

# 二元矩形位相光栅用于高斯光束的空间整形

张新平 董丽萍 张保华

(核工业理化工程研究院, 天津, 300180)

**摘要:** 本文研究了透射式二元矩形位相光栅实现高斯光束空间整形的基本原理, 并作了理论推导; 提出了光栅加工的技术指标, 对实验工作作了具体描述, 并分析了实验结果。透射式二元矩形位相光栅的主要技术指标为: 栅槽宽度: 1.5mm; 栅槽深度: 0.55 $\mu\text{m}$ ; 光栅有效尺寸: 15mm; 透射率: 大于 90%; 波长覆盖: 0.55 $\mu\text{m}$ ~0.65 $\mu\text{m}$ ; 破坏阈值: 平均功率 10W。整形参数: 功率效率: 大于 75%; 能量效率: 大于 90%; 衍射距离要求: 大于 10m; 整形后光束强度的径向非均匀起伏: 小于 9.3%。

**关键词:** 透射式二元矩形位相光栅 高斯光束 空间整形 均匀化

## Binary rectangular phase gratings applied to spatial shaping of Gaussian beam

Zhang Xinping, Dong Liping, Zhang Baohua

(Institute for Physical and Chemical Engineering)

**Abstract:** The study of basic principle and the theoretical analysis of the transmitted binary rectangular phase gratings for spatial shaping of Gaussian beam are presented in this paper. Practically, it is important to make the binary rectangular gratings. So the technical specifications of the gratings are summarized, and the experimental works and the experimental results are analyzed in details. Technical indices for the transmitted binary rectangular phase grating: width of the grating groove: 1.5mm; depth of the grating groove: 0.55 $\mu\text{m}$ ; effective size of the grating: 15mm; transmittivity: >90%; wavelength coverage: 0.55 $\mu\text{m}$ ~0.65 $\mu\text{m}$ ; damage threshold: 10W on average. Shaping parameters: power efficiency: >75%; energy efficiency: >90%; diffraction distance: >10m; radial fluctuation of beam intensity after shaping: <9.3%.

**Key words:** transmitted binary rectangular phase grating Gaussian beam spatial shaping uniformation

## 一、引言

激光的日益广泛应用, 对其光束质量提出了各种不同的要求, 而均匀性又是许多应用领域中一个比较普遍的要求。但具有高斯分布特性的激光束在实际应用中, 严重影响了预期效果,

因此,对此类光束在其径向截面内加以空间整形是非常必要而有意义的。

这里,我们在参考有关文献的基础上,进一步探讨了透射式二元矩形位相光栅实现高斯光束空间整形的基本原理,并作了理论分析计算,在此基础上,改变了此类光栅的传统加工方法——照相蚀刻法,提出了镀膜法加工光栅的新方法,降低了加工难度和成本,并制作了实际的整形器件,进行了实验工作,对实验结果作了分析,证明了这一技术的可行性和显著效果,也证实了我们采用的制作方法是成功的。

## 二、基本 原 理

根据数学上的傅立叶变换性质,一维函数  $\text{sinc}(x) = \sin x/x$  的傅立叶变换为矩形分布,而二维函数  $\text{Bessinc}(r) = J_1(r)/r$  (其中  $J_1(r)$  为一阶 Bessel 函数,  $r$  为径向坐标变量) 的傅立叶变换为柱对称平顶分布。基于上述理论,如果先将高斯光束在某一径向截面内的振幅分布变换为与函数  $\text{sinc}(x)$  或  $\text{Bessinc}(r)$  相近的分布形式,然后对该截面作光学傅立叶变换,则可实现高斯光束的均匀化。

1. 利用透射式二元矩形位相光栅完成高斯光束的振幅变换<sup>[1]</sup>

利用透射式二元矩形位相光栅,在光束的某一径向截面内,对高斯光束的复振幅作空间位相调制,使其分布与函数  $\text{sinc}(x)$  或  $\text{Bessinc}(r)$  相接近。

与一维位相调制和二维位相调制相对应的光栅外形的俯视图分别如图 1a, 图 1b 所示,其剖面图如图 2 所示。

下面讨论中,我们仅按一维情况进行分析。如图 2 所示,我们采用的这种二元矩形位相光栅的特点在于,中心位置处,矩形浮凸的宽度为其它位置处的二倍,其它位置处栅槽宽度与浮凸宽度相等,且光栅为全透式。

我们定义以下参数:光栅周期为  $2A$ ; 栅槽的实际深度为  $d$ , 位相深度为  $\varphi$ ; 光栅浮凸材料的折射率为  $n$ , 环境(空气)的折射率为  $n_0$ ; 入射光波长为  $\lambda$ ; 则:

$$\varphi = 2\pi/\lambda(n - n_0)d$$

光栅的位相调制函数为:

$$f(x) = 1/2[(e^{i\varphi} - 1)(-1)^\Delta + (e^{i\varphi} + 1)]$$

式中,  $\Delta = \text{integer}(x/A)$ ,  $x$  为物平面上的坐标变量; 设入射高斯光束的归一化复振幅分布函数<sup>[3]</sup>(略去对其径向分布无影响的常数和因子)为:

$$g(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{\omega^2} - j\frac{kx^2}{2R}\right)$$

式中,  $\omega$  为光栅前表面  $1/e$  振幅处的光束半径;  $R$  为光栅前表面处光束波前的曲率半径;  $k$  为波数; 并定义  $\sigma = A/\omega$ ; 则物平面(光栅后表面)上的场的复振幅分布函数为:

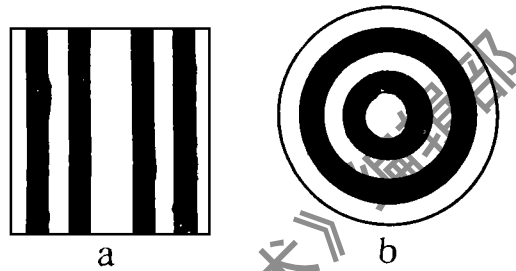


Fig. 1 Overlooking pictures of the grating  
a - one-dimensional b - two-dimensional

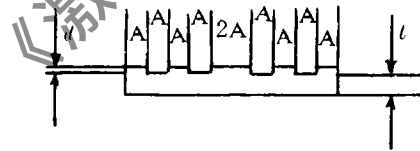


Fig. 2 Section view of the gratings

$$a(x) = g(x)f(x) = \frac{1}{2} [(e^{j\varphi} - 1)(-1)^i + (e^{j\varphi} + 1)] \exp\left(-\frac{x^2}{\omega^2} - j\frac{kx^2}{2R}\right) \quad (\#)$$

我们选取  $\omega = 1.5\text{mm}$ ,  $\varphi = 0.9\pi$ ,  $\lambda = 0.6\mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.85$ ; 经计算得到的物平面上光场的强度  $[I(x)]$ , 振幅  $[A(x)]$ , 位相  $[P(x)]$  分布如图3所示。

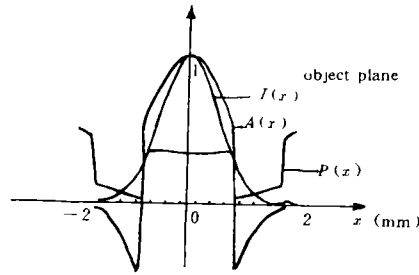


Fig. 3 Distributions of the optical field at the object plane  
 $I(x)$  - intensity distribution  
 $A(x)$  - complex amplitude distribution

2. 光学傅立叶变换可通过远场(夫琅和费)衍射来实现

孔径场的夫琅和费衍射图样为孔径函数的直接傅立叶变换<sup>[2]</sup>, 原理光路如图4所示, 图中激光器1输出的高斯光束通过光栅2后照射在远场衍射屏3上,  $x$  为物平面(光栅后表面)的坐标变量,  $u$  为谱平面(衍射屏表面)的坐标变量,  $z$  为物平面到衍射屏表面的距离。

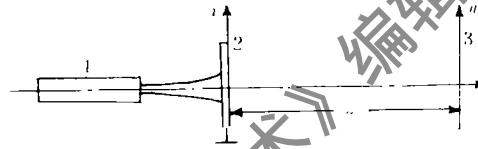


Fig. 4 Principle light path

夫琅和费衍射要求:  $z \gg x^2/\lambda$ , 由于实际应用中, 菲涅耳衍射条件更易于实现, 我们先把物函数代入菲涅耳衍射公式, 然后调整衍射参数  $z$ , 而实现夫琅和费衍射。下面的推导中略去公式中的常数和与径向分布无关的因子。衍射屏表面的场分布为:

$$A(u) = \exp\left(-j\frac{ku^2}{2z}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} a(x) \exp\left(-j\frac{kx^2}{2z}\right) \exp\left(j\frac{kux}{z}\right) dx$$

$$= \sum_{i=0}^{N-1} (R_{ei} + jI_{mi}) \int_{iA}^{(i+1)A} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega^2} - j\frac{kx^2}{2R}\right) \exp\left(-j\frac{ku^2 + kx^2}{2z}\right) \cos\left(\frac{kux}{2}\right) dx \quad (*)$$

$R_{ei} = (\cos\varphi - 1)(-1)^i + (\cos\varphi + 1)$ ;  $I_{mi} = \sin\varphi(-1)^i + \sin\varphi$ ; 式中,  $N$  代表光栅周期的数量。

上述的积分式可通过数值积分进行求解, 整形后光束径向强度分布函数为:  $I(u) = A(u)A^*(u)$ , 式中  $A^*(u)$  为  $A(u)$  的复共轭; 位相分布函数为:

$$P(u) = \cos^{-1} \left\{ R_e \left[ A(u) / \sqrt{I(u)} \right] \right\};$$

### 三、模拟计算

#### 1. 算法

- (1) 输入高斯光束的基本参数:  $\lambda$ ,  $\omega_0$ ,  $\omega$ , ( $\omega_0$  为整形前高斯光束束腰半径);
- (2) 选择光栅参数:  $\varphi$ ,  $\sigma$ , ( $A = \omega\sigma$ );
- (3) 计算高斯光束的其它特征参数:

$$f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}; \quad z_0 = f \sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1}; \quad R = z_0 + \frac{f^2}{z_0};$$

( $z_0$  为入射高斯光束束腰离光栅表面的距离);

(4) 计算式( # ), 求出物面场振幅、强度、位相分布函数:  $A(x), I(x), P(x)$ ;

(5) 画出物面场分布曲线(图 5);

(6) 计算积分式( \* ), 求出谱平面场的振幅、强度、位相分布函数:  $A(u), I(u), P(u)$ ;

(7) 画出谱平面上光场的分布曲线(图 5)。

### 2. 计算结果

理论计算得到的衍射屏表面整形后光场分布的曲线如图 5。

计算过程中选定参数值为:  $\omega_0 = 1.4\text{mm}, \omega = 1.5\text{mm}, z = 16\text{m}, \lambda = 0.6\mu\text{m}$ ;

优化后选取  $\varphi = 0.9\pi, \sigma = 0.85$ ;

图中  $I^*(u)$  为整形前的强度分布,  $I(u)$  为整形后的强度分布。

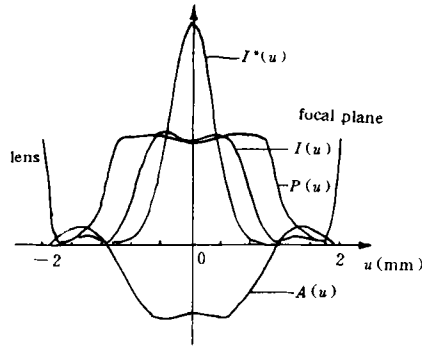


Fig. 5 Distributions of the optical field at different plane

$I(u)$  - intensity distribution after shaping  
 $I^*(u)$  - intensity distribution before shaping  
 $P(u)$  - phase distribution

## 四、器件加工所依据的技术指标

Table 1 Summary of technical indices of the grating

items	specification	absolute error
width of the thin film	1.5mm	$\pm 0.1\text{mm}$
thickness of the film	$0.55\mu\text{m}$	$\pm 0.05\mu\text{m}$
parallel degree of the substrate	$0.5^\circ$	----
thickness of substrate	4.5mm	----
size of substrate	$\varnothing 25\text{mm}$	----
degree of finish	II	----
transmitivity of the substrate	$T > 90\%$	----
transmitivity of the coating region	$t > 90\%$	$ T - t  < 5\%$
effective size of the grating	$1.5 \times 2 \times 5$	

注:表中“----”表示不作具体要求。

这里我们采用的光栅的制作方法,在透明的玻璃基片上镀上一定数量具有一定宽度和厚度的高透射率介质膜,如图 6 所示。

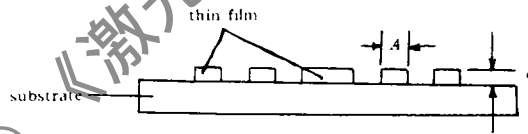


Fig. 6 Configuration of the grating

经过设计计算,我们提出了镀膜层和基片的技术参数,如表 1(此处略去了参数的设计过程)。

## 五、实验过程

实验中,我们以 He-Ne 激光束作为整形对象,实验装置如图 7 所示。

加入薄凸透镜的目的,是为了加大 He-Ne 激光束的发散角,以便于调整光束直径与光栅周期的比率(即得到  $\sigma$  的最佳值)。实际应用中,可再加入其它的光束变换装置,使整形后的光束半径仍满足需要。

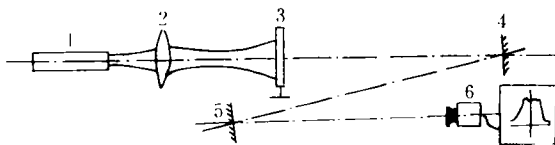


Fig. 7 Experimental arrangement of the system  
1 - He-Ne laser 2 - thin convex lens 3 - shaper  
4, 5 - reflection mirrors 6 - scanning recorder

首先,将透镜2置于 He-Ne 激光器前(尽可能靠近激光器),先不放入光栅,则光束经反射镜4,5反射后,投射在扫描记录仪6上,记录下此时(未整形)的光束径向强度分布,如图8a;然后,在光路中加入光栅,并调整其位置,使光栅上的光斑略大于中心圆环;观察记录仪处衍射图样,如果衍射图样仍是中心强边缘弱,则缓慢后移光栅,否则缓慢前移光栅,直至用肉眼观察到一强度均匀对称的光斑为止;再记录下此时(整形后)的强度分布,如果结果仍不理想,再按上述方法微调光栅的前后位置,直到得到满意的结果,如图8b所示。

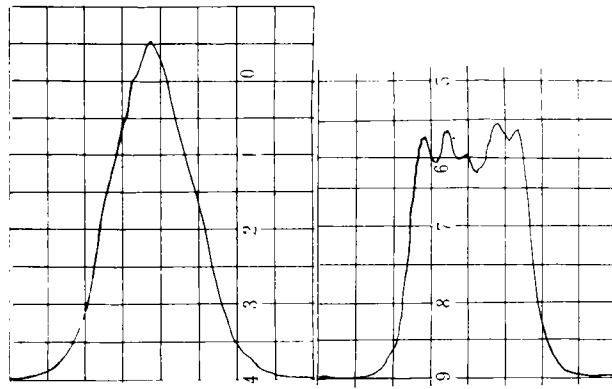


Fig.8 Radial intensity distribution of He-Ne laser beam  
a - before shaping b - after shaping

### 六、实验结果分析

为了便于分析,我们定义以下参数:

1. 边缘强度:整形前光束中心强度为  $I_0$ , 则令  $I_R = I_0/e^2$  为边缘强度。
2. 光束半径:光强降至  $I_R$  的位置离开中心的距离为光束半径,如图9,整形前为  $\omega_0$ ,整形后为  $\omega$ 。
3. 特征强度:如图9,  $I_a = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$  称为特征强度。
4. 特征半径:光强降至  $I_a$  的位置离开中心的距离为特征半径,如图9,整形前为  $\omega_{c0}$ ,整形后为  $\omega_c$ 。
5. 边缘陡度:特征半径与光束半径之比,用以表征光束边缘强度的变化率。
6. 顶端非均匀性:如图9的强度分布曲线,其顶端的近似均匀分布区内仍存在着起伏,为量度此起伏的大小,我们定义参

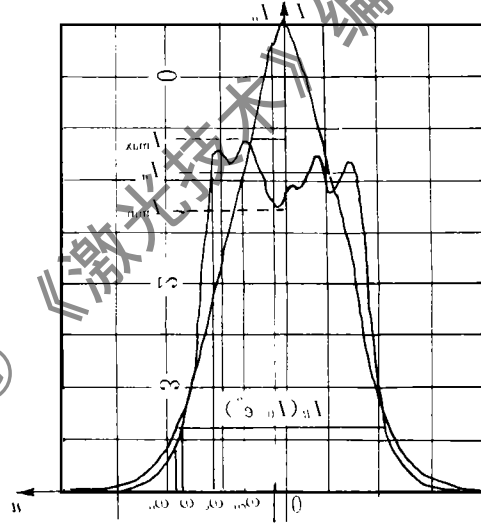


Fig.9 Quantitive analysis of the experimental result

数  $B$ ,  $B = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$ ;

针对实验结果,分析上述参数,得到对比数据如表2:

根据实验结果,整形后光束

Table 2 Values of the parameters of the laser beam after and before shaping

parameters	after shaping	before shaping
beam radius	1.95	2.1
characteristic radius	1.45	0.9
edge steepness	74.4%	42.9%
top fluctuation	9.3%	unnecessary to measure

版权所有 © 《激光技术》编辑部