

CO₂ 激光打孔的折衍混合 f- 透镜设计

张云翠^{1,2}, 卢振武¹, 孙 强¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,
吉林 长春 130033; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 激光打孔广泛应用于印刷电路板处理等领域,在该技术中 f- 透镜起到扫描成像的重要作用。利用折衍混合系统设计了 f- 透镜,在满足性能要求的前提下,减少了透镜的个数,降低了系统成本。该系统采用像方远心光路,工作波长为 9.25 μm , 打孔直径 50 μm , 深度 182 μm , 扫描面积达 70 mm \times 70 mm。

关键词: CO₂ 激光器; 激光打孔; f- 透镜; 折衍射透镜; 非球面

中图分类号: O436 文献标识码: A 文章编号: 1007- 2276(2006) 05- 519- 04

Design of hybrid diffractive-refractive f- lens for CO₂ laser drilling

ZHANG Yun-cui^{1,2}, LU Zhen-wu¹, SUN Qiang¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China

2.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Laser drilling technology is applied in a wide field such as printed circuit board processing, in which f- lens plays an important role as scanning and imaging element. In this paper, a f- lens with a diffractive/refractive hybrid system for CO₂ laser drilling is designed to decrease the number of lens and reduce the cost of system. This system uses telecentricity light path, working wavelength is 9.25 μm , focal depth is 182 μm , diameter of drilling holes is 50 μm and scanning area is 70 mm \times 70 mm.

Key words: CO₂ laser; Laser drilling; f- lens; Diffractive-refractive lens;
Aspheric surface

0 引言

近几年来,计算机、手机等电子产业的迅速发展大大推动了芯片、印刷电路板和大规模集成电路板的集成化、小型化、阵列化的进程,同时也推动了高密度、微口径连接技术的迅速发展。据预计, W- CDMA 手机内电路板的小孔直径将降到 50 μm , 在钟频加速和半导体器件高度集成的大规模集成电路板中的微

孔直径将降到 30~50 μm ^[1]。小口径、高密度打孔的发展使得激光打孔以其相对于机械打孔的独特优势而得到迅速发展和广泛应用^[2]。

CO₂ 激光和 UV- DPSS 激光是两种典型的激光打孔光源。前者的波长属于红外波段,激光功率大,打孔速度较后者快很多,但是激光波长比后者长,打孔尺寸较大,为了使用前者实现较小口径的打孔,要求控制打孔尺寸的 f- 透镜具有更低的 F 数。F/# 为 2.2

收稿日期: 2005- 12- 20; 修订日期: 2006- 01- 18

作者简介: 张云翠(1978-),女,吉林吉林市人,博士生,研究方向为光学系统设计、红外成像及二元光学。

Email: zhangyuncui2@163.com

的 f - 透镜采用传统折射系统需要透镜个数较多, 由于红外材料种类有限、价格昂贵, 为了降低材料成本采用衍射面来增加设计自由度, 减少透镜个数^[3-5]。

该折衍混合 f - 透镜系统使用三片透镜, 焦距 100 mm, $F/\#$ 2.2, 视场为 $\pm 20^\circ$, 打孔直径 50 μm , 打孔深度 182 μm , f - 线性偏差小于 0.05%。其中第一个透镜为混合透镜, 文中分析了衍射面在该系统中的重要作用。

1 应用于 CO_2 激光打孔的 f - 透镜特性^[6-8]

(1) 像方远心光路 为了使激光能够垂直工作面打孔, 要求应用于打孔的 f - 透镜是像方远心系统 (应用于打标和打印机的 f - 透镜则不要求是像方远心的), 即光阑位于系统的前焦面上。

(2) 前、后焦距要满足以下方程组:

$$\begin{cases} 0.3 f < \text{EFL} < 0.6 f \\ 0.7 f < \text{BFL} < 1.2 f \end{cases} \quad (1)$$

这是由于在 f - 透镜前安装扫描镜以及摆动需要一定的空间, f - 透镜的前焦距 (EFL) 要求在 $0.3 \sim 0.6f$ 之间; 为了避免喷溅物溅落在透镜的后表面, 后焦距 (BFL) 一般在 $0.7 \sim 1.2f$ 之间, f 是透镜的焦距。

(3) 特定的负畸变值 光线经过 f - 透镜满足 $h = f \cdot \tan \theta$, 理想的透镜组满足:

$$h = f \cdot \tan \theta \quad (2)$$

式中: h 、 h' 为成像点的位置坐标值; θ 为光线入射角度。 f - 透镜组相对于无像差的理想透镜组在像面上产生 $h - h' = f \cdot \tan \theta - f' \cdot \tan \theta'$ 的负畸变。

(4) 一次扫描面积 为增加打孔的速度和效率, f - 透镜具有一定的一次扫描范围, 其扫描尺寸为:

$$l = 2f \cdot \tan \theta_{\max} \quad (3)$$

式中: θ_{\max} 为最大视场角。

(5) 光斑尺寸 当系统成像质量达到衍射限时, 光斑半径和焦深为:

$$b = 1.22 \lambda \cdot f / d \quad (4)$$

$$2\delta l = 4 \lambda \cdot (f / d)^2 \quad (5)$$

式中: b 为光斑半径; d 为入瞳直径; δl 为焦深; λ 为激光波长。

文中使用的 CO_2 激光器的输出波长为 9.25 μm , 属于远红外波段。适合此波段的红外材料有 Ge、Si、GaAs 和 ZnSe 等, 相对于可见光波段红外光学材料的种类少很多, 而且价格昂贵, 这对象差校正和控制制作成本都是很不利的。因此利用衍射面来增加设计的自由度在红外波段有很大的实用价值。在红外材料中, 能制作非球面 (包括二元衍射面) 的材料有 Ge、Si 和 ZnSe 等, 其中 Si 材料对车削工具的磨损较大, 制作非球面成本较高。文中采用 Ge、Ge、ZnSe 的结构, 在第一个 Ge 透镜上制作非球面。

2 设计结果与分析

该系统包含三片透镜 (结构见图 1), 前两个透镜的材料为锗, 第三个透镜的材料为硒化锌^[4]。第一个锗透镜为混合透镜, 锗折射率为 4, 它的折光能力强, 在相同的光焦度下, 锗透镜相对于其他材料透镜的表面曲率小, 相应地由曲率而产生的像差小, 装调公差松, 这对透镜设计、加工及装调都是十分有利的。

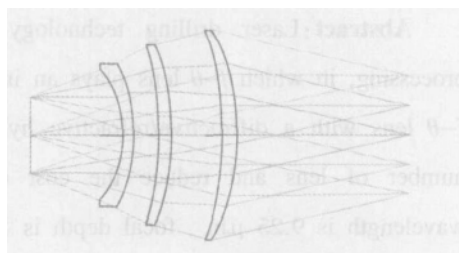


图 1 f - 透镜结构图

Fig.1 Configuration of f - lens

第一个透镜是具有折衍混合成像特点的混合器件^[9]。混合器件的面形相当于基底面的面形与衍射面形相加, 同时具有折射器件的特性又具有衍射器件的特性。衍射面可以制作在平面、球面和非球面等类型的基底上。基底非球面拟合公式为:

$$Z_{\text{sub}}(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^j \alpha_i r^i \quad (6)$$

衍射面拟合公式为:

$$Z_{\text{diff}}(r) = \frac{1}{(N_0 - 1)} \sum_1^j A_2 r^2 + \frac{\lambda_0}{(N_0 - 1)} \left[\left| \text{Int} \sum_1^j A_2 r^2 \right| \right] \quad (7)$$

总的表面拟合公式为:

$$Z_{\text{total}}(r) = Z_{\text{sub}}(r) + Z_{\text{diff}}(r) \quad (8)$$

式中: c 是球面顶点的曲率; k 是表面的圆锥系数; γ_i 是非球面系数; A_2 为衍射二元面系数。第一个透镜是混合透镜, 衍射面制作在第一个透镜的后表面上, $c = -0.006\ 88$, $k = 0.568\ 1$, $\gamma_1 = 0$, $A_2 = -0.703\ 7$, $A_4 = 1.739\text{e-}5$, $A_6 = 2.420\ 4\text{e-}9$ 。

折射器件利用透镜的厚度、折射率、表面的曲率等参数来控制光焦度和像差, 衍射器件利用环带位置来改变波前, 从而来控制光焦度、修正像差。混合器件的光焦度满足以下关系:

衍射器件的光焦度

$$\varphi_{\text{diff}} = -2A_2 m \lambda \quad (9)$$

折射器件的光焦度

$$\varphi_{\text{sub}} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (10)$$

混合器件的光焦度

$$\varphi_{\text{total}} = \varphi_{\text{diff}} + \varphi_{\text{sub}} \quad (11)$$

式中: φ_{diff} 、 φ_{sub} 、 φ_{total} 分别衍射元件、折射器件和系统总的光焦度; R_1 、 R_2 为折射器件的曲率半径。

利用该组公式以及 ZEMAX 可以对二元面的光焦度进行计算, 并得到验证。基底的光焦度为 $-0.012\ 3$, 二元面的光焦度为 $0.013\ 7$, 总光焦度为 $0.001\ 4$ 。

衍射器件的初级像差公式如下:

球差系数

$$S_1 = \frac{Y^4 \Phi^3}{4} (1+B^2+3C^2) - 8\lambda A_2 Y^4 \quad (12)$$

彗差系数

$$S_{II} = \varepsilon \frac{Y^4 \Phi^3}{4} (1+B^2+3C^2) - 8\lambda A_2 Y^4 - Y^2 \Phi^2 H \quad (13)$$

像散系数

$$S' = H^2 \Phi - 2\varepsilon (Y^2 \Phi^2 H C + \varepsilon) + \varepsilon^2 \left[\frac{Y^4 \Phi^3}{4} (1+B^2+3C^2) - 8\lambda A_2 Y^4 \right] \quad (14)$$

匹兹万场曲系数

$$S' = 0 \quad (15)$$

畸变系数

$$S = 3\varepsilon H^2 \Phi - 3\varepsilon^2 Y^2 \Phi^2 H C + \varepsilon^2 \frac{Y^4 \Phi^3}{4} (1+B^2+3C^2) - 8\lambda A_2 Y^4 \quad (16)$$

式中: H 为光学拉氏不变量; B 、 C 为光学系统结构参数; Φ 为衍射元件光焦度。

可见衍射器件与折射器件的初级像差公式类似, 只是多了 A_2 项, 文中第一个透镜的光焦度不大, 但是由正负光焦度相反的折射和衍射两个器件来分担, 这样在矫正像差的意义上就相当于正负透镜相胶合, 能够用来矫正球差、彗差等像差。

系统的前、后焦距分别为 $40.96\ \text{mm}$ 、 $74.70\ \text{mm}$, 满足第一组方程的要求。系统的性能参数如表 1 所示。系统总焦距为 $100\ \text{mm}$, 视场角为 $\pm 20^\circ$, 由公式 (3) 可得一次扫描尺寸为 $70\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$ 。利用第四组公式得到会聚光斑直径为 $50\ \mu\text{m}$, 焦深为 $182\ \mu\text{m}$ 。畸变值与三次 Seidel 畸变值之间的关系如下:

$$\delta y_{zk} = \frac{S_V}{-2n_k u_k} \quad (17)$$

表 1 系统性能参数表

Tab.1 Parameters of this system

| Entrance pupil diameter | Focal length | Field of view | Spot diameter |
|-------------------------|--------------|---------------------------|------------------|
| 45 mm | 100 mm | $\pm 20^\circ$ | 50 μm |
| Focal depth | f- property | Focal length/mm | Total length |
| 182 μm | <0.05% | Front 40.96 Back 74.70 | 214.8 mm |

在设计中控制以 Seidel 畸变值表示的负畸变为特定值进行优化, 优化后系统的 f - 线性偏差 <0.05%, 如图 2 所示。整个视场成像质量达到衍射限, 在不同视场下的光斑图如图 3 所示。其中圆代表爱里斑的大小。在 0° 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 视场的光斑均在爱里斑内。

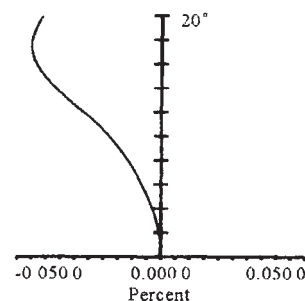


图 2 f - 线性偏差曲线

Fig.2 Curve of f - property

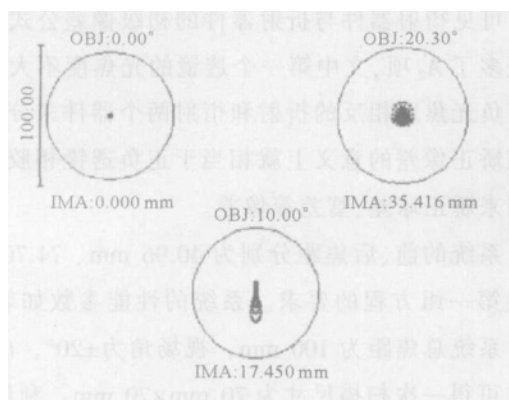


图3 不同视场下的光斑图

Fig.3 Spot diagram in different fields

3 结 论

采用折衍混合系统设计了应用于 CO_2 远红外激光打孔的 f -透镜。本系统的 F 数为 2.2, 打孔直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 焦深为 $182\text{ }\mu\text{m}$, 视场角为 $\pm 20^\circ$ 。该系统成像质量达到衍射限, f -线性偏差小于 0.05%。由于衍射器件通过改变面形来控制光焦度, 而与基底曲率无关, 与负基底透镜共同分担光焦度, 相当于正负透镜的胶合, 这在矫正像差的同时, 减少了透镜的个数, 降低了红外系统由于材料昂贵而带来的高成本。

参考文献:

[1] YOKOHAGI D, MIZUTANI Y, ICHIHASHI K, et al. Develop-

ment of a high-performance UV - DPSS laser drillin system for PWB[C]//Proceedings of SPIE, Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2002, 4426: 464- 468.

[2] PARGELLIS A N , AU D, LAKE T V, et al. Formation of microvias in epoxy -glass composites by laser ablation [J]. Optics and Laser Technology, 1990, 22(3): 205- 207.

[3] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang. Design of hybrid refractive/diffractive off -axial optical system for multi-spectral infrared imaging spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering (杨新军, 王肇圻, 母国光. 折/衍混合多光谱红外成像光谱仪离轴系统设计. 红外与激光工程), 2005, 34(4): 379- 383.

[4] SWANSON G J, VELDKAMP W B. Diffractive optical elements for use in infrared systems[J]. Optical Engineering, 1989, 28(6): 605- 608.

[5] LI Ying-wen, CHEN Fu-sheng, LOU Yan. Latest development and application market of uncooled thermal imaging[J]. Infrared and Laser Engineering (李颖文, 陈福胜, 罗艳. 非制冷热成像最新发展和应用前景. 红外激光与工程), 2005, 34(3): 257- 260.

[6] Keiji Fuse. F- lens: United States Patent, 6,324,015 B1[P].

[7] FUSE K, OKADA T, EBATA K. Diffractive/refractive hybrid f-theta lens for laser drilling of multilayer printed circuit boards [C]//Proceedings of SPIE third International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2003, 4830: 95- 100.

[8] TIAN Xiang-chun, TANG Hui-jun. Software correction of the optical measuring lens distortion in the CCD -assembly scanner [J]. Optics and Precision Engineering (田向春, 唐慧君. 扫描仪测量镜头畸变误差的软件校正. 光学精密工程), 2001, 9(3): 234- 237.

(上接第 508 页)

[5] ZHAO Li -ping, WU Min -xian. Study on the design of the hybrid singlet to replace the refractive doublet [J]. Acta Optica Sinica (赵丽萍, 邬敏贤. 折衍混合单透镜代替双胶望远物镜的设计研究. 光学学报), 1998, 18(2): 223- 227.

[6] SUN Qiang , WANG Zhao-qi , LI Feng-you, et al. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in $3.2\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$ [J]. Optics and Precision Engineering (孙强, 王肇圻, 李凤友, 等. 红外 $3.2\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的减热差设计. 光学精密工程), 2002, 10(2): 121- 125.

[7] WANG Zhao-qi, ZHANG Yi -nan, FU Ru-lian, et al. Design of hybrid refractive-diffractive Petzval objective in visible band [J]. Optics and Precision Engineering (王肇圻, 张轶楠, 傅汝廉, 等. 折衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计. 光学精密工程),

2005, 13(1): 1- 4.

[8] ZHAO Q L, WANG Z Q, SUN Q, et al. Simple 40° Head-mounted display[J]. Optik, 2003, 114(4), 181- 183.

[9] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang. Design of hybrid refractive/diffractive off -axial optical system for multispectral infrared imaging spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering (杨新军, 王肇圻, 母国光. 折/衍混合多光谱红外成像光谱仪离轴系统设计. 红外与激光工程), 2005, 34(4): 379- 383.

[10] CUI Qing-feng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical system [J]. Infrared and Laser Engineering (崔庆丰. 折衍射混合成像光学系统设计. 红外与激光工程), 2006, 35(1): 12- 15.

[11] Focus Software. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [Z]. San Diego, USA: ZEMAX Development Corporation, 2004: 166- 189.