

折-衍光学镜片的单点金刚石车削与检测

梁旭¹ 王军华² 徐敏¹ 李锦江² 李旭峰²

(¹复旦大学教育部微纳光子结构重点实验室, 光科学与工程系, 上海 200433)
(²上海现代先进超精密制造中心有限公司, 上海 200438)

摘要 讨论了折-衍光学镜片的设计、加工和检测。结合设计采用单点金刚石车削工艺加工出了具有连续浮雕结构的折-衍光学镜片。对加工成的折-衍光学镜片采用先进的数字化检测, 结果表明, 面型精度为 $0.228\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $1.279\ \text{nm}$, 台阶位置误差小于 $1/3$ 波长。对折-衍光学镜片加工中产生的遮挡效应和光的透过率损失给出了定量的分析结果。

关键词 光学器件; 二元光学; 折-衍混合镜片; 单点金刚石车削; 检测

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.032203

Single-Point Diamond Turning and Testing of Hybrid Diffractive-Refractive Optical Lens

Liang Xu¹ Wang Junhua² Xu Min¹ Li Jinjiang² Li Xufeng²

(¹Key Laboratory of Micro and Nano Photonic Structure, Ministry of Education, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)
(²Shanghai Modern Advanced Ultra Precision Manufacturing Center. Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract The optical design, fabrication and testing of hybrid diffractive-refractive optical lens are discussed. A hybrid lens with continuous structure is fabricated using single-point diamond turning according to the design. Advanced digital testing methods are utilized for testing the hybrid lens. The testing result shows that, the profile accuracy is $0.228\ \mu\text{m}$, the surface roughness is $1.279\ \text{nm}$, and position error of step is less than one third of the wavelength. Quantitative analysis of transmission blockage and transmission loss of light of hybrid diffractive-refractive lens is given.

Key words optical devices; binary optics; hybrid diffractive-refractive lens; single-point diamond turning; testing

OCIS codes 220.1920; 220.4840; 050.1380; 050.1965

1 引言

20世纪80年代美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室提出了多级衍射的二元衍射光学元件^[1],之后折-衍光学镜片得到了广泛的研究和应用^[2,3]。它具有极高的衍射效率和良好的色散性能,可以大大压缩系统光路,使其轻量化,优化产品的结构与性能,能够为设计者带来更多的设计自由度和选材的宽广度^[1,3]。高精度的加工技术、先进的数控技术和不断提高的金刚石刀具质量使得金刚石车削技术在基于非球面的折-衍光学镜片的加工中体现出明显的优势。其亚微米的加工水平为折-衍光学镜片的加工提供了新的工艺技术,能够加工出表面质量很好的折-衍光学镜片。国外金刚石车削技术应用在折-衍光学镜片加工领域起步很早,尤其是在红外成像折-衍光学镜片的加工领域,相关技术的研究十分成熟^[2],并已经产业化。

在国内,折-衍光学镜片的研究水平,尤其是单点金刚石车削技术研究水平同国外的差距较大,主要研究工作还处于实验室阶段,对直接车削技术还没进行过实用性研究^[4]。制造成本高对应用造成了阻力,折-衍光学镜片加工的研究还远远不能满足我国国防和高技术发展的迫切需要。研究折-衍光学镜片,建立我国自

收稿日期: 2010-06-23; **收到修改稿日期**: 2010-12-15

作者简介: 梁旭(1985—),男,硕士研究生,主要从事衍射光学元件方面的研究。E-mail: 09210720007@fudan.edu.cn

导师简介: 徐敏(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学仪器的设计、加工、检测和装调等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn

己的制造技术工艺,突破美国以及西方社会的封锁显得十分必要和紧迫,并有着重要的意义。本文对折-衍光学镜片的设计、加工和检测进行了研究和讨论。

2 折-衍光学镜片的原理与设计

为了研究单点金刚石车削工艺技术在折-衍光学镜片加工中的应用,在实验中本文设计了基于非球面的折-衍光学镜片。样品径向直径为 102 mm。

折-衍光学镜片的基本功能是可以起到消色差的作用,因为衍射光学元件具有特殊的色散性质^[5,6],可以利用这一特性帮助校正系统色差。如图 1 所示。其中,折

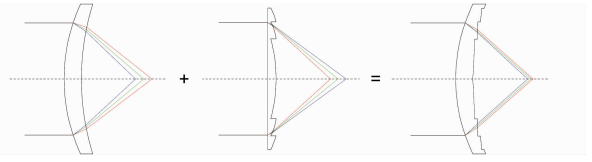


图 1 折-衍光学镜片的消色差原理

Fig. 1 Principle of achromatism for hybrid diffractive-refractive lens

射透镜的阿贝数: $V_{\text{ref}} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$; 衍射透镜的阿贝数: $V_{\text{dif}} = \frac{\lambda_d - 1}{\lambda_F - \lambda_C}$ 。两式中对应的 d 线(587.56 nm)、 C 线(656.3 nm)和 F 线(486.1 nm),所以 $V_{\text{ref}} > 0, V_{\text{dif}} < 0$ 。这一特性可以在光学系统中实现消色差的目的。

我们设计了一个两片式($f=100$ mm, $F/1, 2\omega=6^\circ$)的长波红外系统,实验选用的材料为 Ge。其成像的调制传递函数(MTF)曲线如图 2 所示。基于非球面的衍射面的设计参数如表 1 所示。

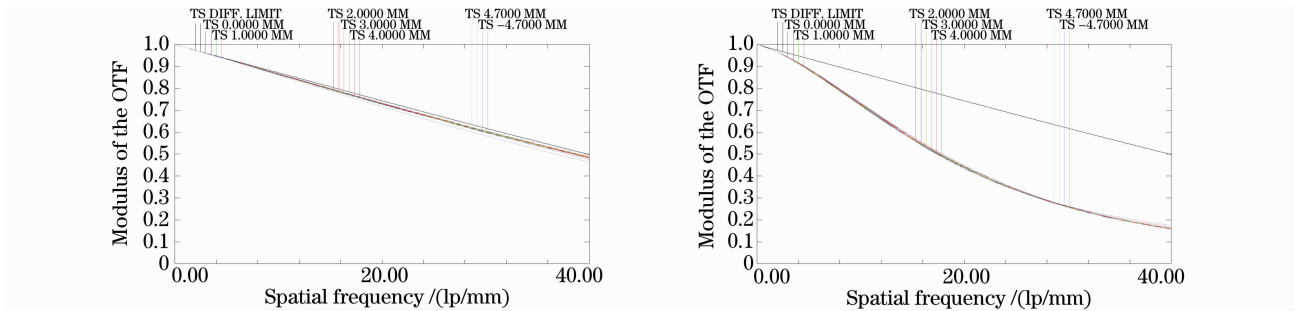


图 2 系统的 MTF 曲线。(a)含衍射结构,(b)不含衍射结构

Fig. 2 MTF of the system. (a) structured with diffraction surface, (b) unstructured with diffraction surface

表 1 衍射面的参数

Table 1 Parameters of diffractive surface

Parameter	Radial diameter /mm	D_2	D_4	D_6	$\lambda_1/\mu\text{m}$	$\lambda_2/\mu\text{m}$	$\lambda_M/\mu\text{m}$	n_M (at 10 μm)
Value	96.6	-1.349534×10^{-5}	0	0	8	12	10	4.00432

通常衍射面的相位轮廓一般是用下面的公式描述^[7,8]:

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_M} (D_2 r^2 + D_4 r^4 + D_6 r^6 + \dots D_j r^j), \quad (1)$$

式中 $\phi(r)$ 代表径向的相位变化函数, r 代表径向半径坐标, λ_M 代表折-衍镜片工作的中心波长。采用金刚石车削时必须将相位周期分布转变为衍射镜片的物理形貌。其中相位每变化 2π , 对应于弧矢表面高度变化^[7~9]

$$d = \frac{m\lambda_M}{n_M - n_i}, \quad (2)$$

式中 m 为设计的衍射级, 这里只考虑第一级衍射($m=1$), λ_M 为镜片工作的中心波长, n_M 为折-衍镜片中心波长处的折射率, n_i 为入射介质对于入射光波的折射率, 一般为空气折射率 $n_i \approx 1$, 计算得到 $d=3.328 \mu\text{m}$ 。计算衍射面的各个环带突变处的径向半径 r , 可以采用下式^[7]:

$$n\lambda_M = |D_2 r^2 + D_4 r^4 + D_6 r^6 + \dots D_j r^j|. \quad (3)$$

由(3)式得到实验中 $n_{\text{total}}=3$, 即衍射面有 3 个相位变化区间。相邻区间之间的突变点位置分别为 27.221, 38.497, 47.149 mm。

3 折-衍光学镜片的金刚石加工

实验中采用的是 Moore UPL350 超精密数控金刚石加工车床。该车床最大可加工出面形口径为 700 mm 的工件,且面型精度可以达到峰谷值(PV)小于 $0.15 \mu\text{m}$ 。表面粗糙度和主轴的回转精度都很高,完全有能力满足实验所需。实验的加工流程,包括了分析,装夹,模拟,加工,检测,加工等步骤。

考虑到加工材料 Ge 材质较软,所以在加工中采用车床的直接真空吸附。并且在加工时车削量控制得非常小,实验中采用的车削量为 $1\sim 2 \mu\text{m}$ 。为了确保镜片两表面光轴的同轴性,其中夹具和镜片配合的表面也采用了金刚石车削,使其更加平整。这不仅降低了加工时产生的振动,同时也达到了很好的吸附效果。

金刚石刀具的选择对镜片质量的影响很大。忽略加工时的振动,环境温度的变化和车床的精度影响,刀具的参数直接影响镜片的表面粗糙度和波纹度和加工效率。同时刀具还影响到加工出来的折-衍镜片的遮挡效应、衍射率和散射量等参数^[7,10]。因该镜片环数少,而且是工作在红外波段,经计算后综合考虑各要素,实验中采用是半径 $R_T=1.0 \text{ mm}$ 圆弧形刀尖刀具,其包角 120° ,前角 -25° ,后角 10° 。

实验加工中设定精车削时的刀具进给量为 2 mm/min ,而主轴转速为 2500 roll/min ,进给量也即 $0.8 \mu\text{m/roll}$ 。实验中采用的是圆弧刀具,这一进给量能够很好地满足表面粗糙度的要求。实验加工出的折-衍镜片如图 3 所示。



图 3 折-衍光学镜片样品

Fig. 3 A sample of hybrid diffractive-refractive optical lens

4 折-衍光学镜片的检测

4.1 表面轮廓仪测量

为了得到加工出的样品参数,尤其是衍射面的台阶参数。对实验样品的衍射面进行了检测,得到台阶位置、台阶深度和面型精度等参数。实验中采用的是 Taylor Hobson 表面轮廓仪,它的系统噪声为 1 nm ,面型精度可达到 $0.2 \mu\text{m}$ 。它具有专门的衍射表面测量功能。对样品的衍射面测量结果如图 4 所示。同时测量得到了台阶的位置、深度和每个区间的面型精度等数据。与镜片的理论参数比较得到表 2。

表 2 衍射面的理论和实测参数比较

Table 2 Comparison of designed and measured parameters of diffractive surface

Parameter	Zone1	Zone2	Zone3
Measured position /mm	27.218	38.495	47.147
Theoretical position /mm	27.221	38.497	47.149
Position error /mm	-0.003	-0.002	-0.002
Step height / μm	3.131	3.169	3.084
Theoretical step height / μm	3.328	3.328	3.328
Step height error / μm	-0.292	-0.166	-0.235

实验加工出来的样品的参数满足理论设计值,台阶位置的误差在 $2\sim 3 \mu\text{m}$ (小于 $\lambda/3$),达到了很高的精度,在允许的误差范围内。面型精度 PV 为 $0.228 \mu\text{m}$,台阶深度的平均值为 $d_T=3.128 \mu\text{m}$,与理论值存在一定误差。这是因为采用圆弧形刀具,在台阶的突变部分由于圆弧形刀具车削不完全留下了残余,形成遮挡效应^[7,10],故实际加工出来的样品的台阶深度比理论设计值要小。实验样品的台阶深度的误差很小,各个区间的面型精度很高。图中两边的阴影部分为非成像区域,对系统的成像质量没有影响。

4.2 采用白光干涉仪测量台阶

对折-衍射面的检测,采用的是 ZYGO 公司的 NewView 扫描白光干涉仪,它的纵向分辨率优于 0.1 nm ,均方根重复性精度优于 0.01 nm 。这样高的精度足以用来检测实验样品的衍射面的加工参数,包括台阶高度、衍射面的粗糙度和面型精度。

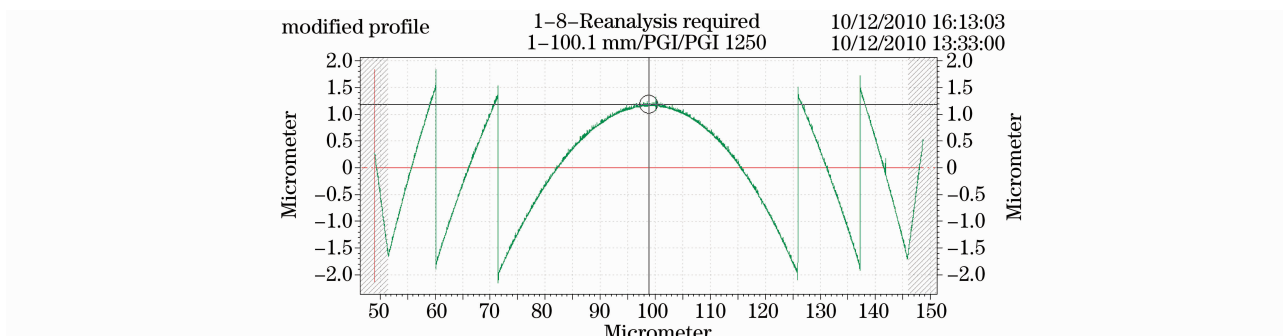


图4 表面轮廓仪测量出的衍射面的轮廓

Fig. 4 Profile of diffractive surface measured by surface profiler

用白光干涉仪对实验加工出来的样品的局部测量,测得样品的表面粗糙度 $R_a = 1.279 \text{ nm}$,台阶高度 d_{ST} 为 $3.1323 \mu\text{m}$,如图5和图7所示。测量参数和干涉图颜色分布表明实验加工出的折-衍镜片精度很高。

5 对加工出来的折-衍镜片的分析

5.1 遮挡效应

实验中采用的刀具的刀尖不是一个无穷小的点,而是有一定大小的圆弧形。理论上,如图6和图7所示,可以看到这个跃变点不是突变的,而是有个过渡区 b ,即有一部分不能完全车削,这就是光的遮挡效应^[7,10]。

上面得到的 $d_{ST} = 3.1323 \mu\text{m}$,即台阶的实际深度。而前面用轮廓仪测得的台阶深度的平均值为 $d_T = 3.128 \mu\text{m} < d_{ST} = 3.1323 \mu\text{m}$ 。因为实验采用的轮廓仪探针的尖端为圆弧形,其包角为 60° ,半径为 $2 \mu\text{m}$,需要测量的台阶高度约为 $3.3 \mu\text{m}$,所以在测量时候探针会有很小一部分被台阶挡住,探针深入不到台阶的底部,从而产生测量上的误差,使得测量结果小于实际值。

未完全车削的部分不仅会影响到光学系统的成像质量,还会降低折-衍射光学镜片的衍射效率,造成光的透过率损失^[7,10]。遮挡效应造成的光透过率减小的数学表达式为^[7]

$$L \approx \frac{4}{D} \sqrt{\frac{2(d-\Delta d)R_T}{i_{\text{total}}}} \sum_1^{i_{\text{total}}} \sqrt{i}, \quad (4)$$

D 为镜片衍射面的径向直径, R_T 为刀具半径, $d-\Delta d$ 为加工得到的台阶的实际深度,它等于采用白光干涉仪测得的 d_{ST} , i_{total} 为衍射面总的衍射环带数, i 为环带的序号。将实验得到的样品镜片的各个参数代入上式,得到因台阶底部车削不完全产生的遮挡效应造成的透过率损失为 $L=0.78\%$ 。

可以看到,实验中加工出来的折-衍光学镜片因遮挡效应造成的光的透过率损失很小,说明选取的实验条件很好地满足了理论设计。

5.2 加工误差

在衍射光学中,台阶深度的误差会导致零级衍射的光功率增加,相应的引起其他衍射级的光功率同等程度的减小,对于长波红外系统而言,其对成像的影响比较小;相比而言,台阶位置的误差则会引起各个衍射级

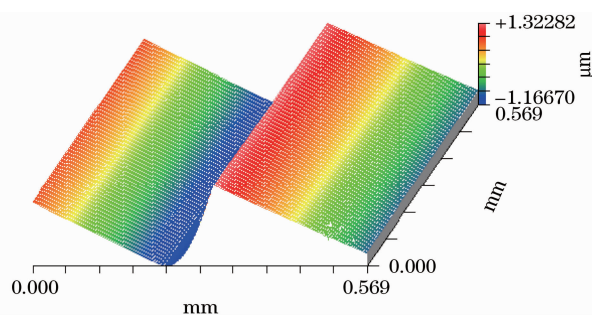


图5 白光干涉仪测量结果

Fig. 5 Testing result of white light interferometer

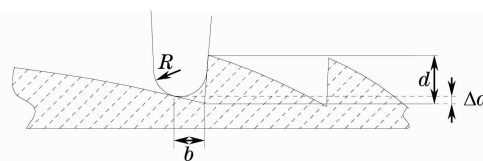


图6 遮挡效应

Fig. 6 Transmission blockage effect

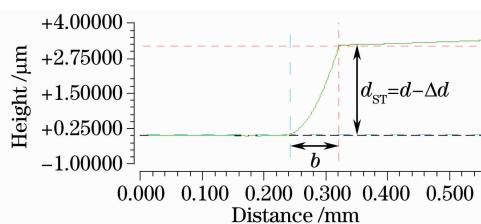


图7 Ge的台阶轮廓

Fig. 7 Step profile of Germanium

次间的光功率不一致地重新分配,这样会严重影响到系统的成像质量,轮廓仪测得的数据表明台阶位置的误差为 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ (小于 $\lambda/3$),这样小的误差说明实验样品的加工质量很高。

折-衍面的实际衍射效率会随着台阶位置和遮挡效应等加工误差而减小,具体又依赖于加工中使用的刀具类型和刀具半径。采用半圆刀可以减小遮挡部分,但是也会使得相同进给量情况下表面粗糙度的增大和加工时间的延长。需要综合考虑才能加工出好的折-衍光学镜片。

6 结 论

通过实验研究,从产业化的角度详尽地论述了衍射光学镜片的金刚石车削工艺技术。采用分析,装夹,模拟,加工,检测,加工这一合理的加工过程,得到折-衍光学镜片的表面粗糙度为 $1.279\ \text{nm}$,面型精度为 $0.228\ \mu\text{m}$,而且台阶的位置有很高的准确度,充分满足理论设计要求,同时论证了实验方法的合理性和实验环境设置的科学性。采用高精度的检测仪器对实验样品进行了测量,由检测结果分析衍射镜片的遮挡效应,并计算出由其导致的表面光的透过率损失很小,几乎可以忽略。

本文开展的研究有助于推动金刚石车削工艺技术在衍射光学镜片及折-衍混合光学系统的加工中的应用,对其实现产业化有指导作用,同时对我国国防事业的建设和光电成像领域的发展也有现实意义。

参 考 文 献

- 1 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 1~4; 298~317
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 1~4; 298~317
- 2 M. A. Davies, C. J. Evans, S. R. Patterson *et al.*. Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonics components[C]. *SPIE*, 2003, **5183**: 94~108
- 3 Jin Guofan, Tan Qiaofeng. Binary optics[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001, **14**(5): 1~10
金国藩, 谭峭峰. 二元光学[J]. 光电子技术与信息, 2001, **14**(5): 1~10
- 4 Liu Liping, Wang Yongtian, Li Ronggang *et al.*. Infrared diffractive optical element fabricated on aspheric substrate[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2004, **23**(4): 308~312
刘丽萍, 王涌天, 李荣刚 等. 制作在非球面基底上的红外衍射光学元件[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(4): 308~312
- 5 B. E. Bernacki, A. C. Miller, L. C. Maxey. Design and fabrication of a diamond-turned hybrid diffractive/refractive singlet for visible applications at ORNL[C]. Conference on Manufacturing Redstone Arsenal, Huntsville, AL, 1-2 Nov. 1994
- 6 T. Stone, N. George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2960~2971
- 7 Max J. Riedl. Diamond-turned diffractive optical elements for the infrared: suggestion for specification standardization and manufacturing remarks[C]. *SPIE*, 1995, **2540**: 257~269
- 8 C. Gary Blough, M. Rossi, Stephen K. Mack *et al.*. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20): 4648~4654
- 9 Bruce E. Bernacki, Arthur C. Miller, Jr., L. Curt Maxey *et al.*. Hybrid optics for the visible produced by bulk casting of sol-gel glass using diamond-turned molds[C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 463~474
- 10 Zhao Junyan, Wang Peng. Research on technique parameters of single point diamond turning of DOEs[J]. *Machine Design and Research*, 2009, **25**(4): 83~85
赵峻彦, 王 鹏. 衍射元件单点金刚石车削的工艺参数[J]. 机械设计与研究, 2009, **25**(4): 83~85