

# 两级复眼式准分子激光微加工 均束器的设计

李呈德 陈 涛 左铁钊

(北京工业大学国家产学研激光加工技术中心 北京 100022)

**提要** 介绍了一种两级复眼式均束器的设计。它不仅均匀效果好,传输效率高,输出光束截面尺寸连续可调,而且为掩模投影式准分子激光微加工系统提供了恰当的照明数值孔径,是准分子激光进行微机械、微光学、微电子等微细加工的优良照明系统。

**关键词** 准分子激光,微加工,均束器,复眼

## 1 引 言

准分子激光由于波长短、光子能量大、脉宽窄、脉冲功率密度高,刻蚀材料的纵横尺寸能高精度控制等优点,近年来被人们用作微机械、微光学等微加工手段。然而未经恰当处理的光束不能作此用途。

准分子激光器输出的光束截面长宽比约 2:1,纵横方向光强分布的规律不同。由于放电不稳定,气体循环换热不充分,工作气体的劣化和腔镜的污染增加了激光束能量分布的空间及时间不均匀性。若改变工作高压,则在脉冲能量变化的同时,光束截面的强度分布可有相当大的变化。长时间工作后,腔镜污染,光束截面上还会出现强度奇点和斑块。准分子激光纵横方向除了光强分布不同之外,发散度也不一致,通常横向比纵向的发散度大二倍或更多。这就是说光源本身存在固有成像畸变。

光强分布的均匀性常用可容忍的光强变化百分比来衡量,称之为“加工窗”(Process Window),激光微加工用的加工窗小于 $\pm 4\%$ ,即相对光强从 92~100%是可用的,然而未经腔外均匀化的准分子激光束落入此范围的能量分数可以很小<sup>[1]</sup>。用限模光阑既截取不出光强均匀度合适的截面,更无法解决发散度各向异性问题。为此,人们已发展了一些方法<sup>[2~7]</sup>。棱镜法<sup>[2]</sup>的均匀效果仅在输入光束严格对称时才令人满意,并且获得均匀光束截面的位置极严格地对应于光楔的角度。反射镜折叠光束法<sup>[3]</sup>装调极为困难。非球面透镜法<sup>[4]</sup>设计及加工不易。全息光栅滤波器<sup>[5]</sup>目前还只是用有机物材料制成,承受不了高功率紫外激光。万花筒法<sup>[6,7]</sup>制作、装调简易,价格低廉,但光能损失较大。本文采用两级复眼设计准分子激光微加工系统用整形均束器,取得了很好的效果。

## 2 设计原理

由  $m \times m$  个焦距和尺寸相同的小透镜单元组成的方形复眼透镜  $L$ , 将入射准直光束切分成  $m^2$  束子光束, 如图 1 所示。球面聚光镜  $L_5$  将各子光束会聚在其焦平面上。

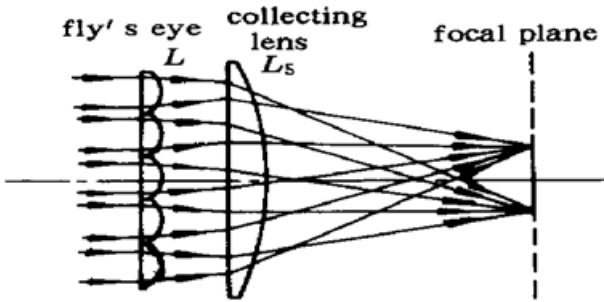


图 1 入射光束被复眼透镜切分并由聚光镜会聚  
 Fig. 1 Incident beam splitted by a fly's eye lens and collected by a convergent lens

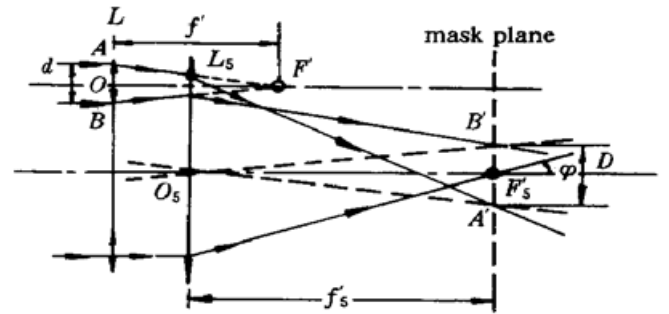


图 2 光学原理图  
 Fig. 2 Scheme of the optic concept

从图 2 可见, 绕聚光镜主光轴作对称分布的子光束, 在焦面上的叠加是互补叠加(准分子激光的能量分布一般是中心强周边弱)。即使光强分布为严重的不对称分布(如图 3), 经二切分叠加后, 大范围的光强差别就己能填平。当  $m$  增大时,  $m^2$  束子光束的叠加使光束截面的能量起伏被迅速抹平。这种高效积分光学器件使原始光束质量失去其重要性。

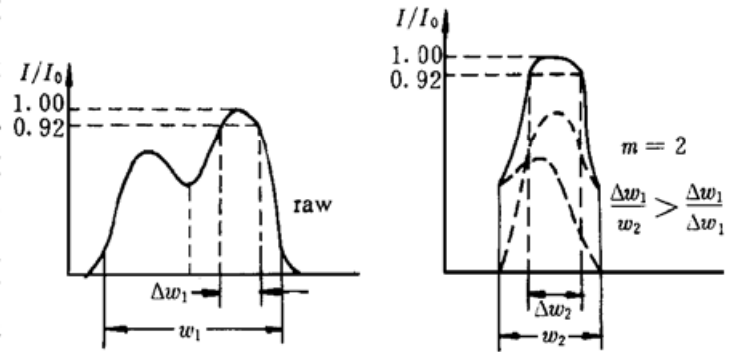


图 3 光束切分和叠加后可用能量分数提高  
 Fig. 3 The usable energy fraction is increased after splitting and overlaying of the beam

原则上  $m$  越大均匀效果越好, 但必须考虑各子光束之间的多光束干涉效应及各小透镜单元的衍射效应所致的微观能量起伏对微加工的影响。显然, 入射光束的相干性越差, 焦面上能量分布的微观均匀性越好。文献[3]用实验证明了脉冲 KrF 准分子激光相干性极差(或者不相干)。因此这种切分波阵面子光束叠加式均束装置很适合准分子激光微加工应用。

## 3 两级复眼式均束器及设计实例

两级复眼式均束器光路如图 4 所示。

设准分子激光器输出的矩形光束截面长为  $a$ , 宽为  $b$ , 用柱面负透镜  $L_1$  和柱面正透镜  $L_2$  构成的扩束器将短边  $b$  扩展至  $a$ 。 $m \times m$  复眼透镜由母线方向互相垂直的两组各  $m$  个焦距及尺寸完全相同的柱面透镜构成, 如图 5。

小柱面透镜的宽度

$$d = \frac{a}{m} \tag{1}$$

由图 2 可知, 均束器照明的数值孔径 NA 由聚光镜的焦距  $f_5'$  及小柱面透镜数目  $m$  和宽度  $d$  决定

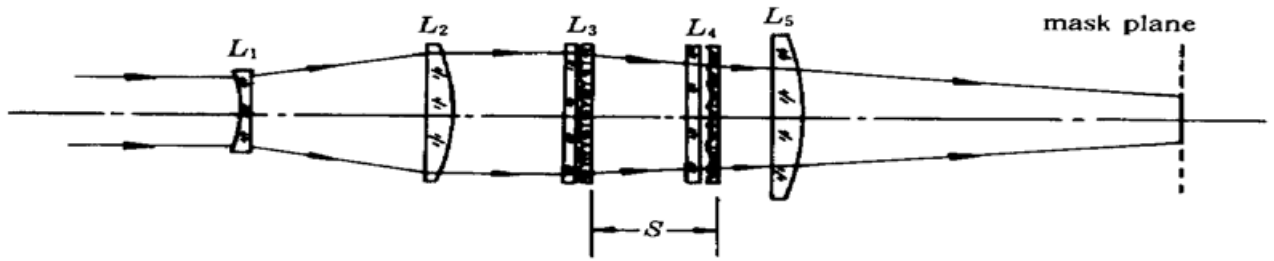


图4 两级复眼均束器的结构

Fig. 4 The configuration of the homogenizer constructed of two stage fly's eyes

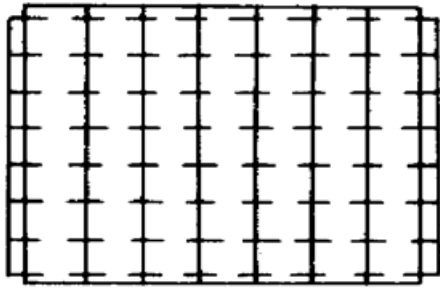


图5 复眼由两个交叉的柱面透镜阵列构成

Fig. 5 Fly's eye constructed of two crossed cylindrical lens arrays

$$NA = \sin \varphi = \frac{(m-1)d}{2f'_5} \quad (2)$$

照明数值孔径必须小于投影物镜的数值孔径。通常选取  $f'_5$  使 NA 在 0.01~0.02 之间。由于  $\triangle BOF'$  与  $\triangle B'F'_5O_5$  相似, 故有

$$\frac{D}{d} = \frac{f'_5}{f'} \quad (3)$$

其中  $f'$  为图2中复眼透镜的焦距;  $D$  为  $L_5$  焦面上的焦斑尺寸, 掩模即置于此焦面上, 故  $D$  即为均束器输出光束的截面尺寸。选取图2中复眼透镜的焦距  $f'$ , 可得所需光束的截面尺寸, 也同时决定了掩模平面上的能量密度。

若要改变掩模平面上的能量密度, 通过置换不同焦距的聚光镜  $L_5$  是最方便的, 然而却改变了照明数值孔径和掩模平面所处的位置。为此, 我们用两级复眼  $L_3, L_4$  代替图1, 图2中的  $L$ , 如图4所示。我们有

$$D = df'_5 \left| \frac{f'_3 + f'_4 - S}{f'_3 f'_4} \right| \quad (4)$$

其中,  $S$  为两复眼透镜之间距。

取  $f'_3 > 0, f'_4 < 0$ , 保证在  $L_3$  和  $L_4$  尺寸相同情况下, 光束全部通过  $L_4$ 。令

$$t = \frac{df'_5}{f'_3 |f'_4|} \quad (5)$$

(4)式可改写为

$$D = t(f'_3 - |f'_4|) - tS \quad (6)$$

让  $L_4$  固定不动, 使  $L_3$  沿光轴移动, 则输出光束截面尺寸  $D$  随间距  $S$  线性变化。  $t$  即为第一级复眼移动单位距离时焦斑尺寸的变化量。

给定焦面上所需的光束截面最大尺寸  $D_{\max}$ , 最小尺寸  $D_{\min}$ , 两复眼间最大距离  $S_{\max}$ , 最小距离  $S_{\min}$ , 即可确定  $f'_3, f'_4$ 。若给定  $D_{\max}, D_{\min}, S_{\min}, t$ , 则可确定  $f'_3, f'_4, S_{\max}$

$$f'_3 = \frac{1}{2t} \left[ (tS_{\min} + D_{\max}) \pm \sqrt{(tS_{\min} + D_{\max})^2 + 4tdf'_5} \right] \quad (7)$$

$$|f'_4| = \frac{df'_5}{f'_3} \quad (8)$$

$$S_{\max} = \frac{1}{D_{\max}} [(D_{\max} - D_{\min})(f'_3 - |f'_4|) + D_{\min} S_{\min}] \quad (9)$$

我们使用的  $\lambda$  Physik 305 iF Novatube 型准分子激光器, 工作电压为 23 kV 时输出光束截面为  $32 \times 15 \text{ mm}^2$ , 通过传输自然扩束及  $L_1$  和  $L_2$  组成的扩束器整形为  $35 \times 35 \text{ mm}^2$ 。复眼透镜由  $7 \times 7$  柱面阵列构成, 即  $m = 7$ 。取  $f_5' = 1000 \text{ mm}$ ,  $f_3' = 243 \text{ mm}$ ,  $f_4' = -123 \text{ mm}$ , 则输出光束由 49 束子光束叠加而成, 照明数值孔径  $\text{NA} = 0.015$ ,  $D = 24 - 0.2S$ 。当调节第一级复眼与第二级复眼之距离  $S$  在 20~110 mm 变化时, 掩膜面上均匀光束截面尺寸从 20 mm~2 mm 变化,  $L_3$  每走 1 mm 光束截面尺寸变化 0.2 mm。

## 4 实验结果

本均束器采用 JGS1 石英玻璃作光学材料。加工装调完成后, 用美国 Sensor Physics 紫外胶片拍摄原始光束及经整形均束后的光束, 用 Sensor Physics Laser Test LS-4 型激光光束质量分析仪测得光斑 3D 伪彩色图及通过光斑形心的  $x, y$  方向的光强分布曲线分别如图 6 和图 7 所示。输出平面上整个光束截面内光强均匀性优于  $\pm 2\%$ , 均匀平面有数毫米焦深。

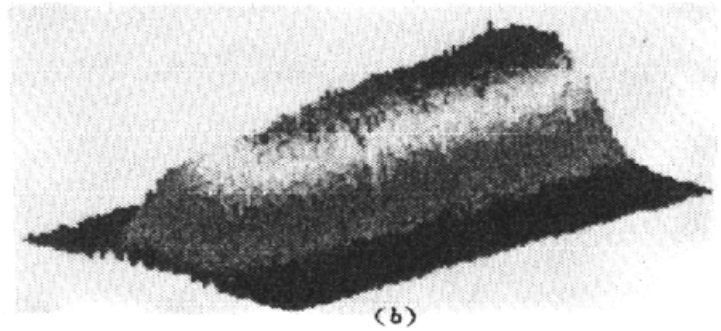
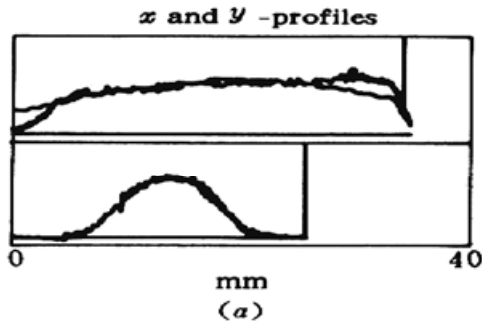


图 6 原始光斑通过形心的  $x, y$  光强分布曲线(a) 和光斑的 3D 伪彩色图(b)

Fig. 6  $x$  &  $y$ -profiles through the centroid and the false colour 3D-plot in front of the homogenizer

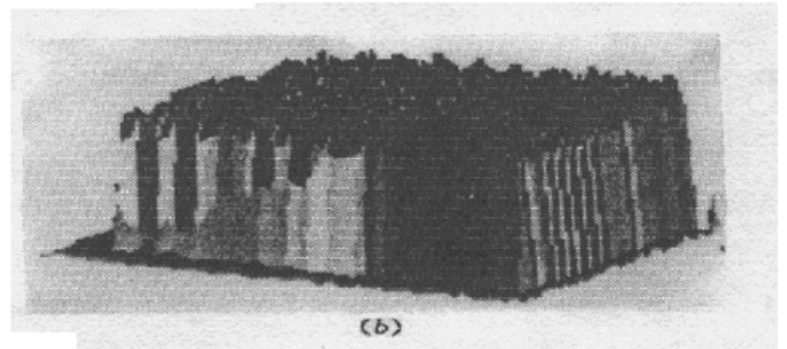
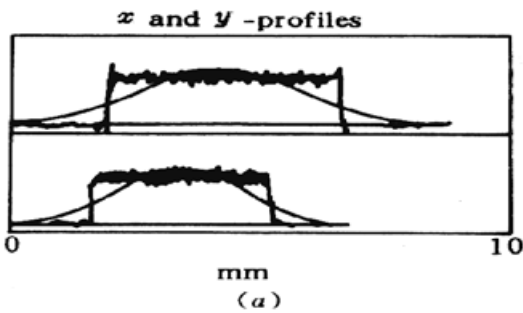


图 7 输出光斑通过形心的  $x, y$  光强分布曲线(a) 和光斑的 3D 伪彩色图(b)

Fig. 7  $x$  &  $y$ -profiles through the centroid and the false colour 3D-plot behind the homogenizer

用北京物科公司 LE-3C 型激光能量计配 IP-550 型激光能量探测器测量输入和输出能量, 表明光学元件未镀减反射膜时, 对 248 nm 波长激光的通光效率为 62%。镀减反射膜时效率可达 85%。

## 5 讨论

这种复眼式均束器将入射光束切分成  $m^2$  个子光束后叠加, 其高效率光强积分的结果, 使输出面上的能量分布极为均匀, 撇开了原始光束的空间及时间波动问题。从激光器输出的原

始光束,其水平与垂直方向的发散角不等,而通过此均束器后光线与光轴的夹角由均束器设计的数值孔径决定,这使微加工中的侧壁倾角可以按需控制,并且输出面上的能量密度可调。这种照明系统大大扩展了均束本身的含义。比如  $\lambda$  Physik 305iF 型激光器以 KrF 为工作气体,输出 248 nm 激光的单脉冲能量指标为 1.2 J,调节均束器使输出光束截面从  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  变化到  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  时,可在输出平面上获得  $150 \text{ mJ/cm}^2$  到超过  $15 \text{ J/cm}^2$  的能量密度。此能量密度范围已覆盖了有机物、陶瓷、玻璃及一定厚度的金属材料的刻蚀阈值,采用接触式共形掩模即已能进行微机械、微光学、微电子等加工。

### 参 考 文 献

- 1 G. Klauminzer, C. Abele. Excimer lasers need specifications for beam uniformity. *Laser Focus World*, 1991, **27**(5): 153~ 158
- 2 Y. Kawamura, Y. Itagaki, K. Toyoda *et al.*. A simple optical device for generating square flat-top intensity irradiation from a Gaussian laser beam. *Opt. Commun.*, 1983, **48**(1): 44~ 46
- 3 M. R. Latta, K. Jain. Beam intensity uniformization by mirror folding. *Opt. Commun.*, 1984, **49**(6): 435~ 439
- 4 P. W. Rhodes, D. L. Shealy. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20): 3545~ 3553
- 5 C. Y. Han, Y. Ishii, K. Murata. Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(22): 3644~ 3647
- 6 R. E. Grojean, D. Feldman. Production of flat top beam profiles for high energy lasers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**(3): 375~ 376
- 7 Dong Jinxing, Ye Zhenhuan, Gao Hongyi *et al.*. Improvement of the intensity homogeneity of excimer laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(12): 894~ 896 (in Chinese)
- 8 Zhang Bin, Lü Baida. Influence of the incident field coherence on the line focus uniformity. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1995, **7**(4): 521~ 527 (in Chinese)

## Design of Fly's Eye Homogenizer for Excimer Laser Micromachining

Li Chengde Chen Tao Zuo Tiechuan

(National Center of Laser Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Abstract** This paper describes a fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining. It has high performance in averaging the strong intensity fluctuations of the incident excimer laser beam and low transmitting loss. The dimension of the output beam can be adjusted continuously.

**Key words** excimer laser, micromachining, homogenizer, fly's eye