\circ \times 4^\circ$ ; (b) 散射角测量值为  $8^\circ \times 7.5^\circ$ ;  
(c) 散射角测量值为  $11^\circ \times 6.5^\circ$ ; (d) 散射角测量值为  $9^\circ \times 5.5^\circ$

Fig. 6 Rectangular scattering speckles with different parameters. (a) Measured scattering angle is  $9^\circ \times 4^\circ$ ; (b) measured scattering angle is  $8^\circ \times 7.5^\circ$ ; (c) measured scattering angle is  $11^\circ \times 6.5^\circ$ ; (d) measured scattering angle is  $9^\circ \times 5.5^\circ$

图 7 是图 6(b)的实验样品在激光共聚焦显微镜下的微结构三维形貌,可看出每个结构的大小和高度都不同,表面最大深度  $H_m = 5 \mu\text{m}$ ,且与设计的口径尺寸  $d_x \times d_y = 75 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$  相符,图 8 是通过台阶仪测量出图 6(b)的实验样品表面轮廓,可看出微结构单元轮廓近似于理论设计的“V”型,口径尺寸均值为  $d'_y = 80 \mu\text{m}$ ,依据 (19)式计算出散射角度理论值  $\theta_{x_s} \times \theta_{y_s} = 7.7^\circ \times 7.2^\circ$ ,实际测量值  $\theta_{x_s} \times \theta_{y_s} = 8^\circ \times 7.5^\circ$ ,误差在  $\pm 0.5^\circ$  以内,表明实验测量结果与理论计算几乎吻合。由于共聚焦显微镜所选取测量的微结构表面范围较小,导致结构最大深度  $H_m$  的测量存在偏差,以及在显影过程中溶液含有的微小杂质会附着在结构表面较难洗清,因此器件的制作误差对结构参量的测量也存在一定的影响。

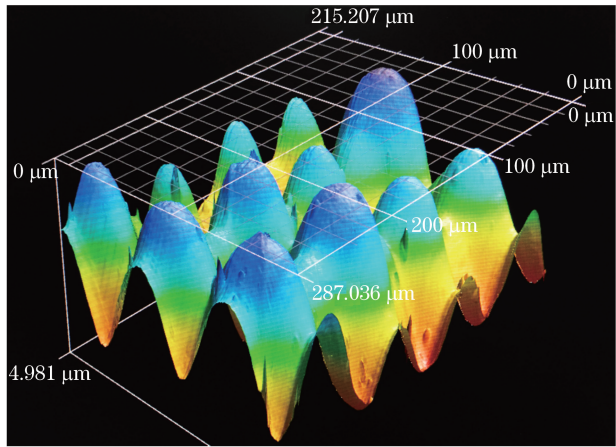


图 7 微结构三维形貌

Fig. 7 Three-dimensional morphology of microstructure

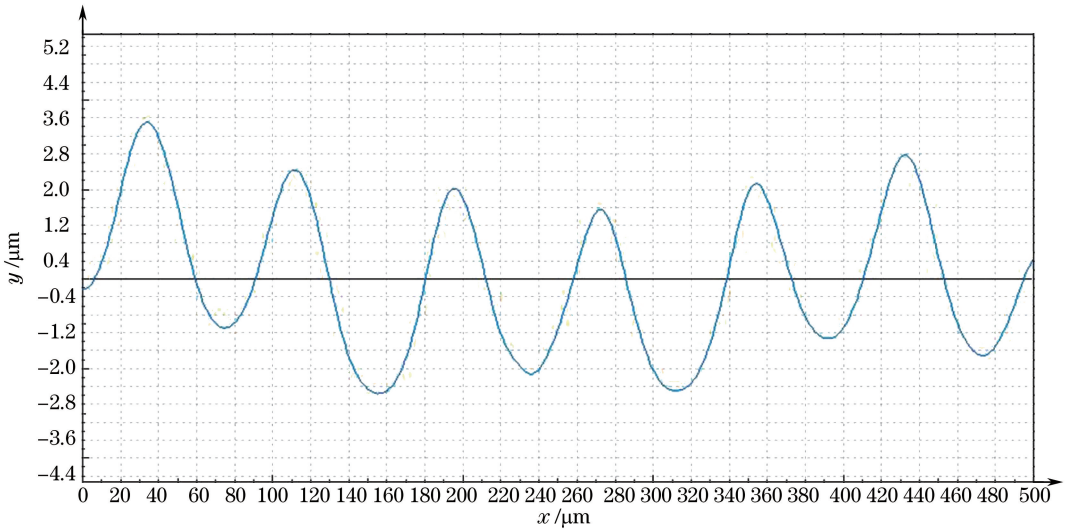


图 8 样品的表面轮廓

Fig. 8 Surface profile of the sample

## 5 结 论

基于亥姆霍兹-基尔霍夫衍射积分定理,从理论上推导出薄膜器件微结构的结构参量与散射光强分布、散射角度的关系式。基于此,分析了微结构的口径尺寸  $d$  和深度  $H$  对散射角度的影响,通过调整微结构的最大深度  $H_m$  和口径尺寸  $d$  可有效控制透射光束的散射角。微结构的轮廓设计为“V”型、口径形状设计为圆形或者矩形、口径尺寸  $d$  在  $50\sim 150\ \mu\text{m}$  之内、最大深度  $H_m$  在  $2\sim 10\ \mu\text{m}$  之间,其结构参量满足均匀概率密度函数分布,光束通过此器件产生圆形或者矩形、光强分布均匀、具有消色散特性的散射光斑。实验制作出产生矩形散射光斑的薄膜器件,共聚焦显微镜测量出器件表面的微结构口径尺寸为  $75\ \mu\text{m}\times 80\ \mu\text{m}$ 、最大深度为  $5\ \mu\text{m}$ ,计算表明散射角的理论计算值与实际测量值的误差在  $\pm 0.5^\circ$  以内,证明结构参量可准确控制透射光束散射角。

## 参 考 文 献

- [1] Lu Y T, Chi S. Fabrication of light-shaping diffusion screens[J]. Optics Communications, 2002, 214(1-6): 55-63.
- [2] Ganzherli N M, Gulyaev S N, Maurer I A. The formation of phase relief structures during holographic diffuser recording on silver halide emulsions[J]. High Energy Chemistry, 2008, 42(7): 540-542.
- [3] Yu C, Peng Y, Guo T, *et al.* Holographic diffuser design for multi-band beam shaping[J]. Sid Symposium Digest of

- Technical Papers, 2016, 47(1): 833-836.
- [4] Qu W D, Gu H R, Tan Q F, *et al.* Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping[J]. Applied Optics, 2015, 54(21): 6521-6525.
- [5] Song Qiang, Zhu Jing, Wang Jian, *et al.* A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off-axis lithography illumination system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122005.  
宋 强, 朱 菁, 王 健, 等. 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122005.
- [6] Stankevičius E, Gečys P, Gedvilas M, *et al.* Laser processing by using diffractive optical laser beam shaping technique [J]. Journal of Laser Micro, 2011, 6(1): 37-43.
- [7] Lee X H, Moreno I, Sun C C. High-performance LED street lighting using microlens arrays [J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10612-10621.
- [8] Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Yin Zhiyong, *et al.* Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502009.  
雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502009.
- [9] Xiao Yanfen, Zhu Jing, Yang Baoxi, *et al.* Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0216001.  
肖艳芬, 朱 菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0216001.
- [10] Méndez E R, Leskova T A, Maradudin A A, *et al.* Design of two-dimensional random surfaces with specified scattering properties[J]. Optics Letters, 2004, 29(24): 2917-2919.
- [11] Leskova T A, Maradudin A A, García-Guerrero E E, *et al.* Structured surfaces as optical metamaterials [J]. Metamaterials, 2007, 1(1): 19-39.
- [12] Maradudin A A, Leskova T A, Méndez E R. Two-dimensional random surfaces that act as circular diffusers[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 72-74.
- [13] Méndez E R, García-Guerrero E E, Escamilla H M, *et al.* Photofabrication of random achromatic optical diffusers for uniform illumination[J]. Applied Optics, 2001, 40(7): 1098-1108.
- [14] Liu Chunxiang, Cheng Chuanfu, Ren Xiaorong, *et al.* Green's function method of light scattering from random surfaces compares with Kirchhoff's approximation[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(2): 427-435.  
刘春香, 程传福, 任晓荣, 等. 随机表面散射光场的格林函数法与基尔霍夫近似的比较[J]. 物理学报, 2004, 53(2): 427-435.
- [15] Zeng Hongjun, Du Chunlei, Wang Yongru, *et al.* Profile control of continuous relief MOE in photoresist[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(5): 691-696.  
曾红军, 杜春雷, 王永茹, 等. 连续微光学元件在光刻胶上的面形控制[J]. 光学学报, 2000, 20(5): 691-696.