

准分子激光微透镜整形均束装置

靳羽华 赵 艳 蒋毅坚

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 报道了248 nm准分子激光微透镜整形均束装置的研制结果。实际采集并拍摄了248 nm准分子激光光能量分布的彩色图像,使用 Matlab分析处理该图像并提取了相关信息进行计算,通过光学软件ZEMAX模拟出符合实际准分子激光光能量分布的光源。通过分析空间光能量分布特征,设计并加工出一套适用于248 nm准分子激光的微透镜整形均束装置,且理论模拟和实际测试结果相吻合。248 nm准分子激光通过该光学系统整形均束后,可以在工作平面上得到一个约18 mm×18 mm的正方形光斑,光斑的能量均匀度误差(加工窗)在±2%以内,平顶因子为0.90,光能量通过率为85%左右,解决了248 nm准分子激光光斑形状不规则,且光斑能量分布不均匀的问题。该装置的研制成功,对于优质、高效地开展准分子激光微加工提供了具有自主知识产权的技术支撑。

关键词 激光光学; 准分子激光; 均束装置; 微透镜; 能量分布; 整形

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602003

Microlens Beam Shaping and Homogenizing Optical System for Excimer Laser

Jin Yuhua Zhao Yan Jiang Yijian

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Research results of microlens beam shaping and homogenizing optical system for the 248 nm excimer laser are reported. Through the actual filming, an excimer laser light energy distribution color image is obtained. Matlab is used to analyze the image and extract relevant information to calculate. Then an actual energy distribution of excimer laser light source is simulated by the optical software ZEMAX. According to the characteristics of the light energy spatial distribution, a microlens beam shaping and homogenizing optical system for the 248 nm excimer laser is designed and fabricated. The experimental results are in good agreement with the theoretical simulations. After the shaping and homogenizing, a high uniform beam spot is obtained finally. The profile of this spot is a standard square with a size of 18 mm×18 mm. The energy uniformity error (process window) of the beam spot is less than ±2%, and the top-hat factor of energy distribution is about 0.90. This optical system can transform 85% of the total input beam power into the work plane of output beam. The spot shape of original excimer laser is irregular, and the energy distribution is non-uniform. This technical scheme can be a good solution to these problems. The successful development of this optical system has independent intellectual property rights, and also provides a technical support for the excimer laser micromachining with high quality and efficiency.

Key words laser optics; excimer laser; homogenizer; microlens; energy distribution; shaping

OCIS codes 140.3300; 140.7240; 100.2960; 200.4860

1 引 言

准分子激光为峰值功率高、能量大的脉冲激光,同时具备波长在紫外波段的特殊性^[1],目前已经被应用于科研、医疗和工业等诸多领域。在科研方面,有使用准分子激光微制备微结构^[2],脉冲激光溅射沉积薄膜

收稿日期: 2014-12-10; 收到修改稿日期: 2015-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(11374031)、北京市自然科学基金B类重点项目(JC101311201201)

作者简介: 靳羽华(1988—),男,博士研究生,主要从事准分子激光外光路系统方面的研究。E-mail: yhj@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 蒋毅坚(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: yjjang@bjut.edu.cn

^[3],激光辐照材料表面改性^[4]等;医疗方面,有使用准分子激光进行眼科手术^[5]以及治疗皮肤病^[6]等;工业领域,有准分子激光低温硅退火^[7],激光光刻制造^[8],高性能电路板的制作^[9]等。

由于准分子激光器的工作原理所限,通常情况下其激光束的光斑形状并不规则且能量分布较为复杂^[10],同时光能量的分布也可能因为使用条件的不同而发生变化^[11]。而对于大部分激光加工或科学研究,则要求辐射光束光斑形状规则且能量分布均匀^[12-15]。为此,国内外学者进行了大量的理论探讨和实验研究,如Jasper等^[16]设计了一种低衍射角准分子激光均束装置;Hugel等^[17]提出了一种中空光纤准分子激光整形均束系统;Kajava等^[18]设计了一种分光光栅型准分子激光均束装置;Zimmermann等^[19]对微透镜阵列光整形均束装置做了较为详细的讨论;李红霞等^[20-21]设计了一种三级梯形棱镜均束器;杜国军等^[22-23]提出使用十字交叉的柱面透镜来构成微透镜阵列等等。

但是,目前各种类型的整形或均束光学系统在解决问题的同时却又存在一些局限性。低衍射角准分子激光均束装置^[16]光能量的损耗过大,且该均束器在设计时仅针对改变光束短轴方向的光强度分布,均束效果有限;中空光纤准分子激光整形均束系统^[17]出射光束边缘能量扩散明显;分光光栅型准分子激光均束装置^[18]光栅本身的制作工艺复杂,成本较高;三级梯形棱镜均束器^[20-21]的原理实质上是近似地将激光中心光强分散到周边,因此均束的效果无法满足对光斑质量要求比较高的工作环境;对于光束的均匀化且同时具有整形效果的光学系统最为理想的就是微透镜阵列光整形均束装置^[19],但是装置本身的设计和加工难度比较大,若采用传统的十字交叉的柱面透镜构成的微透镜阵列结构^[22-23]将影响整体光学元件的光传输质量和光学性能。另外,由于准分子激光的光学特性比较复杂,对于准分子激光的光学系统设计,大部分研究都是通过理论计算来实现的,很少有通过分析实测光源的空间光能量分布特征,同时结合光学软件模拟以及数学优化以达到理想效果的设计思想。

本文报道了248 nm准分子激光微透镜整形均束装置的研制结果,通过分析实测光源的空间光能量分布特征,同时结合光学软件的模拟以及数学方法的优化,设计出效果理想的整形均束光学系统。根据设计方案加工出光学系统,通过实验进行测试,将实验结果与理论模拟进行对比,对其整形和均束性能进行了综合评价。

2 基本原理及设计方案

微透镜整形均束装置的设计是针对德国Lambda Physik公司LPX 305iF型KrF准分子激光器,其输出激光的波长为248 nm,最高单脉冲能量为1200 mJ,脉宽为30 ns,最高重复频率为50 Hz,最高重复频率下最大稳定脉冲能量为1000 mJ,平均功率为60 W。该激光器输出光尺寸在 x 方向为12 mm, y 方向为30 mm,光束发散角在 x 方向为1 mrad, y 方向为3 mrad,在实际的辐照应用中,光斑形状呈现为明显的长方形,且辐照区域的能量分布非常不均匀。

在准分子激光加工中,对于辐照能量的均匀性,一般使用“加工窗”这一指标来衡量,即辐照区域可容忍的光强变化百分比,不同的应用情况所对应加工窗的需求不同,大多数应用需求为 $\pm 10\%$;通常情况下微加工用的加工窗在 $\pm 4\%$ 的范围以内;而对更高的使用需求,例如像眼角膜组织切削的精细微加工,则要求加工窗控制在 $\pm 3\%$ 的范围以内^[23-24]。设计希望通过使用微透镜阵列光学系统的经典结构,对原始准分子激光的辐照能量进行整形和均匀化处理,使其在工作平面可以获得形状规则、且能量均匀性满足微加工需求(即加工窗在 $\pm 4\%$,甚至 $\pm 3\%$ 的范围以内)的辐照光斑。

微透镜阵列整形均束装置可简单分为两类:由一个微透镜阵列和一个傅里叶球面镜所组成的光学系统,如图1(a)所示;由两个微透镜阵列和一个傅里叶透镜所组成的光学系统,如图1(b)所示。

两种微透镜阵列整形均束装置的基本原理是相同的。从成像光学的角度来描述其实现光束辐照整形的原理:当入射光照射至微透镜阵列时,可将所入射的微透镜阵列视为一个多重光源阵列,每一个微透镜单元即光源阵列单元的像经过傅里叶球面镜后将叠加在均束平面的同一位置,由于光源阵列单元的像轮廓即为微透镜单元的光瞳轮廓,因此在均束平面上叠加后的像轮廓即光斑形状将与微透镜单元的光瞳轮廓一致;从非成像光学的角度来描述其实现光束辐照均匀的原理:当入射光经过微透镜阵列时,由于微透镜单元的光学作用形成彼此独立传播的光通道,每束光通道内光能量的均匀度会优于入射光,经过傅里叶球面镜将光通道内的能量叠加于均束平面的同一区域,叠加后重新生成的光斑其辐照能量均匀度会远高于初始入射光斑。

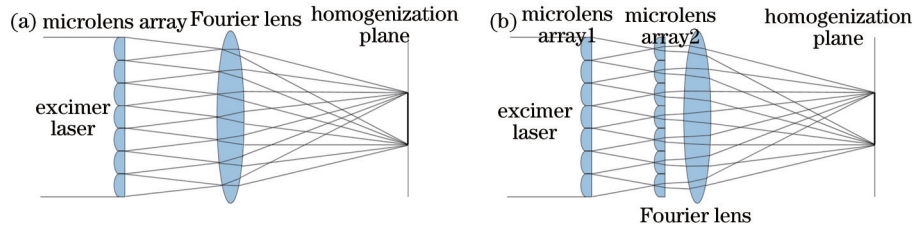


图1 微透镜整形均束装置示意。(a)单一微透镜阵列;(b)双微透镜阵列

Fig.1 Sketch of the microlens beam shaping and homogenizing optical system. (a) Single microlens array; (b) double microlens array

一般来说,由双微透镜阵列组成的光学系统对于光束辐照整形以及能量均匀化的能力是优于单一微透镜阵列光学系统的,这样的整形均束装置通常在结构上采用两个光学参数完全相同微透镜阵列,且第二透镜阵列位于第一阵列的光学焦面上,此时的第二微透镜阵列会充当一个场镜阵列的角色,这会在第一微透镜阵列和傅里叶球面镜之间形成一种场镜效应^[25],该效应可以让入射光束中一些非准直的光线也可以很好地落在光斑内部,光束经过光学系统后所辐照光斑的边缘能量差异将大大降低,从而得到更为理想的整形和均束效果。

所设计的光学系统将接受高能脉冲紫外激光的辐照,若采用图1(b)所示的传统双微透镜阵列结构,经过第一微透镜阵列光通道内的紫外光能量将会聚焦在第二透镜阵列面上,这样会直接破坏掉第二微透镜阵列的材料,导致光学系统无法使用。在这种情况下,需要使用两个焦距不同的微透镜阵列来组建光学系统,使第二微透镜阵列位于第一微透镜阵列的焦平面之后,以避免经过第一微透镜阵列的光束聚焦后破坏第二微透镜阵列的材料。较传统光学系统结构,即使用两个相同微透镜阵列的结构而言,采用不同焦距的微透镜阵列来组建光学系统会对第二微透镜阵列发挥的场镜效应产生一定影响,增添光学设计难度的同时也会影响到最终光学系统对于入射光束的整形和均束效果。为了取得最优化的整形和均束辐照效果,需要通过分析实测光源的空间光能量分布特征,同时结合光学软件模拟以及数学方法优化光学系统的光学参数,所设计光学系统的整体光路结构如图2所示。

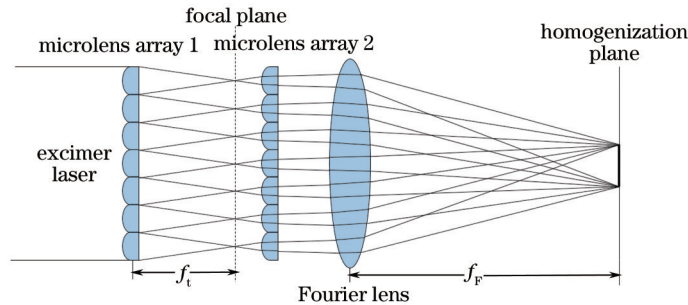


图2 所设计光学系统光路结构示意图

Fig.2 Schematic setup of the optical system designed for the 248 nm excimer laser

对于微透镜单元孔型的选择,若选用方形微透镜来组成微透镜阵列,则根据成像原理在傅里叶透镜的工作平面获得方形光斑;若选用圆形或正六边形微透镜,则会在傅里叶透镜的工作平面分别获得圆形或正六边形的光斑。选用方形微透镜能够确保光能量通过光学系统时会有更高的填充率,通常情况下可以达到98%以上。所设计的两个微透镜阵列均由正方形平凸面型的微透镜单元所构成,为了使光路形成光通道,保持微透镜单元的尺寸和数目一致。由于该结构不同于传统结构,需要在初步的设计过程中限定边界条件来避免结构的变化。假设该光学系统为理想的光学系统,可以使用近轴光学计算来进行近似分析。追迹光学系统内任意两个相邻光学表面间的近轴光线,如图3所示。

设光线由折射率为 n_i 的介质入射至折射率为 n_{i+1} 的介质,入射至光学表面 i 时,其入射方向与光轴夹角为 u_i ,光线与表面交点高度为 y_i ;入射至光学表面 $i+1$ 时,其入射方向与光轴夹角为 u_{i+1} ,光线与表面交点高度为 y_{i+1} ;光学表面 i 与光学表面 $i+1$ 的曲率分别为 C_i 和 C_{i+1} (平面可视为曲率为0的特殊情况),轴向间隔为 s_i 。为了方便计算,规定曲率中心在光轴左侧,曲率为正,反之为负;若光线顺时针转到光轴,则光线与光轴夹角 u_i, u_{i+1} 为正,反之为负。则近轴光线通过光学系统内两个相邻的光学表面有如下递推追迹公式:

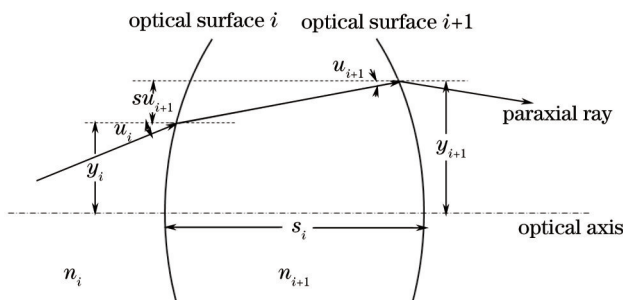


图3 近轴光线通过两个相邻光学表面追迹

Fig. 3 Paraxial raytracing through two continuous optical surfaces

$$u_{i+1} = \frac{n_i}{n_{i+1}} u_i - \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1}} y_i C_i, \quad (1)$$

$$y_{i+1} = y_i + s_{i+1} u_{i+1}. \quad (2)$$

追迹第一微透镜阵列与第二微透镜阵列之间近轴光通道内的一束边缘光线,如图4所示。

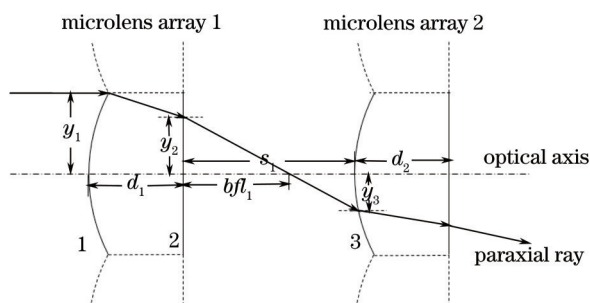


图4 第一微透镜阵列与第二微透镜阵列间近轴光线追迹

Fig. 4 Paraxial raytracing through microlens array 1 and microlens array 2

设定光学系统中各个光学参数变量如下:两个微透镜阵列微透镜周期间距(微透镜单元尺寸)均为 p ;第一微透镜阵列、第二微透镜阵列微透镜单元的凸面曲率分别为 C_1 、 C_2 ,其厚度分别为 d_1 、 d_2 ;第一微透镜阵列与第二微透镜阵列之间的距离为 s_1 ;第一微透镜阵列、第二微透镜阵列的材料统一,设其折射率为 n' ,空气折射率为 n 。假设入射光线准直且与光轴平行,利用(1)式和(2)式递推追迹该光线至第三平面,即第二微透镜阵列微透镜单元前表面,

$$y_3 = \frac{p}{2} \left[1 + \left(\frac{d_1}{n'} + \frac{s_1}{n} \right) (n - n') \right], \quad (3)$$

$$f_{b1} = \left| \frac{n}{n' - n} C_1 - \frac{n}{n'} d_1 \right|, \quad (4)$$

式中 y_3 为光线与第二微透镜阵列微透镜单元前表面的交点的高度, f_{b1} 为第一微透镜阵列微透镜单元的后焦距。设计中第二微透镜阵列应位于第一微透镜阵列的焦平面之后,准确描述为 $s_1 > f_{b1}$;与此同时,如果两微透镜阵列的距离过远则会造成第二微透镜阵列单元上接收到的光通道尺寸过大而光线“溢出”,此时 $|y_3| > \frac{p}{2}$,光通道中“溢出”的部分则会在均束平面上产生不必要的多重像,这会对光斑辐照的均束效果造成不利影响。以上情况可使用数学语言来限定设计参数的边界条件:

$$\begin{cases} \left| 1 + (n - n') \left(\frac{d_1}{n'} + \frac{s_1}{n} \right) C_1 \right| < 1, \\ s_1 > \left| \frac{n}{n' - n} C_1 - \frac{n}{n'} d_1 \right|. \end{cases} \quad (5)$$

假定该光学系统为理想光学系统,可进一步利用近轴矩阵变换得到均束光斑尺寸与微透镜阵列整形均束装置元件参数之间的联系:

$$D_H = p \cdot f_f \cdot \frac{f_1 + f_2 - s_1}{f_1 f_2}, \quad (6)$$

式中 D_H 为均束平面上接收到的光斑尺寸, f_f 为傅里叶球面镜的焦距, f_1 、 f_2 分别为第一微透镜阵列和第二微透镜阵列微透镜单元的焦距, s_1 为第一微透镜阵列与第二微透镜阵列之间的距离。

根据理论计算得到的光斑尺寸 D_H 可以推导出理想条件下光束在均束平面后的发散角(半角)公式:

$$\tan \theta = \frac{1}{2} \left(\frac{d - 2p + D_H}{f_f} + \frac{f_2 \cdot p}{f_1 \cdot f_f} \right), \quad (7)$$

式中 d 为入射光学系统光束截面尺寸。

3 光学系统模拟及优化

准分子激光空间光能量分布较为复杂,通过实际拍摄到的准分子激光光能量分布的彩色图像,可以使用 Matlab 计算并分析出其光能量分布规律,进而使用光学 CAD 软件 ZEMAX 模拟出实际测试到的准分子激光光能量分布^[26]。使用美国 Spiricon 公司的 LBA-usb-L230 型激光光束分析仪对准分子激光光斑能量分布进行实时跟踪捕捉。将准分子激光器的单脉冲能量调整为 800 mJ,脉冲频率为 2 Hz,在距离出光口 50 cm 即光束入射光学系统的位置放置投射屏幕,调整光路使激光光斑可以完整投射到屏幕中心。开后维持激光输出一段时间直至脉冲能量稳定,将图像捕获开关调整为脉冲触发模式,当激光脉冲能量被仪器检测到时,捕获该帧并进行分析,最终可得到准分子激光光斑能量分布的彩色图像。

通过使用子光源叠加的方法可以模拟出空间能量分布比较复杂的准分子激光:首先使用数学软件 Matlab 对拍摄得到的光能量分布图像进行分析,可以提取出相关光能量分布数据;然后选用高阶高斯光源为子光源模型对数据进行拟合,得到光能量分布的规律并且生成各子光源的模型参数;最后在 ZEMAX 软件中使用计算所得到的参数建立子光源并进行叠加模拟,最终得到空间能量分布特征与实测准分子激光相符的虚拟光源。图 5(a)为使用激光光束分析仪拍摄得到的该准分子激光器出射激光光斑能量分布图像,图 5(b)为使用 ZEMAX 模拟准分子激光得到的光能量分布图像。图 6 为拍摄得到的光斑能量分布图像中 x 方向和 y 方向的能量分

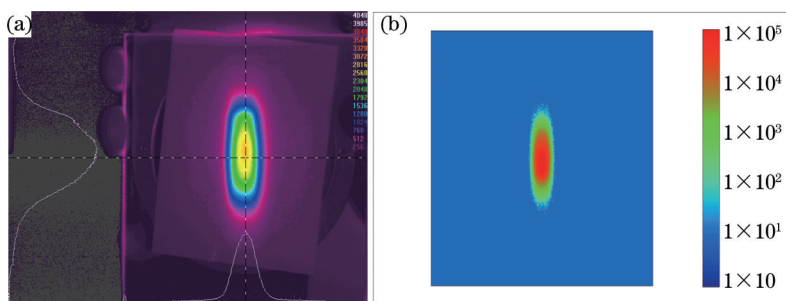


图 5 实际拍摄得到的 248 nm 准分子激光光斑能量分布与模拟光斑能量分布对比图。(a) 激光光束分析仪拍摄到的光能量分布彩色图像;(b) 由 ZEMAX 模拟得到的光能量分布彩色图像

Fig.5 Comparison chart of the actual captured energy image and its simulation of the 248 nm excimer laser.

(a) Color image of energy distribution photographed by laser beam analyzer; (b) color image of energy distribution simulated by ZEMAX

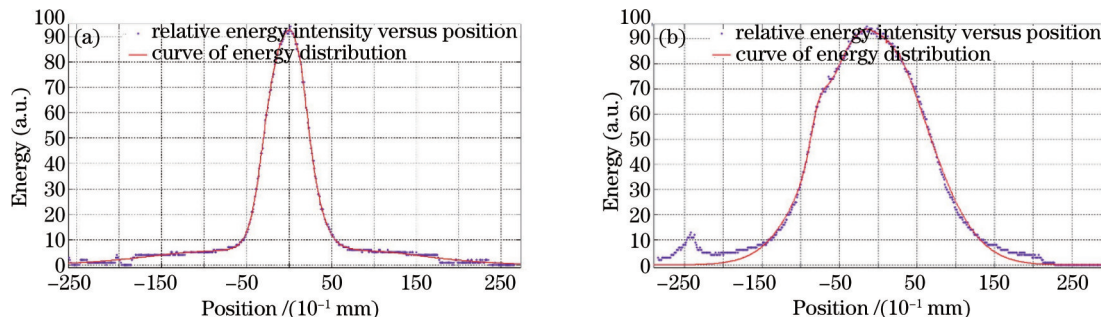


图 6 实测准分子激光能量分布曲线。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig.6 Energy intensity distribution curve of the excimer laser measured by laser beam analyzer. (a) x direction; (b) y direction

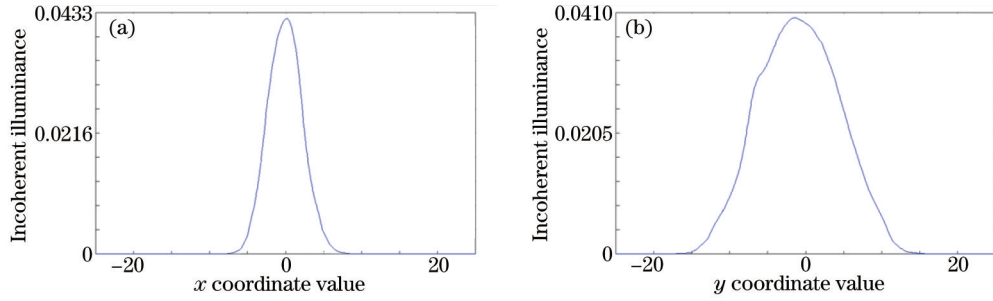


图7 模拟光源光能量分布曲线。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig.7 Energy intensity distribution curve of the visual light source simulated by ZEMAX. (a) x direction; (b) y direction
布曲线,图7为使用光学软件ZEMAX模拟得到的光源在辐照时 x 方向和 y 方向的能量分布曲线。

针对已经得到的光源,使用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法生成符合光源空间能量分布特性的随机光线,对于每一条生成的光线都可以根据其初始状态追踪该光线经过光学系统时的传播路径,最终得到其所表示的光能量在均束平面上的落点位置。

空间光线追迹过程的数学原理为:选用右手坐标系, x 轴与光学系统的光轴重合。假设空间里任意光学面 F_i 上点 $E(x,y,z)$ 为某一光线的出发点,光线在传播距离 s 后落在下一个折射面 F_{i+1} 上,落点为 $E'(x',y',z')$ 。光学表面间隔为 d ,光能量由折射率为 n 的介质传播进入折射率为 n' 的介质。具体的光路如图8所示。

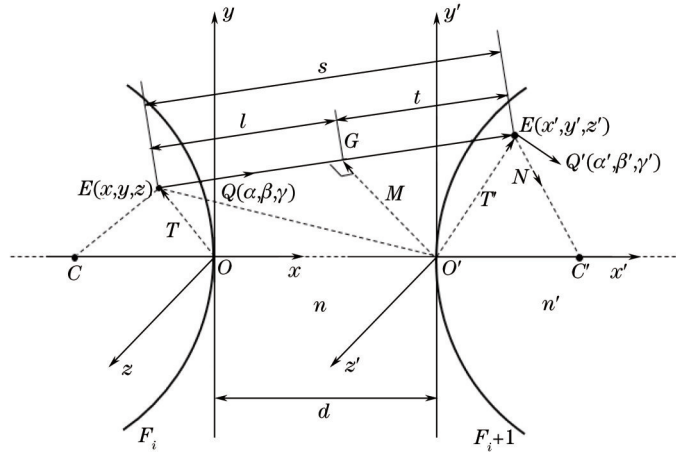


图8 介质空间中任意两连续球面间光线传播的几何光路示意图

Fig.8 Geometric optical diagram of the ray propagation through two continuous spherical surfaces in medium space

光线起始的状态可以用两个矢量来表示:一个是表示能量点位置的矢量 $T(x,y,z)$;另一个是表示能量传播方向的单位矢量 $Q(\alpha,\beta,\gamma)$,有:

$$T(x,y,z) = xi + yj + zk, \quad (8)$$

$$Q(\alpha,\beta,\gamma) = \alpha i + \beta j + \gamma k, \quad (9)$$

式中的 i 、 j 、 k 分别为沿 x 、 y 、 z 轴方向的单位矢量。相应地,对于光线在下一个光学表面的落点位置以及折射后的方向用矢量 $T'(x',y',z')$ 及 $Q'(\alpha',\beta',\gamma')$ 来表示:

$$T'(x',y',z') = x' i + y' j + z' k, \quad (10)$$

$$Q'(\alpha',\beta',\gamma') = \alpha' i + \beta' j + \gamma' k. \quad (11)$$

引入中间参考量,由曲面顶点 O' 向空间光线做垂线,相交于点 G ,其位置用矢量 $M(M_x, M_y, M_z)$ 来表示;能量在折射曲面 F_{i+1} 上的落点 E' 处的法线方向单位矢量为 $N(\lambda, \mu, \nu)$;设 $EG=l, GE'=t$,则 $EE'=s=l+t$ 。

在四边形 $OEGO'$ 中,有 $OE+EG=OO'+O'G$,则:

$$T + lQ = di + M. \quad (12)$$

对(12)式两边做 Q 的点积:

$$l = di \cdot Q - T \cdot Q. \quad (13)$$

将 T 和 Q 的分量(8)式和(9)式代入(13)式,有:

$$l = \alpha(d-x) - \beta y - \gamma z. \quad (14)$$

将(14)式代入(12)式可以得到所引入的中间参量 M 的矢量表达式:

$$M = (x-d+\alpha l)i + (y+\beta l)j + (z+\gamma l)k. \quad (15)$$

则 $M(M_x, M_y, M_z)$ 中分量 M_x 为:

$$M_x = x - d + \alpha l. \quad (16)$$

在直角三角形 $O'GE'$ 中有 $O'G+GE'=O'E'$ 、 $O'G^2+GE'^2=O'E'^2$, 有:

$$M + tQ = T', \quad (17)$$

$$T'^2 = M^2 + t^2. \quad (18)$$

对(17)式两边做单位向量 i 的点积,可以得到:

$$i \cdot T' = i \cdot (M + tQ) = M_x + t\alpha. \quad (19)$$

若点 $E'(x', y', z')$ 在球面上(平面可视为球面中的特殊情况,即 $r=\infty$), 则应满足空间的球面方程式,有:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - 2rx' = 0. \quad (20)$$

将(20)式写为矢量式,则有:

$$T'^2 - 2ri \cdot T' = 0. \quad (21)$$

将(18)式、(19)式代入(21)式,整理后可以得到一个关于 t 的方程:

$$t^2 - 2r\alpha t + (M^2 - 2rM_x) = 0. \quad (22)$$

解得 $t = \alpha r - \sqrt{\alpha^2 r^2 - M^2 + 2rM_x}$ (另一个解 $t = \alpha r + \sqrt{\alpha^2 r^2 - M^2 + 2rM_x}$ 代表光线和球面在背面的另一个交点,没有实际意义),考虑到如果球面半径 r 很大时,此表达式为两大数之差,误差较大。因此,将 t 的表达式变形为分式形式,且将曲面半径 r 用曲率 C 来替代,即 $r=1/C$, 则有:

$$t = \frac{M^2 C - 2M_x}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - M^2 C^2 + 2M_x C^2}}. \quad (23)$$

利用(23)式计算 t 时,若根号中的数小于零,则代表光线与曲面没有交点。将(23)式代入(17)式,同时将式中的 M 、 Q 以分量形式代入,可以计算出光线在下一个折射曲面 F_{i+1} 上落点位置矢量 T' 的分量公式:

$$\begin{cases} x' = x + s\alpha - t \\ y' = y + s\beta \\ z' = z + s\gamma \end{cases}. \quad (24)$$

在三角形 $O'E'C$ 中,有 $O'E' + E'C = O'C$, 则:

$$T' + rN = ri, \quad (25)$$

式中 $N(\lambda, \mu, \nu)$ 为折射球面法线方向的单位矢量,分别将 T' 、 N 、 i 以分量形式代入可以得到:

$$\begin{cases} \lambda = 1 - Cx' \\ \mu = -Cy' \\ \nu = -Cz' \end{cases}. \quad (26)$$

设光线传播至折射曲面 F_{i+1} 时的入射角为 I 、折射角为 I' , 则有:

$$\cos I = Q \cdot N = \alpha\lambda + \beta\mu + \gamma\nu. \quad (27)$$

将(26)式代入(27)式,可以计算出:

$$\cos I = \alpha(1 - Cx') - \beta Cy' - \gamma Cz'. \quad (28)$$

根据折射定律的一般形式可以计算出:

$$\cos I' = \sqrt{1 - \frac{n^2}{n'^2}(1 - \cos^2 I)}. \quad (29)$$

根据折射定律的矢量形式有:

$$n'Q' - nQ = \Gamma N, \quad (30)$$

式中 Γ 为空间光线的偏向常数,根据(28)式及(29)式的结果可计算出:

$$\Gamma = n' \cos I' - n \cos I. \quad (31)$$

将向量 \mathbf{Q} 和 \mathbf{N} 的分量代入(30)式,整理后可以得到经曲面 F_{i+1} 折射后光能量传播方向单位矢量 $Q'(\alpha', \beta', \gamma')$ 的分量:

$$\begin{cases} \alpha' = \frac{n}{n'}\alpha + \frac{\Gamma}{n'}(1 - Cx') \\ \beta' = \frac{n}{n'}\beta - \frac{\Gamma}{n'}Cy' \\ \gamma' = \frac{n}{n'}\gamma - \frac{\Gamma}{n'}Cz' \end{cases}. \quad (32)$$

由(24)式和(32)式可知,若在曲面 F_i 上光线出发位置矢量 $T(x, y, z)$ 及光线传播方向单位矢量 $Q(\alpha, \beta, \gamma)$ 已知,可以通过计算得出能量在下一个曲面 F_{i+1} 上的落点位置矢量 $T'(x', y', z')$ 及折射后的传播方向单位矢量 $Q'(\alpha', \beta', \gamma')$ 。经过递推计算,最终得到光线所表示的光能量在均束平面上的落点位置。

模拟所设计的微透镜阵列整形均束装置,追迹所有根据模拟光源所生成的光线,在均束平面上放置光能量探测器,就可以得到均束平面上辐照光斑的光能量分布,进而反馈光学系统对于光束整形和能量均匀化的结果。从几何光学的角度来说,针对入射光源的尺寸,选择更多的微透镜单元来组建微透镜阵列会在光学系统的光路中构建出更多的光通道,这意味着初始入射光能量在传播过程中会被分散进更多的光通道,经过傅里叶球面镜将光通道内的能量叠加于均束平面的同一区域后,会在均束平面上获得更好的能量均匀化结果。但是从物理光学的角度来考虑,更密集的微透镜单元会加强各光通道之间的干涉效应,并且更小的透镜单元孔径会使光通道内光能量的衍射效应变得明显,最终会影响到光学系统的均束效果。除此之外,由于所设计的微透镜阵列需要单独加工,选用更小、更多的微透镜单元会大幅增添微透镜阵列的加工难度和加工成本。为了使光学系统的设计满足微加工的使用需求,综合考虑上述因素并且通过光学软件的初步模拟衡量测试后,选择使用了 $3.4 \text{ mm} \times 3.4 \text{ mm}$ 的微透镜单元组建 12×12 级的微透镜阵列,此时所得到的光斑能量均匀程度与准分子激光微加工的需求范围已较为接近。经过模拟,可以从光探测器上观测到由初始设计方案带来的整形均束效果,探测得到的经过整形和均束后的光斑能量分布如图9所示, x 方向和 y 方向的能量分布强度曲线如图10所示。

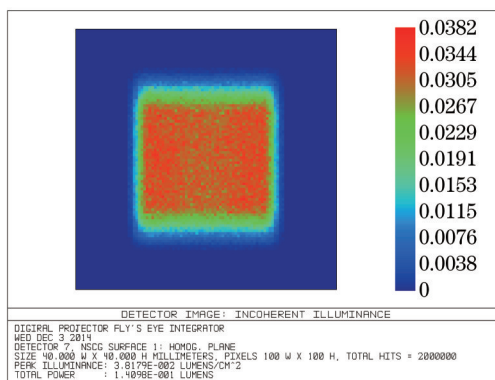


图9 使用初始设计及方案在探测器上得到的光斑能量分布图

Fig.9 Intensity distribution on the detector using the initial design

从图中可以看出,在光斑内部的光强度分布均匀度已经有所提高,但是光强度分布曲线不平滑,辐照能量变化的起伏较明显;光斑的大体形状已经成为正方形,但是光斑边缘能量的起伏变化较大,平顶强度分布的状态基本已经达到,但是边缘能量发散比较明显。经过计算光斑平顶因子为0.80,光斑最高光强度与光斑最低光强度的差值在整个光强的12%以内,即相对光强从88%~100%是可用的,其能量均匀度误差在 $\pm 6\%$ 以内,也就是说,经过所设计的微透镜准分子激光整形均束装置后的准分子激光,其加工窗在 $\pm 6\%$ 以内。这表明,对于与实测光源空间能量分布特征保持一致的模拟光源,经过近轴理论设计的光学系统对光束辐照并没有达到理想的整形和均束效果,第二微透镜阵列的场镜效应也没有发挥出理想的作用。此时所设计的光学系统,加工窗范围相对较大,无法满足准分子激光微加工的需求,若直接投入到实际工作中,为了缩小加

工窗范围,只能勉强通过加盖掩膜的方式以屏蔽掉光斑边缘能量,这会一定程度上降低光能量的有效利用率,也会减少光斑的有效辐照面积。对于所设计的光学系统,可以将光探测器上得到的光能量强度分布数据作为依据,利用数学方法对光学系统做进一步优化。

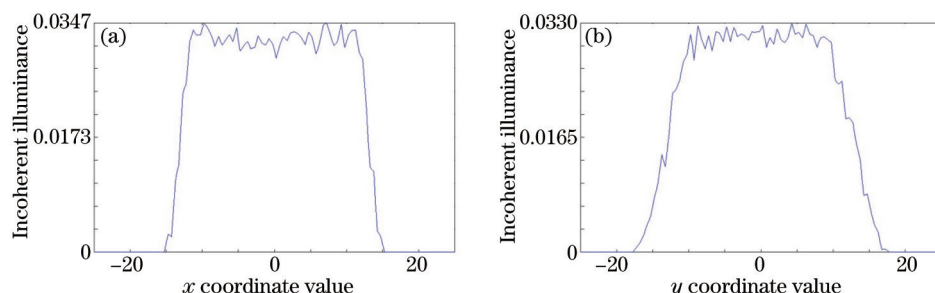


图 10 光能量分布曲线。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig.10 Curve of the energy intensity distribution. (a) x direction; (b) y direction

以均束平面为分析对象,将光探测器上的光束照明区域等分为 $k \times k$ 个正方形的网格区域, $k \in Z^*$, 均束平面的照明区域中,每一个方格可代表一个能量接收单元,通过统计单元范围内的接收到的光线能量点并累加其能量,可以得到该能量单元上存在的光能量强度,以能量单元为分析单位来进行数学运算。设在 $k \times k$ 个能量接收单元中,第 α 行第 β 列单元所接收到的能量强度为 $I_{\alpha\beta}$,照明区域的单元平均光强度为

$$\bar{I} = \frac{1}{k^2} \sum_{\alpha=1}^k \sum_{\beta=1}^k I_{\alpha\beta}, \quad (33)$$

单元能量的均方根偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k^2} \left(\sum_{\alpha=1}^k \sum_{\beta=1}^k (I_{\alpha\beta} - \bar{I})^2 \right)}. \quad (34)$$

(34)式以能量单元为单位评价光能量的均匀度, σ 的值越小则说明光能量的均匀度越高,完全均匀的光能量分布, σ 值为 0。根据光学系统的结构选取优化光学参数,考虑到傅里叶球面镜在光学系统中的作用是傅里叶变换成像,优化过程只考虑和微透镜阵列有关的光学参数,包括两个微透镜阵列的凸面曲率 C_1, C_2 , 厚度 d_1, d_2 , 间距 s_1 , 以及第二微透镜阵列与傅里叶球面镜之间的间距 s_2 。 σ 应该是一个关于 $C_1, C_2, d_1, d_2, s_1, s_2$ 的非线性的多元函数,为了简化可用 $x_1 \sim x_6$ 来分别表示各个光学参数,该非线性的多元函数可表示为 $\sigma(x_1, \dots, x_6)$; 若 $x_1^0 \sim x_6^0$ 为初始光学参数,在其附近对 $\sigma(x_1, \dots, x_6)$ 按泰勒级数展开,只保留线性项,其表达式如下:

$$\sigma(x_1, \dots, x_6) = \sigma(x_1^0, \dots, x_6^0) + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial \sigma(x_1^0, \dots, x_6^0)}{\partial x_i} (x_i - x_i^0), \quad (35)$$

式中 x_i 为经过迭代优化后的光学参数, x_i^0 为优化前光学参数, $x_i - x_i^0$ 记作 Δx_i , $\frac{\partial \sigma(x_1^0, \dots, x_6^0)}{\partial x_i}$ 记作 $a_i, i=1, \dots, 6$; $\sigma(x_1^0, \dots, x_6^0)$ 是采用初始光学参数时的能量均方根偏差,可表示为 σ^0 , 将(34)式表示为代数形式:

$$\sigma(x_1, \dots, x_6) = \sigma^0 + a_1 \Delta x_1 + a_2 \Delta x_2 + a_3 \Delta x_3 + a_4 \Delta x_4 + a_5 \Delta x_5 + a_6 \Delta x_6. \quad (36)$$

将(36)式表示为矩阵式:

$$\sigma = \sigma^0 + A \Delta x, \quad (37)$$

式中 $\sigma = \sigma(x_1, \dots, x_6)$, $\sigma^0 = \sigma^0$, $A = [a_1, \dots, a_6]$, $\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \dots \\ \Delta x_6 \end{bmatrix}$; 令 $\Phi = \sigma^2$, 则 Φ 为极小值时 σ 也为极小,且根据多元

函数的极限值理论有: $\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} = 0, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial x_6} = 0$, 表示为矩阵式:

$$\text{grad}(\Phi) = 2A^T \sigma = 0. \quad (38)$$

将(37)式代入(38)式得到矩阵式的关系方程:

$$A^T A \Delta x = -A^T \sigma^0. \quad (39)$$

由(39)式可以解得 Δx , 即 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta x_5, \Delta x_6$, 对于初始光学参数的每一项 $x_1^0 \sim x_6^0$ 分别给以

增量 $\Delta x_1 \sim \Delta x_6$, 可得到经过优化后的 $x_1 \sim x_6$, 将优化后的光学参数代入运算可以得到新的单元能量的均方根偏差, 再将优化后的曲率作为初始曲率, 重复上述过程直至单元能量的均方根偏差不再降低, 得到光学系统的最优光学参数。

经过优化确定光学系统所有参数, 最终在均束平面的光探测器上得到了较为理想的光能量强度分布, 整形均束效果如图 11 所示。

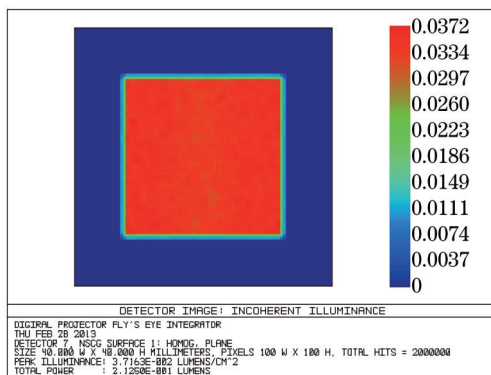


图 11 经过优化探测器上的光斑能量分布

Fig.11 Intensity distribution on the detector after being optimized

由光斑在探测器中的坐标易知光斑尺寸约为 $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$, 分析此光斑的光强度分布, 已经达到了一个较为理想的均匀程度, 而且光斑边缘能量的起伏状态明显降低, 经过优化的光强度分布曲线如图 12 所示。

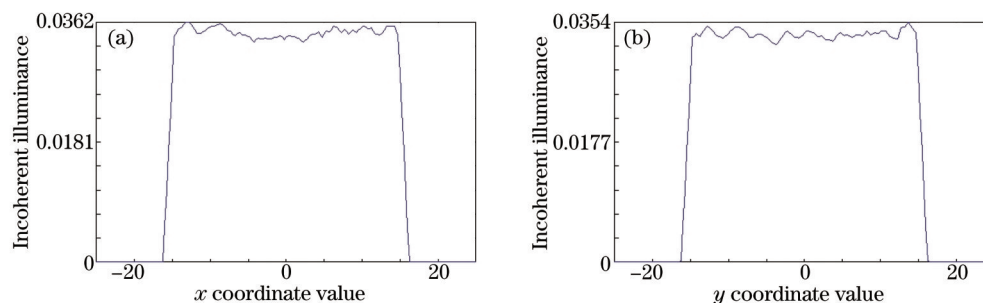


图 12 经过优化的光能量分布曲线。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig.12 Curve of the energy intensity distribution after being optimized. (a) x direction; (b) y direction

从图 12 可以看出, 光束的空间能量分布较为理想, 为顶部平坦、侧面陡峭的平顶(top-hat)形状。经过计算平顶因子可以达到 0.91, 光斑最高光强度与光斑最低光强度的差值在整个光强的 4% 以内, 即相对光强从 96% 到 100% 都是可用的, 其能量均匀度误差在 $\pm 2\%$ 以内, 也就是说, 经过所设计的微透镜准分子激光整形均束装置后的准分子激光, 其加工窗在 $\pm 2\%$ 以内, 可以适应对光束辐照质量要求较高的使用环境。

4 加工方案

所设计的微透镜阵列微透镜单元的尺寸比较小, 仅 $3.4 \text{ mm} \times 3.4 \text{ mm}$, 最理想的方法是在光学材料上完整加工出微透镜的曲面阵列, 但加工难度过高、成本过大。原因之一就是针对准分子激光这种紫外波段的高功率激光, 需要使用特种石英作为光学元件的材料^[27], 但是石英本身是耐高温、耐腐蚀的, 因此, 传统的加工工艺是比较难以实现的。为了能够实现本光学系统光学设计中的光学特性, 采取先使用光学冷加工单独的微透镜再将微透镜进行组装的加工方案。

构成微透镜阵列的微透镜为平凸面形的一体结构, 加工成功后通过机械夹具组合并固定。整个微透镜阵列为 12×12 级共计 144 个微透镜, 由钢制金属外框及两块钢制金属压板压紧固定, 两个金属压板的侧面均有两个螺丝来调整压力。这样组装形成的微透镜阵列要比传统的柱面镜十字叠加构成的微透镜阵列光学反射面少, 光透过率提高。图 13 中从左向右分别为第一微透镜阵列、第二微透镜阵列以及傅里叶球面镜的加工实物照片, 光学元件本身牢固而且扩展性强。

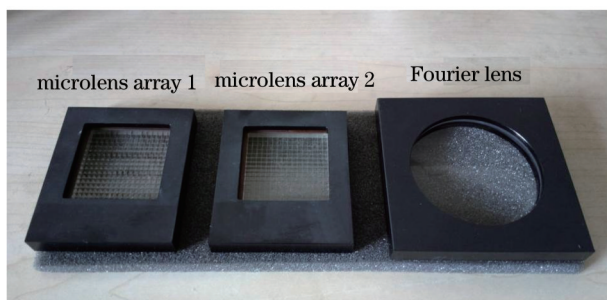


图 13 光学元件实物照片

Fig.13 Photograph of optical elements

将光学元件安置在经 He-Ne 准直激光光路矫正过的滑动机械槽内进一步矫正光路并组成光学加工平台,准分子激光入射后,将依次经过第一微透镜阵列、第二微透镜阵列、傅里叶球面镜,最终在均束平面上获得辐照能量均匀的正方形光斑,光学加工平台实物照片见图 14 所示。

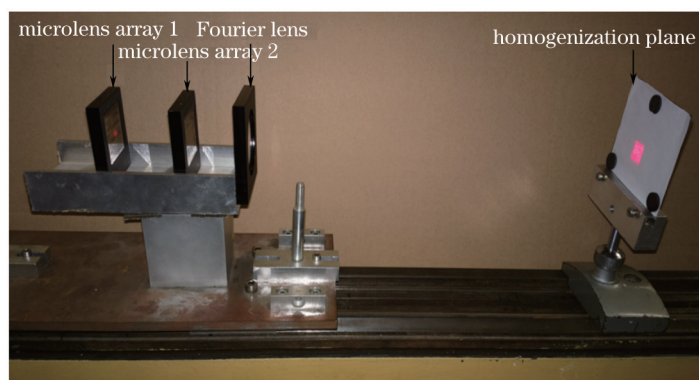


图 14 光学加工平台实物照片

Fig.14 Photograph of the optical processing platform

5 实验结果

首先测试准分子激光经过光学系统整形以后的光斑形状和光斑尺寸。在光学系统的工作平面上放置光敏纸,248 nm 的准分子激光从第一微透镜阵列的端口处入射。激光辐照后,在光敏纸上留下的光斑印迹如图 15 所示。

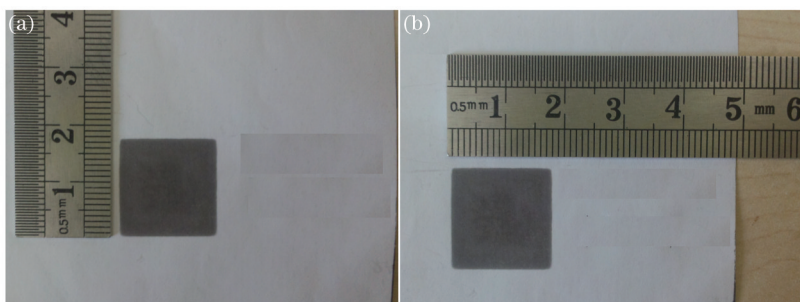


图 15 激光辐照后在光敏纸上留下的印迹尺寸。(a)纵向长度;(b)横向长度

Fig.15 Mark size on the photosensitive paper after laser irradiation. (a) Vertical length; (b) horizontal length

辐照光斑形状为标准正方形光斑,尺寸大小约为 18 mm×18 mm,与模拟结果一致。使用 LBA-USB-L230 型激光光束质量分析仪拍摄经过整形均束之后的光斑能量分布图像如图 16 所示。

分析拍摄图像中的光斑能量分布曲线,为中间平滑侧面陡峭的状态,通过计算其平顶因子约为 0.90。光斑的最高光强度与光斑最低光强度的差值在整个光强的 4% 以内,也就是说相对光强从 96% 到 100% 都是可用的,其能量均匀度误差(加工窗)在 $\pm 2\%$ 以内,符合准分子激光的应用要求。

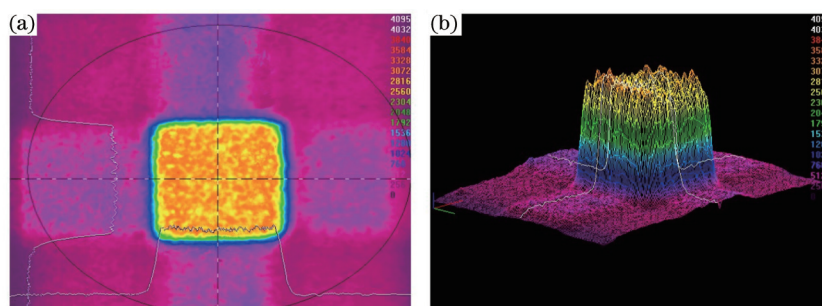


图 16 经过整形均束后光斑的能量分布。(a) 二维(2D)图像; (b) 三维(3D)图像

Fig.16 Energy distribution of the beam profile after being shaped and homogenized. (a) 2D version; (b) 3D version

对比整形均束后最终拍摄得到的光斑能量分布情况与模拟时在光探测器上得到的优化后光斑能量分布情况,光强度分布趋势一致,但细节状态仍存在一定差异,光斑边缘能量的锐利程度仍有所不同,原因主要有以下几点:1) 加工误差原因,光学系统的各元件存在一定的加工误差,其中的微透镜阵列由数量较多且尺寸微小的透镜单元组成,而每一个微透镜单元自身都存在不可避免的加工误差,组装时也会出现装调误差,最终会使光学系统的工作性能受到误差影响;2) 微透镜阵列的结构原因,所设计的微透镜阵列是由方形孔径的微透镜拼接而成,微透镜之间的拼接面会折、反射掉一部分的光能量,拼接缝隙也会对一部分的光能量产生衍射效应,最终影响光学系统的整形均束效果;3) 光学效应原因,光束通过微透镜的单元孔径时会产生一定的衍射效应,同时在光通道内彼此独立传播的光能量叠加于均束平面时也会产生一定的干涉效应,这也会对最终的整形均束效果带来一定影响;4) 实验条件原因,随着准分子激光器的持续工作,循环换热逐渐不充分、工作气体劣化和腔镜污染的增加,会使输出光束的特征参数产生一定范围的漂移,最终影响到辐照光斑的能量分布状态。对于上述前两项原因,在加工成本允许的条件下,可以使用先进的光学制造工艺在完整的石英材料上制造出连续曲面阵列以形成微透镜阵列,这样可以避免拼接微透镜结构带来的不良影响,也会在一定程度上降低光学元件的加工误差;对于上述后两项原因,则需要进一步的光学设计来降低光学效应带来的影响,提升光学系统对于实验条件变化的容忍能力。

对于所设计光学系统,理论上可以在均束平面上获得能量均匀度状况最好的光斑。但是在实际使用光学系统进行辐照加工的过程中,光束辐照的工作平面位置可能不在均束平面上,或者要求工作平面的位置具有一定的变化范围。为了研究工作平面离开均束平面后的光斑能量分布变化,沿光轴以 10 mm 的距离为分析节点移动工作平面并实时拍摄其光斑能量分布状态,假设逆光束传播方向移动为负方向、沿光束传播方向移动为正方向,经过计算可以得到光斑能量分布的变化趋势,如图 17 所示。图 17 中红色曲线为光斑平顶因子(百分数)的变化趋势,蓝色曲线为光斑最高光强度与最低光强度差即光能量波动范围的百分比变化趋势。根据所测结果,在距离均束平面 ± 10 mm 的范围内光能量均匀度变化并不明显,而在此距离范围之外继续移动的过程中光斑能量将加速发散,能量均匀度将随着距离的增长而明显降低。其中,逆光束传播方向移动工作平面时光能量均匀度的下降速度要比沿光束传播方向移动略快。

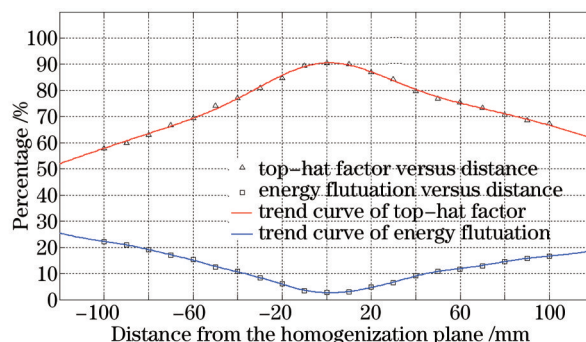


图 17 工作平面远离均束平面时光斑能量均匀性变化趋势曲线

Fig.17 Variation trend curve of the beam uniformity when the working plane moving away from the homogenization plane

选用不同能量的准分子激光入射,使用 Newport 公司 2835-C 型激光能量计测试入射光学系统的准分子激

光能量以及工作平面上的能量,可以计算出此光学系统对于 248 nm 准分子激光的能量透过率。实验分别选用了 300、500、700、900 mJ 能量的准分子激光入射,在工作平面接收到的能量分别为 242、410、615、792 mJ。通过线性拟合,可以确定所设计的微透镜准分子激光整形均束装置对于 248 nm 准分子激光的能量透过率约为 85%。

6 结 论

分析了 248 nm 准分子激光微透镜整形均束装置的基本原理,并从近轴光学的角度讨论了该光学系统初始结构的设计。通过实际拍摄到的准分子激光光能量分布的彩色图像,使用 Matlab 计算并分析出其光能量分布规律,进而使用光学软件 ZEMAX 模拟出实际测试到的准分子激光光能量分布。通过分析实测光源的空间光能量分布特征,同时结合光学软件模拟以及数学方法的优化,设计出效果理想的整形均束光学系统。根据设计方案加工出光学系统,通过实验进行测试,实际测试结果同理论模拟结果相吻合。248 nm 准分子激光通过该光学系统整形均束后,可以在工作平面上得到一个约 18 mm×18 mm 的正方形光斑,光斑的能量均匀度误差(加工窗)在±2%以内,平顶因子为 0.90,光能量通过率为 85%左右,解决了 248 nm 准分子激光光斑形状不规则,且光斑能量分布不均匀的问题。该装置的研制成功,对于优质、高效地开展准分子激光微加工提供了技术支撑。

参 考 文 献

- 1 Lou Qihong. Progress of excimer lasers and its applications[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(5): 361-364.
楼祺洪. 准分子激光器的发展和应用[J]. 中国激光, 1994, 21(5): 361-364.
- 2 Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, *et al.*. Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.
余吟山, 游利兵, 梁 勳, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
- 3 Xing Xiao, Wang Wenjun, Li Shuhong, *et al.*. Properties of TiO₂ films deposited by pulsed laser deposition[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0207001.
邢 晓, 王文军, 李淑红, 等. 脉冲激光沉积制备 TiO₂薄膜的性能[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0207001.
- 4 Zeng Yong, Zhao Yan, Jiang Yijian. Effect of excimer laser irradiation for ZnO thin films under different atmospheres[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0207001.
曾 勇, 赵 艳, 蒋毅坚. 不同气氛下 ZnO 薄膜的准分子激光辐照效应[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0207001.
- 5 Yuan Cailai, Le Yaokong, Jiang Baocai, *et al.*. Investigation of excimer laser keratoplastic surgery[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(9): 758-762.
袁才来, 乐耀康, 蒋宝财, 等. 准分子激光角膜手术研究[J]. 中国激光, 1994, 21(9): 758-762.
- 6 Yang Huilan, Liu Zhongrong, Li Xuemei, *et al.*. Treatment of vitiligo with the 308-nm excimer laser: a clinical study[J]. Chinese Journal of Dermatology, 2006, 39(1): 35-37.
杨慧兰, 刘仲荣, 李雪梅, 等. 308 nm 准分子激光治疗白癜风临床研究[J]. 中华皮肤科杂志, 2006, 39(1): 35-37.
- 7 J S Im, R S Sposili, M A Crowder. Single-crystal Si films for thin-film transistor devices[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(25): 3434-3436.
- 8 S Partel, S Zoppel, P Hudek, *et al.*. Contact and proximity lithography using 193 nm excimer laser in mask aligner[J]. Microelectronic Engineering, 2009, 87(5): 936-939.
- 9 L Wojcik, S Kuchibhotla, D Wright, *et al.*. Excimer laser projection imaging for high-performance circuit board patterning[J]. Circuit Tree, 2007, 20(9): 44-47.
- 10 Lou Qihong, Xu Jie, Fu Shufen, *et al.*. Pulsed Gas Discharge Lasers[M]. Beijing: Science Press, 1993.
楼祺洪, 徐 捷, 傅淑芬, 等. 脉冲放电气体激光器[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- 11 Ye Zhenhuan, Li Hongxia, Lou Qihong, *et al.*. Beam profile diagnosis technology for excimer laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(5): 619-622.
叶震寰, 李红霞, 楼祺洪, 等. 准分子激光的光束波面测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 619-622.
- 12 C Bechet, A Guesalaga, B Neichel, *et al.*. Beam shaping for laser-based adaptive optics in astronomy[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 12994-13013.
- 13 F Duerr, H Thienpont. Refractive laser beam shaping by means of a functional differential equation based design approach[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8001-8011.

- 14 Z N Tian, L J Wang, Q D Chen, *et al.*. Beam shaping of edge-emitting diode lasers using a single double-axial hyperboloidal microlens[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5414-5417.
- 15 A Masters, T Geuking. Beam-shaping optics expand excimer laser applications[J]. Laser Focus World, 2005, (6): 99-103.
- 16 K Jasper, S Scheede, B Burghardt, *et al.*. Excimer laser beam homogenizer with low divergence[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 255-264.
- 17 H Hugel, H Schittenhelm, K Jasper, *et al.*. Beam homogenizer for hollow-fiber delivery system of excimer laser light[J]. Applied Optics, 2003, 42(18): 3505-3508.
- 18 T Kajava, A Hakola, H Elfstrom, *et al.*. Flat-top profile of an excimer laser beam generated using beam-splitter gratings[J]. Optics Communications, 2006, 268: 289-291.
- 19 M Zimmermann, N Lindlein, R Voiekel, *et al.*. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application[C]. SPIE, 2007, 6663(1): 1-13.
- 20 Li Hongxia, Lou Qihong, Dong Jingxing, *et al.*. A novel homogenizer to improve the excimer laser beam uniformity[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(7): 785-788.
李红霞, 楼祺洪, 董景星, 等. 一种改善准分子激光光束均匀性的新型均匀器[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 785-788.
- 21 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Li Hongxia, *et al.*. Beam homogenizing technology for UV excimer laser[J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 207-212.
叶震寰, 楼祺洪, 李红霞, 等. 准分子激光光束均匀技术[J]. 激光技术, 2005, 29(2): 207-212.
- 22 Du Guojun, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Lens array homogenizer for excimer lasers[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 6(3): 279-281.
杜国军, 陈 涛, 左铁钊. 应用于准分子激光的透镜阵列均束器[J]. 光电子·激光, 2005, 6(3): 279-281.
- 23 Li Chengde, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining[J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(6): 560-564.
李呈德, 陈 涛, 左铁钊. 两级复眼式准分子激光微加工均束器的设计[J]. 中国激光, 1999, 26(6): 560-564.
- 24 Li Hongxia, Lou Qihong, Ye Zhenhuan, *et al.*. Research on evaluating norm of excimer laser beam uniformity[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(6): 729-732.
李红霞, 楼祺洪, 叶震寰, 等. 准分子激光光束均匀性的评价指标研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 729-732.
- 25 A Buttner, U D Zeitner. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using microlens arrays[J]. Optical Engineering, 2002, 41(10): 2393-2401.
- 26 Jin Yuhua, Zhao Yan, Jiang Yijian. Simulation of excimer laser based on ZEMAX software[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(9): 0902010.
靳羽华, 赵 艳, 蒋毅坚. 基于ZEMAX软件的准分子激光模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902010.
- 27 Shan Yaoying, Zhao Jiangshan, Li Hui, *et al.*. Application study on fused silica prisms in excimer laser spectrum control[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402008.
单耀莹, 赵江山, 李 慧, 等. 熔融石英棱镜在准分子激光光谱控制系统中的应用研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402008.

栏目编辑: 张 雁