

基于组合光栅的光束整形方法研究

翟中生^{1*}, 张艺¹, 吕清花², 王选择¹, 冯维¹, 熊芝¹¹湖北工业大学机械工程学院现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;²湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

摘要 提出了一种基于组合光栅的任意形状光束整形方法。在需要整形的几何形状的内外分别设计不同的光栅并形成相位全息图,将相位全息图加载到相应的光路上就可整形出想要的形状。其中:外部闪耀光栅将入射高斯光束分成 0 级和非 0 级衍射级,利用光阑阻挡非 0 级光束,获得所需形状的 0 级光束;内部光栅分别采用了渐变二元光栅和渐变正交光栅,它们能够改善几何掩模内部区域的能量分布,获得均匀性较好的平顶光束。实验结果表明,该方法可以获得任意形状、边缘陡峭、均匀性高的平顶光束,能量利用率可达 43.71%,最小不均匀性为 2.12%。该方法在激光加工领域具有良好的应用前景。

关键词 光束传输; 渐变二元光栅; 渐变正交光栅; 激光加工

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1305001

1 引言

超短脉冲激光在材料加工中有着广泛的应用^[1-2]。大多数激光加工都使用高斯光束,而整形光束作为一种非常规光束,在超高功率激光装置中的需求量很大^[3-4],且在高精度激光加工中有时比高斯光束更具优势^[5-11]。空间光调制器(SLM)作为一种可编程的衍射光学器件,可以灵活地调控光束的强度、相位和振幅等参数,因此,许多研究人员将其应用于光束整形和精密控制技术中^[12-14]。

目前,一些研究人员已经尝试将不同的光束整形技术应用于各种超短脉冲激光加工中,如:Thomson 等^[15]利用可变形镜将整形后的超快激光用于光波导的刻写;Sanner 等^[16]利用非像素化光学寻址光阀获得了焦面处的平顶、圆环、正方形和三角形光束;匡正等^[17]通过将特定形状的几何掩模加载到 SLM 上成功地在像面上获得了相似形状的光束,后来他们通过在 SLM 之后放置灰度渐变几何掩模和偏振分析器的方法改善了强度的均匀性^[18],他们还用两个并行处理的 SLM 实现了多形状光束的整形^[19]。对于文献^[17-18]提出的方法,整形光斑的均匀性及能量利用率取决于几何掩模的尺寸:掩模尺寸越大,能量利用率越高,但均匀性越差;只有在掩模面积较小的情况下才能获得均匀性较好的平顶光束,但均匀性较好时,能量利用率非常低,仅为 10%左右。

为了同时实现高能量利用率高和高均匀性,本文提出了一种基于组合光栅的光束整形方法。在该方法中,外部光栅选用闪耀光栅,它能够获得任意形状陡峭的轮廓;内部渐变光栅采用渐变二元光栅(IGBG)或渐变正交光栅(IGOG),它能够改变几何形状内部区域的能量分布,使得在增大掩模尺寸提高能量利用率的同时,可以有效改善整形光斑的均匀性。实验结果表明,该方法可以获得边缘陡峭、均匀性高的平顶光束,能量利用率可达 43.71%,最小不均匀性为 2.12%。

2 基本原理

2.1 整形原理

实验原理如图 1 所示。激光束经过衰减器、快门和半波片后,以 10° 入射进 SLM 并反射至透镜 1 上。两个焦距不同的正透镜 1 和 2 构成 $4f$ 系统。在透镜 2 后焦平面(A')处安装三维工作台,将抛光的不锈钢样品安装在工作台表面,进行激光加工;在光阑后放置分束镜,使光束通过由透镜 3 和透镜 1 组成的另一个 $4f$ 系统;在 A''面上放置 CCD 相机,观察光束形状。加载在 SLM 上的混合全息图由预期形状的几何图案和不同种类光栅的灰度图组合而成。激光束经过 SLM 后,被分成 0 级光束和非 0 级衍射光束(± 1 级、 ± 3 级……),非 0 级衍射光束被光阑阻挡,0 级光束形成预期的形状。

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2021-11-29; 录用日期: 2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(32071457)

通信作者: *zs.zhai@hbut.edu.cn

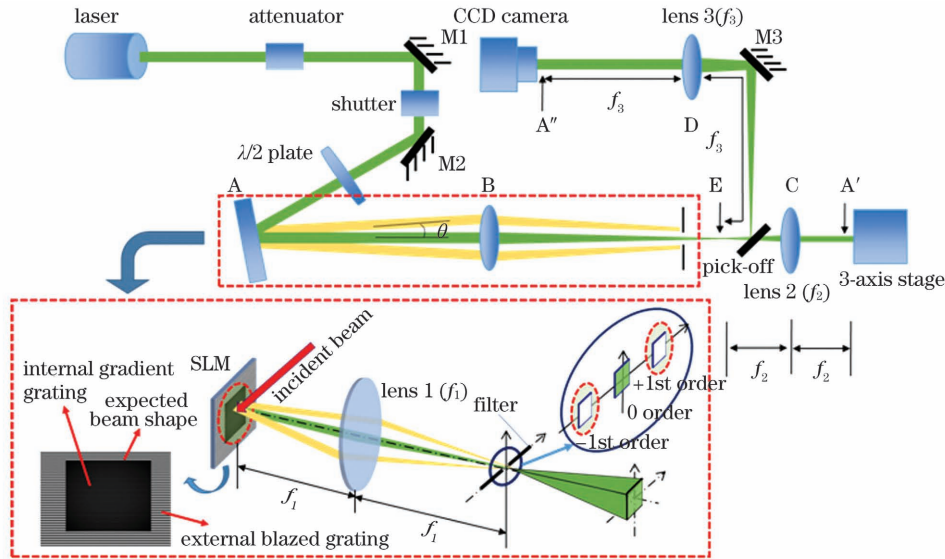


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

本文采用的 SLM 是一种纯相位平行向列型液晶器件,加载在其上的相位掩模会影响输出光束的光场分布。在图 1 中,假设入射光为高斯光束,若 SLM 中加载全黑全息图,则其相当于一个反射镜,输出光束强度将保持高斯分布,如图 2(a)所示。由轮廓可知,高斯光束由 a、b、c、d 四部分组成,其中 b 区域为预期的平顶光束。若将所需几何掩模设置为零灰度级,并利用掩模与外部闪耀光栅(EBG)相结合的方法,则 c、d 部分可以被闪耀光栅衍射并被光阑阻挡,如图 2(b)所

示。该方法可以增大光束边缘强度分布的陡度,从而改变光束形状,但此种方法产生的整形光束边缘陡度较大,且均匀性会随着掩模尺寸的增加而变差,能量利用率较低。因此,为了提高能量利用率和光强分布的均匀性,在几何掩模与外部闪耀光栅(EBG)相结合的基础上,在掩模内部加入渐变光栅(IGG),用于改变入射光的能量分布,将光束中心高能部分 a 分布到周围形成平顶,如图 2(c)所示,从而提高能量利用率,获得边缘陡峭、均匀性高的整形光束。

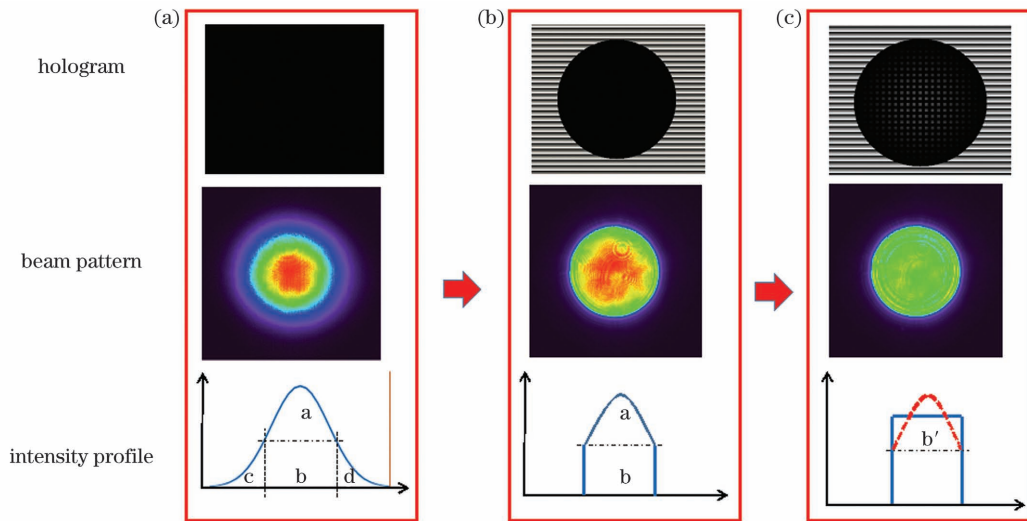


图 2 不同相位全息图的整形示意图。(a)全黑全息图;(b)掩模+外部闪耀光栅;(c)掩模+外部闪耀光栅+内部渐变光栅

Fig. 2 Schematics of shaping for different holograms. (a) Black hologram; (b) mask with external blazed grating (EBG); (c) mask with EBG and internal gradient grating (IGG)

2.2 外部光栅的影响

由图 2 所示的整形原理图可知,外部光栅的作用是将期望的光束形状外部的能量衍射到非 0 级上 (± 1 级、 ± 3 级……)。0 级光是需要保留的部分,在外部光栅的作用下,0 级光将形成陡峭的边缘。为了便于非 0 级光被光阑拦住,需要将 0 级和非 0 级光分

开,因而需要选择合适的衍射角度,如图 3 中的 θ 所示;同时,为了最大限度地提高能量利用率,即提高 0 级光的能量占比,需要选择合适衍射效率的光栅。

1) 衍射角度

根据光栅的衍射特性,衍射角 θ 和入射角 α 之间的关系为

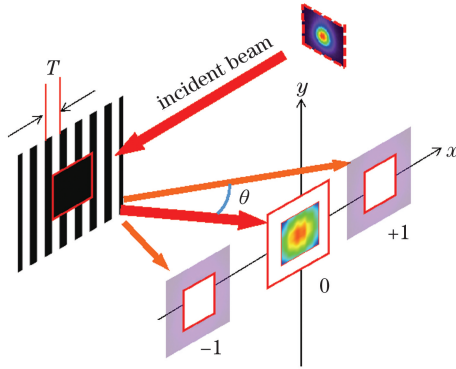


图 3 外部光栅的衍射示意图

Fig. 3 Diffraction diagram of external grating

$$T(\sin \alpha + \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中: m 为衍射级次; T 为光栅周期。由式(1)可以进一步推导出如下关系:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{T} - \sin \alpha\right). \quad (2)$$

在实际光路中, α 为定值(一般小于 10°)。从式(2)可以看出, 衍射角 θ 将随着光栅周期 T 的改变而变化。为了将 0 级光和非 0 级光分开, 需要选择合适的 T 值。

2) 衍射效率

外部光栅通常可选用正弦光栅、二元光栅和闪耀光栅, 这些光栅衍射效率的计算公式如表 1 所示^[20-21]。

表 1 外部光栅衍射效率的对比

| Grating | Formula of m -order diffraction efficiency |
|--------------------|--|
| Sinusoidal grating | $\eta_{s,m} = J_m^2\left(\frac{q}{2}\right)$, where J is the Bessel function and q is the amplitude |
| Binary grating | $\eta_{b,m} = \text{sinc}^2\left(\frac{m\pi}{2}\right)$ |
| Blazed grating | $\eta_{g,m} = \text{sinc}^2\left(\frac{m\pi}{g}\right)$, where g is the number of steps |

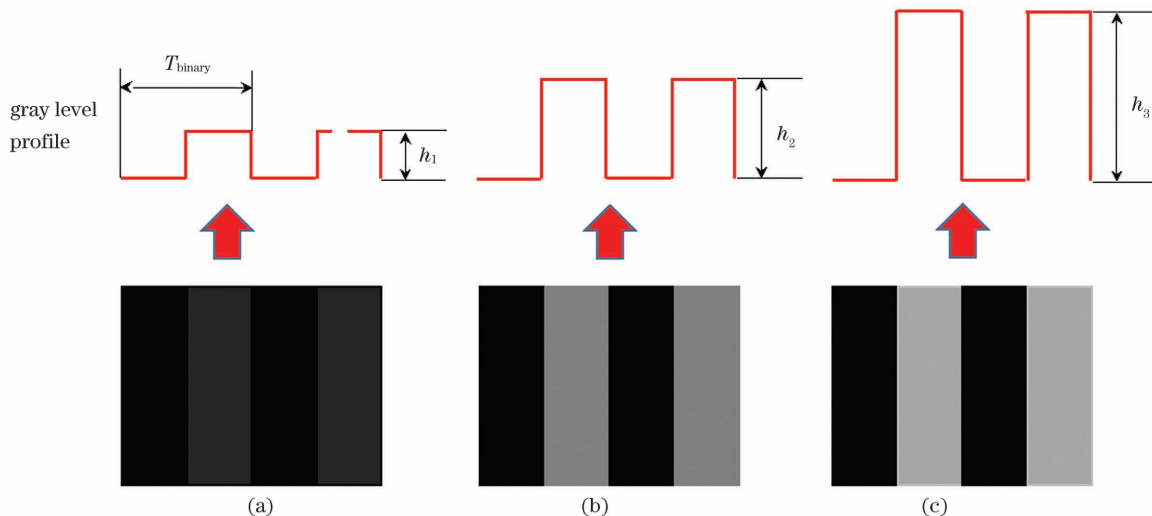


图 4 不同灰度等级的二元光栅。(a) $h_1=38$; (b) $h_2=127$; (c) $h_3=166$

Fig. 4 Binary gratings with different gray levels. (a) $h_1=38$; (b) $h_2=127$; (c) $h_3=166$

本课题组在前期的研究中比较了三种光栅的不同周期对衍射效率的影响规律^[22], 结合衍射角的限制条件可以发现, 将闪耀光栅作为外部光栅时综合性能最好。因此, 本实验选用闪耀光栅作为外部光栅。

2.3 内部光栅的影响

使用外部光栅可以获得任意形状整形光束, 但由于掩模内部的光强呈高斯分布, 仅使用外部光栅无法改善掩模内部的能量分布。掩模尺寸越大, 整形光束的均匀性越差。为了改善掩模内部的能量分布, 考虑在几何掩模内部加载渐变光栅, 可以采用渐变二元光栅和渐变正交光栅。

1) 渐变二元光栅

由于 SLM 的可编程性, 其模拟的数字二元光栅可以实现多参数改变。图 4 所示为不同灰度级的二元光栅, h_1 、 h_2 和 h_3 对应的灰度值分别为 38、127 和 166。对于相位调制型 SLM, 不同的灰度值对应着不同的相位值。

根据周期信号的傅里叶级数展开理论, 二元光栅可以看作是许多不同幅度、不同相位和不同周期正弦光栅的组合。由傅里叶系数可知, 不同阶正弦光栅的振幅值不同, 而衍射光束的强度可由傅里叶系数绝对值的平方得到。当二元光栅的填充因子为 0.5 时, 如图 4 中的相位剖面图所示, 第 0 级和第 $\pm m$ 级的强度为^[23]

$$I_0 = \cos^2\left(\frac{h}{2}\right), \quad (3)$$

$$I_{\pm m} = \left[\frac{2}{m\pi} \sin\left(\frac{h}{2}\right)\right]^2. \quad (4)$$

二元光栅第 m 级的衍射效率可以表示为^[24]

$$\eta_m = \text{sinc}^2\left(\frac{m}{2}\right) \frac{\text{sinc}^2\left[\frac{m - \varphi(h)}{2}\right]}{\text{sinc}^2\left[\frac{m + \varphi(h)}{2}\right]}, \quad (5)$$

式中: $\varphi(h)$ 是由灰度值 h 产生的调制相位。因此, 对于不同的灰度级, 衍射效率会发生变化, 并且相应的

0 级和非 0 级能量比例也会有所不同。

由式(3)、(4)可知,选择不同的灰度值,0 级和各衍射级的光强将发生变化。对于 HAMAMATSU 公司生产的型号为 X10468-02 的 SLM,加载在其上的周期 T 为 $40\ \mu\text{m}$ 的二元光栅的 0 级光对应的光强占比变化测试曲线如图 5 所示。从图 5 可知:随着相位图的灰度值从 0 变化到 127,0 级光的光强占比逐渐下降;灰度 $h=127$ 时,0 级光的光强占比最低,此时意味着衍射光(± 1 级、 ± 3 级……)的能量最强; h 超过 127 后,0 级光的光强占比逐渐增大。

为了将几何掩模内部呈高斯分布的能量进行均匀化处理,如图 2(c)所示,需要设计不同灰度等级的渐变二元光栅。

根据光强占比随灰度值的变化曲线以及几何掩模内部能量分布设计的渐变二元光栅的相位分布如图 6(a)所示,其灰度剖面图如图 6(b)所示,其包络线 $f(r)$ 也为高斯型,其表达式为

$$f(r) = B \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) + C, \quad (6)$$

式中: r 为极半径; B 、 σ 和 C 为待定参数,可以通过实

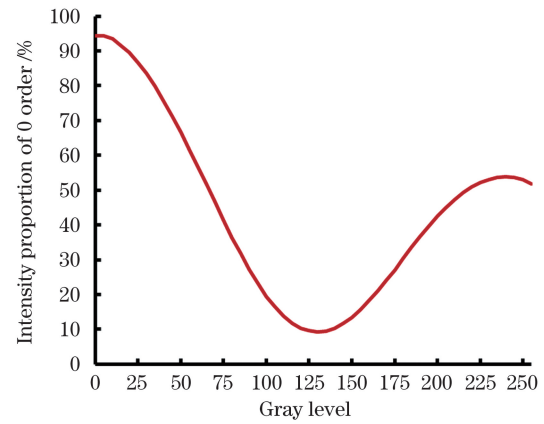


图 5 0 级光强占比随灰度值的变化曲线

Fig. 5 Intensity proportion of 0 order changed with gray level

验确定。包络线设计为高斯型是因为几何掩模内能量最高的位置是高斯分布的顶部,此处的能量需要更多地被衍射,需要高灰度值的二元光栅,而其他位置的能量逐渐降低,相应的被衍射的能量也逐渐减少,符合高斯函数的变化规律。但由二元光栅的特性可知,其能量只会在一维方向上衍射。

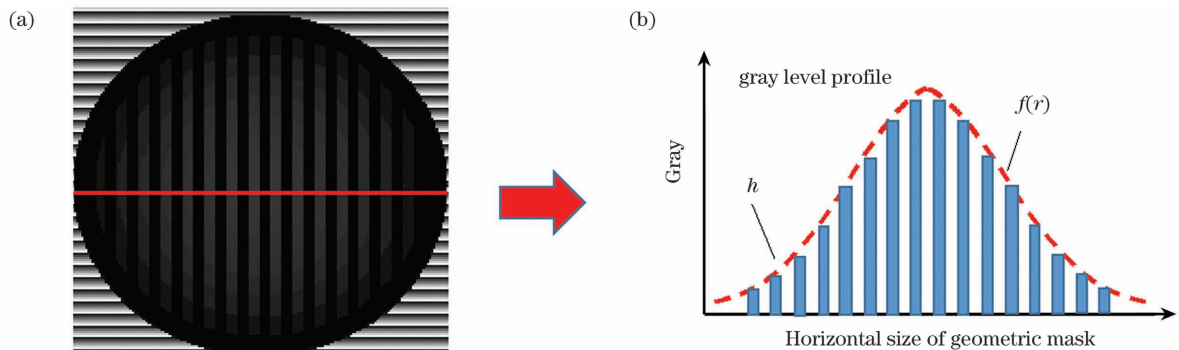


图 6 相位分布。(a)内部渐变二元光栅;(b)渐变二元光栅的灰度剖面图

Fig. 6 Phase distribution. (a) Internal gradient binary grating; (b) gray profile of gradient binary grating

2) 渐变正交光栅

使用二元光栅,能量可以衍射到非 0 级,但能量只会在一维方向上衍射,不能实现能量在二维方向上的扩散,而正交光栅具有将能量向二维平面衍射的能力。图 7(a)、(b)分别为正交光栅和渐变正交光栅全息图,

图 7(c)所示为入射光经过正交光栅后的衍射情况。可以发现,中心能量被分成多个部分,除中心为 0 级外,有 8 个是 1 级的。因此,采用正交光栅可以改善整个平面的能量分布。

正交光栅的相位表达式为

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} h, & 0 \leq x \leq \frac{T_x}{2}, 0 \leq y \leq \frac{T_y}{2}, \varphi(x) = \varphi(x + T_x) \\ 0, & \frac{T_x}{2} < x \leq T_x, \frac{T_y}{2} < y \leq T_y, \varphi(y) = \varphi(y + T_y) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: T_x 和 T_y 分别为 x 和 y 方向的光栅周期。图 7(c)中 0 级光的衍射强度可用式(3)进行计算,另外 8 个衍射光的强度可分别用下式计算:

$$I_{(\pm 1, \pm 1)} = [(2/\pi) \sin(h/2)]^2 [(2/\pi) \sin(h/2)]^2, \quad (8)$$

$$I_{(0, \pm 1)} = I_{(\pm 1, 0)} = [(2/\pi) \sin(h/2)]^2 \cos^2(h/2). \quad (9)$$

同样,为了将几何形状内部呈高斯分布的能量进行均匀化处理,需要将光栅设计成渐变光栅,如图 7(b)所示。渐变光栅的包络曲线也可以用式(6)进行描述。如果找到能够改变能量分布的最佳 T_x 和 T_y 、 h 和 $f(r)$,就可以使整形光束获得较高的均匀性和能量利用率。

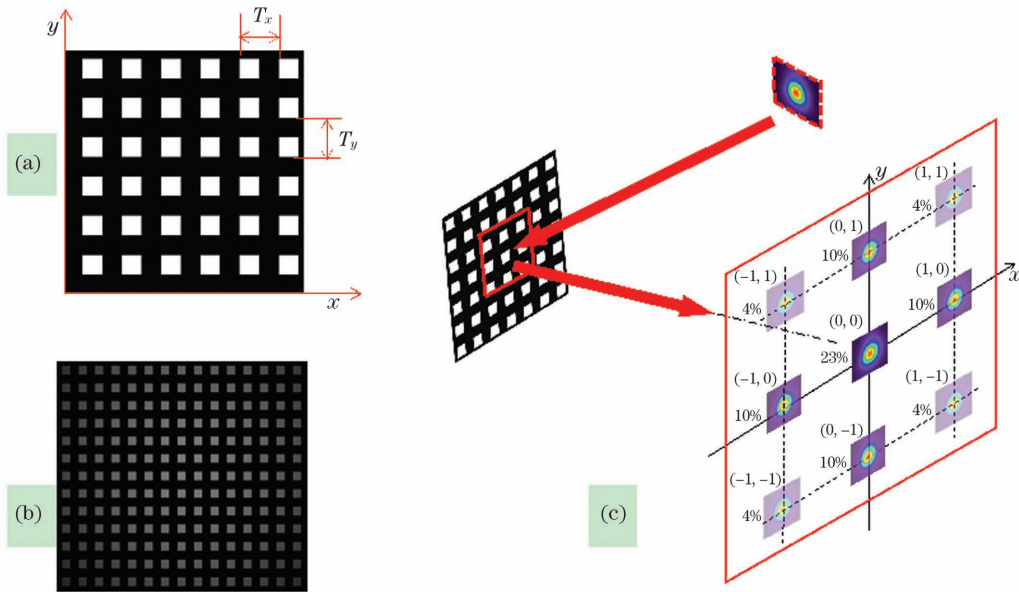


图 7 正交光栅及衍射示意图。(a)正交光栅全息图;(b)渐变正交光栅全息图;(c)正交光栅衍射示意图

Fig. 7 Schematic of orthogonal grating and diffraction. (a) Orthogonal grating hologram; (b) gradient orthogonal grating hologram; (c) schematic of orthogonal grating diffraction

2.4 整形效果的评价指标

为了定量分析整形光束的质量,本文引入了能量利用率和均匀性的概念。整形光束的能量利用率定义为^[14]

$$\xi_{\text{shaped}} = \frac{\iint I_{\text{shaped}} ds_{\text{mask}}}{\iint I_0 ds}, \quad (10)$$

式中: $\iint I_{\text{shaped}} ds_{\text{mask}}$ 为整形区域光强分布的积分; $\iint I_0 ds$ 为入射光束光强分布的积分。可见,理论上光束整形的能量利用率与掩模面积有关。

整形光束的不均匀性定义为

$$U_E = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y) \in S} \left[\frac{I(x,y) - \bar{I}}{\bar{I}} \right]^2}{n-1}}, \quad (11)$$

式中: $I(x,y)$ 为采样区域 S 中 (x,y) 的强度; \bar{I} 为 S 中的平均光强; n 为 S 中的采样数量。 U_E 越小,整形

光束的均匀性越好。

3 实验结果与分析

3.1 实验装置

在图 1 所示的实验装置示意图中,SLM 的型号为 X10468-02,皮秒激光放大器的型号为 PINE-1064-40B,输出激光束的直径为 $D=7.5 \text{ mm}$,波长为 $\lambda=1064 \text{ nm}$,脉冲宽度为 $T_p=10 \text{ ps}$,重复频率为 $f_r=100 \text{ kHz}$ 。透镜的焦距为 $f_1=1000 \text{ mm}$,透镜 2 的焦距为 $f_2=30 \text{ mm}$ ($f_2/f_1=0.033$,所以光束经过由透镜 1 与透镜 2 组成的 $4f$ 成像系统后,直径变为原来的 3.3%),透镜 3 的焦距为 $f_3=1000 \text{ mm}$ 。

3.2 实验结果

为了验证所设计的组合光栅的整形质量,本课题组进行了对比实验。整形光斑的形状为六边形。利用 4 种方法 (GS、EBG-only、EBG + IGBG 和 EBG + IGOG) 设计了 4 种类型的相位全息图,如图 8 所示。

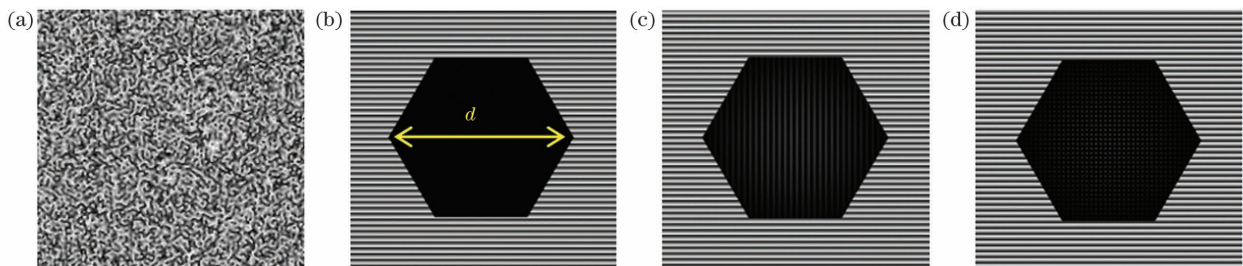


图 8 4 种不同方法对应的相位全息图。(a) GS;(b) EBG-only;(c) EBG+IGBG;(d) EBG+IGOG

Fig. 8 Phase holograms generated by four kinds of methods. (a) GS; (b) EBG-only; (c) EBG+IGBG; (d) EBG+IGOG

在 SLM 上分别加载了用不同方法生成的横向尺寸 (d) 不同的六边形掩模全息图,其中掩模图形的横向尺寸分别为 1, 2, 3, 4 mm,横向尺寸 d 如图 8(b)所示。掩模外部光栅均采用台阶数为 $g=16$

的闪耀光栅。同时,加载利用 GS 算法生成的相应 4 种尺寸的六边形全息图进行光束整形实验,并将实验结果与掩模法的结果进行对比。GS 算法的相位图为迭代 50 次的结果,内部渐变光栅的周期为

$T=125\ \mu\text{m}$ 。式(6)中各参数的确定方法如下:首先根据横向尺寸 d 的大小确定 r 的大小,得到内部纯黑时的光斑能量分布,根据此时中心最大能量 I_{max} 和边缘最小能量 I_{min} ,估算出整形后的能量均值 I_{mean} ,由 $(I_{\text{max}} - I_{\text{mean}})$ 再结合 0 级光对应的光强占比规律(如图 5 所示),确定出合适的 B 值。 σ 和

C 值可以通过观察整形效果进行优化选取。如 $d=4\ \text{mm}$ 时,各参数的值分别为: $B=40, C=10, \sigma=2.04$ 。

表 2 所示为 4 种不同方法对应的六边形整形结果;表 3 为不同整形光斑横向尺寸 d 下的剖面能量曲线,其示意位置如图 8(b)所示。

表 2 不同方法的平顶六边形整形结果

Table 2 Shaping results for flattop hexagon with different methods

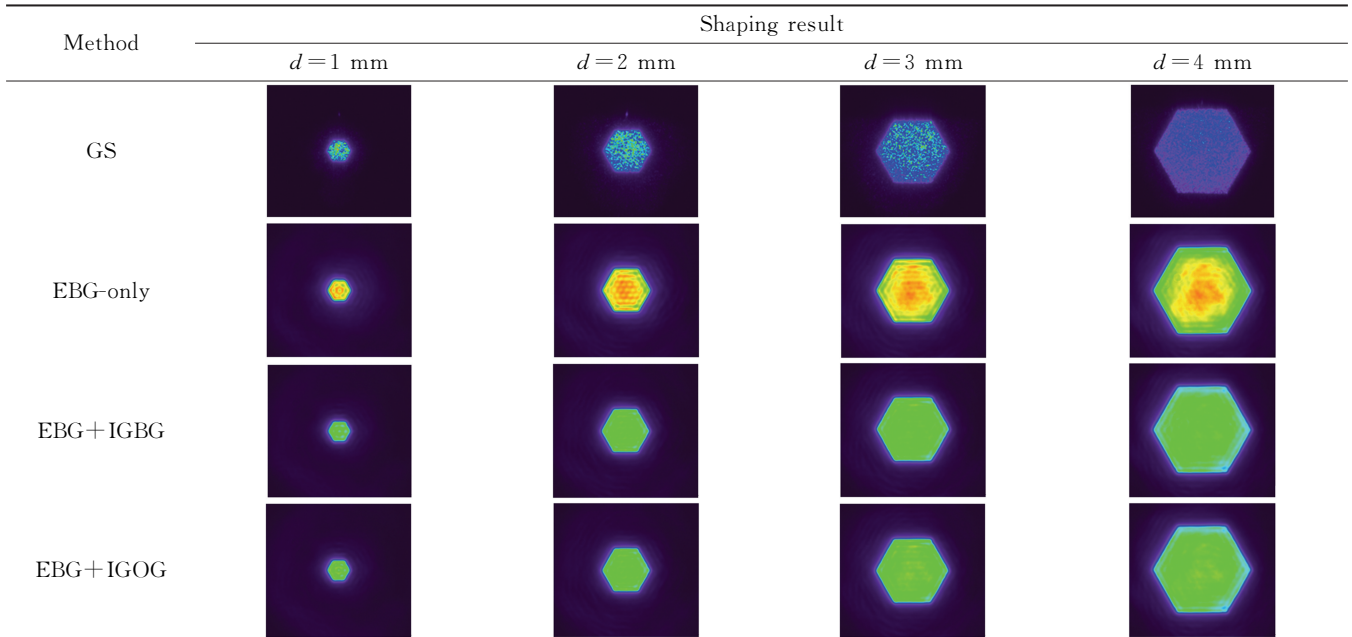
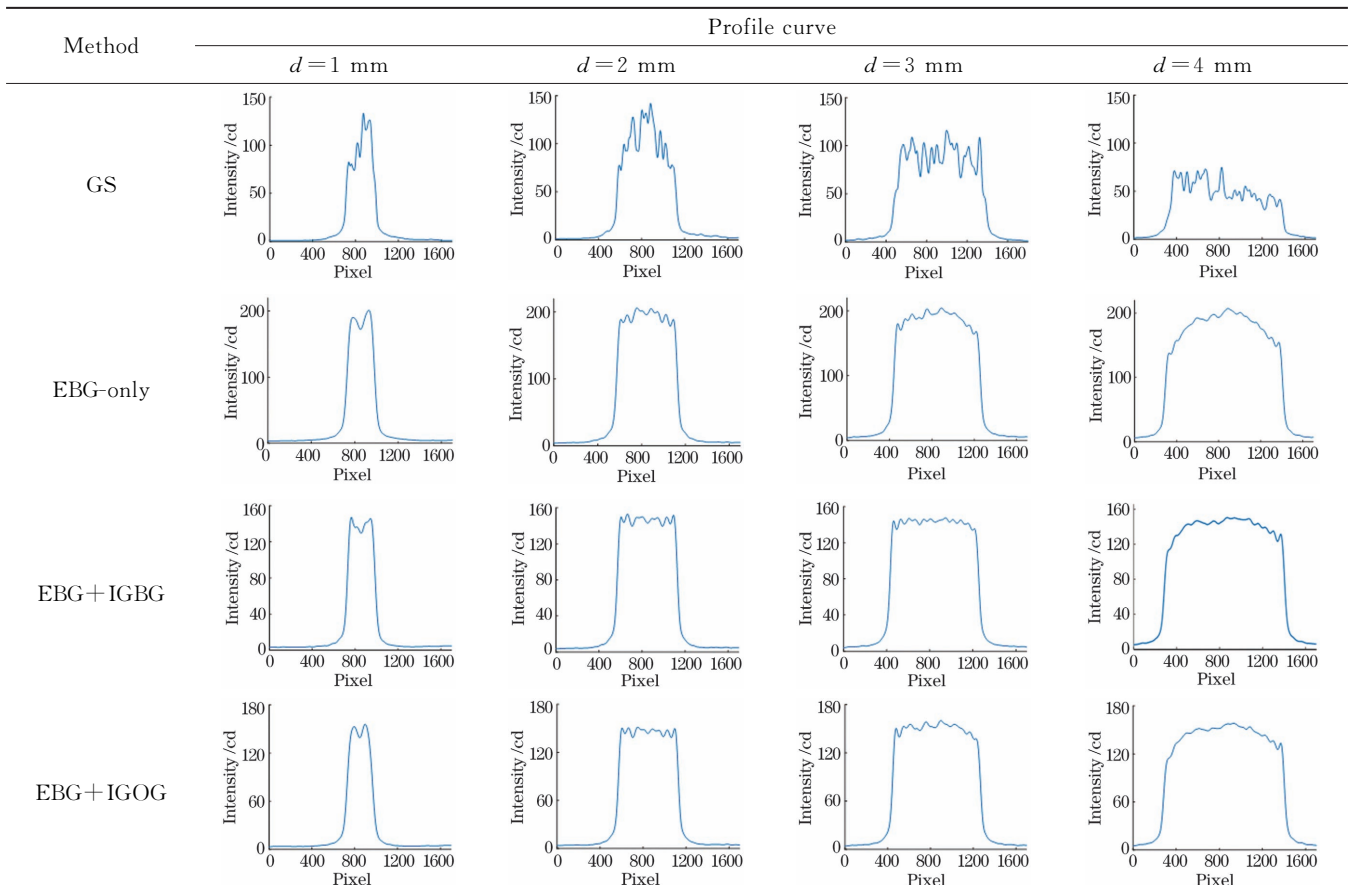


表 3 不同方法整形结果的剖面曲线

Table 3 Profile curves of shaping results with different methods



由表 2 和表 3 可知:GS 算法的整形效果较差,边缘没有其他三种方法的陡峭,且均匀性差;对于 EBG-only 方法,随着几何尺寸 d 增大,掩模中心能量高于边缘能量的情况越来越明显,整形光束的均匀性逐渐变差;EBG+IGBG 和 EBG+IGOG 方法能够得到边

缘陡峭、均匀性高的平顶光束。可以看出,在掩模内部加载渐变光栅能够改善内部的能量分布。

根据式(10)、(11)计算出了这 4 种整形方法对应的能量利用率和光束不均匀性,计算结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 4 种整形方法的能量利用率

Table 4 Energy efficiency of four shaping methods

| Shaping method | Energy efficiency / % | | | |
|----------------|-----------------------|----------|----------|----------|
| | $d=1$ mm | $d=2$ mm | $d=3$ mm | $d=4$ mm |
| EBG+IGBG | 3.42 | 12.35 | 25.97 | 42.90 |
| EBG+IGOG | 3.71 | 12.99 | 26.90 | 43.71 |
| EBG-only | 4.06 | 14.09 | 28.70 | 46.49 |
| GS | 72.10 | 70.63 | 68.93 | 68.62 |

表 5 4 种整形方法的光束不均匀性

Table 5 Beam nonuniformity of four shaping methods

| Shaping method | Beam nonuniformity / % | | | |
|----------------|------------------------|----------|----------|----------|
| | $d=1$ mm | $d=2$ mm | $d=3$ mm | $d=4$ mm |
| EBG+IGBG | 3.59 | 2.21 | 2.12 | 4.71 |
| EBG+IGOG | 3.72 | 3.61 | 3.50 | 5.26 |
| EBG-only | 4.71 | 4.35 | 4.17 | 9.94 |
| GS | 19.57 | 18.97 | 12.79 | 21.50 |

由表 4 和表 5 可知:GS 算法虽能获得较高的能量利用率,但其光束均匀性最差,无法获得高质量的平顶光束;EBG-only 方法的能量利用率稍高于 EBG+IGBG 和 EBG+IGOG,但均匀性比这两种方法都差。掩模内部采用渐变正交光栅能够获得比渐变二元光栅更高的能量利用率,且能量利用率随着掩模尺寸的增大而提高,当 $d=4$ mm 时达到最大值 43.71%;但掩模内部采用渐变二元光栅相较于渐变正交光栅能够实现更好的光束均匀性,且光束不均匀性在掩模尺寸 $d=3$ mm 时达到最小值 2.12%。

综上,本文所述基于组合光栅的光束整形方法能够获得边缘陡峭、均匀性高的平顶光束。

4 结 论

本文提出了一种基于组合光栅的光束整形方法,该方法能够获得均匀性良好的平顶光束。在所提方法中,利用可编程 SLM 显示由几何掩模、外部闪耀光栅和内部光栅组合而成的全息图。其中,内部光栅可选用渐变正交光栅和渐变二元光栅,这类光栅能将入射高斯光束衍射为多个非 0 级光束,从而改变能量分布,获得高均匀性的平顶光束。同时,本文还将所述掩模方法与 GS 整形方法进行了对比。对比实验结果表明:虽然传统的 GS 整形方法获得的整形光斑的能量利用率很高,但均匀性很差,仅适用于对均匀性没有要求的领域,比如激光加工通孔等;而本文提出的方法可以获得边缘陡峭、均匀性高的整形光束,可以用于对均匀性及边缘陡度要求很高的领域,如对镀膜材料(膜很薄,同时不能伤害基底)进行划线去膜,对半导体材料(如

Low-K)刻槽等。由此可见,本文提出的方法在对平顶光束均匀性要求较高的激光加工领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] von der Linde D, Sokolowski-Tinten K. The physical mechanisms of short-pulse laser ablation[J]. Applied Surface Science, 2000, 154/155: 1-10.
- [2] Sundaram S K, Mazur E. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses[J]. Nature Materials, 2002, 1(4): 217-224.
- [3] Bailly-Grandvaux M, Santos J J, Bellei C, et al. Guiding of relativistic electron beams in dense matter by laser-driven magnetostatic fields[J]. Nature Communications, 2018, 9: 102.
- [4] Sakata S, Lee S, Morita H, et al. Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states[J]. Nature Communications, 2018, 9: 3937.
- [5] Mauclair C, Pietroy D, di Maio Y, et al. Ultrafast laser micro-cutting of stainless steel and PZT using a modulated line of multiple foci formed by spatial beam shaping[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 212-217.
- [6] Qian D S, Zhong X L, Yan Y Z, et al. Microstructures induced by excimer laser surface melting of the SiC_p/Al metal matrix composite[J]. Applied Surface Science, 2017, 412: 436-446.
- [7] Xue Z W, Guo Y D, Chen Z Z, et al. Actively compensation of low order aberrations by refractive shaping system for high power slab lasers[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 75: 71-75.
- [8] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(5): 607-621.
- [9] 丁铠文, 王聪, 罗志, 等. 超快激光束整形原理与方法及其在功能性微结构制造中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202005.
- Ding K W, Wang C, Luo Z, et al. Principle and method of ultrafast laser beam shaping and its application in functional

- microstructure fabrication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202005.
- [10] 李卿, 刘现魁, 任晓明, 等. 柱面镜旋转对整形光束远场焦斑的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1105001.
Li Q, Liu X K, Ren X M, et al. Effect of cylindrical mirror rotation on the far-field spot of a shaping beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1105001.
- [11] 孔德键, 孙小燕, 董卓林, 等. 飞秒激光空间光束整形加工技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111416.
Kong D J, Sun X Y, Dong Z L, et al. Progress in femtosecond laser processing technology based on space beam shaping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111416.
- [12] Yang L, El-Tamer A, Hinze U, et al. Parallel direct laser writing of micro-optical and photonic structures using spatial light modulator [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 70: 26-32.
- [13] Dev K, Asundi A. Polarization modulation study of transmissive liquid crystal spatial light modulator using digital holographic polariscope [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 323-328.
- [14] Shibukawa A, Okamoto A, Takabayashi M, et al. Spatial cross modulation method using a random diffuser and phase-only spatial light modulator for constructing arbitrary complex fields [J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3968-3982.
- [15] Thomson R R, Bockelt A S, Ramsay E, et al. Shaping ultrafast laser inscribed optical waveguides using a deformable mirror [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12786-12793.
- [16] Sanner N, Huot N, Audouard E, et al. Direct ultrafast laser micro-structuring of materials using programmable beam shaping [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(6): 737-741.
- [17] Kuang Z, Li J N, Edwardson S, et al. Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric masks using a spatial light modulator [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 70: 1-5.
- [18] Li J N, Kuang Z, Edwardson S, et al. Imaging-based amplitude laser beam shaping for material processing by 2D reflectivity tuning of a spatial light modulator [J]. Applied Optics, 2016, 55(5): 1095-1100.
- [19] Li J N, Tang Y, Kuang Z, et al. Multi imaging-based beam shaping for ultrafast laser-material processing using spatial light modulators [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112: 59-67.
- [20] 华家宁. 各种光栅的衍射效率 [J]. 大学物理, 1990, 9(4): 26-27.
Hua J N. Diffraction efficiency of various gratings [J]. College Physics, 1990, 9(4): 26-27.
- [21] 秦绪玲, 孙炳全. 二元光学元件衍射效率的分析与计算 [J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2002, 4(3): 8-9, 48.
Qin X L, Sun B Q. Analysis and calculation of diffraction efficiency of binary optical elements [J]. Journal of Liaoning Teachers College (Natural Science Edition), 2002, 4(3): 8-9, 48.
- [22] 汪于涛. 基于混合全息图的光束形态及质量控制 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018: 17-19.
Wang Y T. Beam shape and quality control base on hybrid holograms [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018: 17-19.
- [23] Martínez A, Sánchez-López M D M, Moreno I. Phasor analysis of binary diffraction gratings with different fill factors [J]. European Journal of Physics, 2007, 28(5): 805-816.
- [24] Huggins E. Introduction to Fourier optics [J]. The Physics Teacher, 2007, 45(6): 364-368.

Beam Shaping Method Based on Combined Gratings

Zhai Zhongsheng^{1*}, Zhang Yi¹, Lü Qinghua², Wang Xuanze¹, Feng Wei¹, Xiong Zhi¹

¹ Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quantity Engineering, School of Mechanical Engineering,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;

² School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

Abstract

Objective In most laser processing, Gaussian beam is used, but in high-precision laser processing, shaping beam, as an unconventional beam, can sometimes outperform Gaussian beam. Traditional shaping techniques include using a deformable mirror, a nonpixel optical addressing light valve, and a spatial light modulator (SLM). The nonpixel optical addressing light valve method can generate flat-top, ring, square, and triangular beams at the focal plane. Beam shaping with SLM can use Gerchberg-Saxton (GS) method, imaging method, and hybrid holograms. However, simultaneously ensuring the energy efficiency and uniformity of the shaping beam using these methods is difficult. The larger the geometric mask size in the hybrid holograms method, the worse the uniformity. Only when the mask area is small can a flat-top beam with better uniformity be obtained. It is worthwhile to investigate how to implement the shaping method while maintaining high energy efficiency and uniformity. In this paper, we propose a beam shaping method based on combined gratings: external blazed grating (EBG) and internal gradient grating (IGG). The EBG can diffract the beam into different orders, and with the help of an aperture, we can obtain the expected shape with a steep edge. The IGG can change the energy distribution in the inner region of the geometric shape and improve the uniformity by using either gradual binary grating (IGBG, internal graded binary grating) or graded orthogonal grating (IGOG, internal gradient orthogonal grating). We hope that this method will be useful in laser processing where high uniformity of flat-topped beams is required.

Methods A pure phase parallel nematic liquid crystal device is used in this study. Among them, the external grating uses a blazed grating, which can divide the incident Gaussian beam into zero and nonzero diffraction orders, and use an

aperture to block the nonzero-order beam to obtain the zero-order beam with desired shape. The internal grating uses gradual binary grating or graded orthogonal grating, which can improve energy distribution in the geometric mask's inner region and produce flat-topped beams with steep edges and good uniformity. The characteristics of EBG and IGG, and the shaping effect are discussed. For analyzing the shaping quality, the calculation methods of energy utilization and uniformity are presented. A hexagon experiment uses four methods: EBG-only, EBG + IGBG, EBG + IGOG, and GS. The shaped beams produced by four methods are compared by adjusting the size of the geometric mask.

Results and Discussions From the experimental results, it can be seen that the designed beam shaping method based on combined gratings can obtain a flat-topped beam with arbitrary shape, steep edge, and high uniformity. A hexagon experiment uses four methods: EBG-only, EBG + IGBG, EBG + IGOG, and GS. The shaped beams produced by four methods are compared by adjusting the size of the geometric mask. Using gradient orthogonal gratings inside the mask can obtain higher energy efficiency than gradient binary gratings, and the energy utilization efficiency increases with the increase of mask size, reaching a maximum of 43.71% at $d = 4$ mm (Table 4). However, the uniformity of the method with gradient binary gratings is better than that of the gradient orthogonal gratings, and the nonuniformity reaches a minimum of 2.12% when the mask size $d = 3$ mm (Table 5). Although the GS algorithm achieves high energy efficiency, its beam uniformity is the worst, as it cannot produce a high-quality flat-topped beam. Therefore, the proposed shaping method can produce a flat-topped beam with high uniformity while preserving energy efficiency.

Conclusions In this study, a flat-topped beam with good uniformity is obtained using a spatial light modulator and designing a phase hologram composed of a geometric mask and gratings inside and outside of the mask. Among these, the internal grating can be gradient orthogonal grating or gradient binary grating, which can diffract the incident Gaussian beam into multiple nonzero-order beam to change the energy distribution and obtain a flat-topped beam with high uniformity. At the same time, the grating methods are compared to the GS method. Although GS method can obtain high energy efficiency, the uniformity is poor, so it is not suitable for areas requiring high uniformity. The method proposed in this paper can obtain a shaping beam with steep edge and high uniformity, with an energy efficiency of 43.71% and a minimum nonuniformity of 2.12%. It can be used in areas where high uniformity and steepness edge are required, such as scribing and removing films from coating materials (thin films without harming the substrate), and grooving in semiconductor materials (such as Low-K). This method is simple and easy to use, and it will broaden the scope of laser applications in the field of material processing.

Key words beam transmission; graded binary grating; graded orthogonal grating; laser processing