

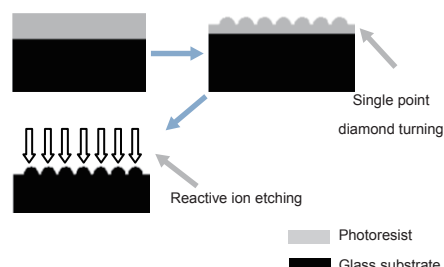
DOI: 10.12086/oe.2018.170671

车削掩模的石英非球面微透镜阵列制作方法

王 灏^{1,2}, 董连和^{1*}, 朱国栋², 张 东²,
张为国^{2*}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 中国科学院重庆绿色智能技术研究院微纳制造与系统集成研究中心,
重庆 400714



摘要: 为解决石英非球面微透镜阵列加工所面临的工艺可控性差且面型精度不高这两大难点, 提出了一种基于车削掩模刻蚀的石英玻璃元件制作方法。该方法主要使用了单点金刚石车削加工技术与反应离子刻蚀技术, 研究了掩模材料车削及刻蚀性能, 并利用实验优选出掩模材料, 最后进行了面积为 5 mm×5 mm 石英玻璃非球面微透镜阵列的制备。通过实验结果与预期参数进行对比, 分析表明, 该方法制作的石英玻璃元件误差均方根为 1.155 nm, 面型精度误差 0.47%。

关键词: 掩模; 石英玻璃; 非球面微透镜阵列; 金刚石车削; 反应离子刻蚀

中图分类号: O439

文献标志码: A

引用格式: 王灏, 董连和, 朱国栋, 等. 车削掩模的石英非球面微透镜阵列制作方法[J]. 光电工程, 2018, 45(4): 170671

Fabrication method of quartz aspheric microlens array for turning mask

Wang Hao^{1,2}, Dong Lianhe^{1*}, Zhu Guodong², Zhang Dong², Zhang Weiguo^{2*}

¹ School of Opto-Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Micro-Nano Manufacturing and System Integration Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract: In order to solve the two difficult problems of the poor processing controllability and the low surface accuracy of quartz aspheric microlens array processing, a fabrication method of quartz aspheric microlens array for turning mask is proposed. This method mainly uses single point diamond turning technology and reactive ion etching technology, studies the turning and etching properties of the mask material, and optimizes the mask material by experiment. Finally, the fabrication of an aspherical glass microlens array with an area of 5 mm×5 mm was carried out. The experimental results are compared with the expected parameters. The analysis shows that the error root mean square of the quartz glass component is 1.155 nm, and the surface accuracy error is 0.47%.

Keywords: mask; quartz glass; aspheric microlens array; SPDT; RIE

Citation: Wang H, Dong L H, Zhu G D, *et al.* Fabrication method of quartz aspheric microlens array for turning mask [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170671

收稿日期: 2017-12-09; 收到修改稿日期: 2018-01-05

作者简介: 王灏(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学微纳加工方面的研究。E-mail: 416539621@qq.com

通信作者: 董连和(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究光学微纳制造、微纳光学元器件以及目标特征信号控制技术。E-mail: custdong@126.com; 张为国(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究领域包括微纳光学, 先进制造等。E-mail: zwg@cigit.ac.cn

1 引言

石英玻璃具有耐高温、热膨胀系数小、抗热冲击、化学稳定性高、耐射线辐照等独特优点。利用其制作的微结构光学元件可满足多种恶劣环境条件下的需求,在激光整形、生物化学技术、空间技术等方面都具有巨大的发展空间及不可替代性。

常用的石英玻璃微结构元件加工方法有:激光加工技术、湿法刻蚀、光刻技术等,其中光刻技术应用最为广泛。利用激光直接加工石英玻璃,易导致石英玻璃出现裂损现象^[1],Zhang 等人采用 157 nm(F_2)及 248 nm(KrF)两种准分子激光和双光束复合方法,实现了对石英玻璃的无裂损刻蚀^[2],但该方法所使用的加工系统复杂程度高,采用逐点写入,数据量大、分辨率低且调试难度大,不能推广使用;湿法刻蚀技术加工石英玻璃材料具有刻蚀速率快、成本低的特点,但存在各向同性腐蚀,导致加工精度差,工艺稳定性不足,而光刻技术在通过曝光显影技术制作掩模图形时,曝光过度或不足以及显影过量或不足都会导致掩模图像质量的下降,工艺可控性较差导致加工精度难以进一步提高^[3]。

此外,也有人利用其他方法进行了相关研究。张健通过小磨头抛光技术实现了面型均方根值为 4.5 nm 的石英非球面制作^[4],这一方法加工精度高,速度慢,效率低,需与其他技术结合使用。Langridge 等人提出了一种通过氢氟酸刻蚀去除硅中离子束加工所引起的损伤的方法,制作出了表面粗糙度小于 4 nm 的非球面模具,但工艺复杂,不具备良好的可重复性^[5]。

针对上述问题,本文结合了单点金刚石车削技术(single point diamond turning, SPDT)及反应离子刻蚀技术(reactive ion etching, RIE)的优点,提出一种基于车削掩模刻蚀的石英玻璃微结构光学元件制作方法。该方法采用单点金刚石车削制作掩模层图形,然后通过

反应离子刻蚀进行掩模图形转移,完成石英玻璃微结构元件的制作。该方法具有工艺简单成熟、稳定性强、高面型精度等特点,为石英玻璃非球面微透镜阵列的制作提供了一种具有巨大发展潜力的可用方法。

2 实验原理

单点金刚石车削加工技术,是利用数控系统控制刀具改变材料形状或破坏材料表层,以切削的方式来实现所要求形状的一种加工形式。金刚石加工机床以天然花岗岩作为机床床身,具有非常高的热稳定性和机械稳定性;运动光滑,无摩擦;机床内的高速空气主轴承载能力高,刚度大;并且内部采用计算机数控系统,加工精度得到了有效提升^[6]。因此,SPDT 具有高面型精度、高稳定性等优点,在微光学元件加工领域具有不可替代的作用^[7-12]。目前,经过长时间的发展,SPDT 已经成为了一项成熟的工艺技术^[13-14],在红外材料的加工中已经得到了广泛的应用。

金刚石车刀不能直接在石英玻璃表面加工,因此提出车削掩模技术。利用 SPDT 对掩模进行车削加工,在其表面制作所需的掩模图形,然后将掩模层图形通过 RIE 转移至石英玻璃基底上^[15-17],进而实现石英非球面微透镜阵列的制作^[18-21]。该制备方法共分为三步,其流程如图 1 所示。

首先如图 1(a)所示,在石英玻璃基底表面制作掩模层;再利用金刚石车床对掩模层进行车削,在其表面加工出所需的掩模层图形,如图 1(b)所示;图 1(c)是利用 RIE 对掩模层及基底进行刻蚀,将掩模层图形转移至基底上,从而实现石英玻璃非球面微透镜阵列的制备。

3 掩模材料的选择

实验中,需要掩模材料同时满足单点金刚石车削及反应离子刻蚀的加工条件,对其提出了以下要求:

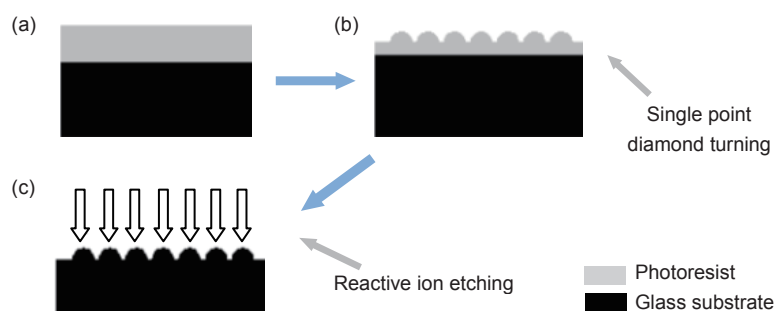


图 1 基于车削掩模的非球面微透镜阵列制作方法原理图

Fig. 1 Fabrication method of aspheric microlens array based on turning mask

1) 制作完成的掩模层具有一定粘附性,能附着于石英玻璃表面并具有一定的表面能,以保证其在进行单点金刚石车削加工过程中不会出现掩模脱落问题;2) 掩模材料满足单点金刚石车削的硬度、强度要求,在切削过程中发生塑性形变,而非弹性形变,以保证较好的面型精度;3) 具有良好的耐刻蚀性,可通过干法刻蚀将掩模图形准确传递至石英玻璃基底上。

根据上述要求,选择聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为掩模层原料。PMMA 具有良好的机械性能,是单点金刚石车削加工的常用材料,而且 PMMA 粉末与有机溶剂相溶后得到的 PMMA 溶液具有良好粘附性,适用于掩模的制作。但 PMMA 材料在反应离子刻蚀后会出现粗糙度下降现象,不适合单独作为掩模层材料。通过刻蚀实验得知,PMMA 溶液与 AZ50XT 光刻胶混合后,可以有效提高其耐刻蚀性,针对两者不同混合比制得的掩模层进行刻蚀实验,以得到最优掩模材料。将质量分数为 10% 的 PMMA 与 AZ50XT 光刻胶以不同质量比混合,制得掩模层并进行相同参数的反应离子刻蚀,刻蚀结果如图 2 所示。可以看出,在相同工艺参数下,混合材料中 PMMA 占比越低,则刻蚀后表面粗糙度 Ra 越低。

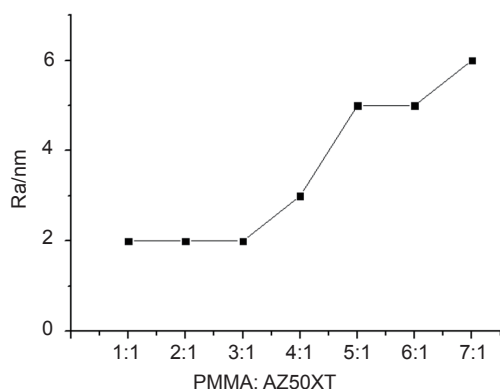


图 2 不同参数掩模材料刻蚀后的表面粗糙度曲线
Fig. 2 Surface roughness curves of masking materials with different parameters after etching

同样,对具有不同质量比的掩模材料进行相同参数的单点金刚石车削加工实验,如图 3 所示。可以看出,由于光刻胶并不具有优良的物理性能,在加工参数相同的情况下,PMMA 占比越大,车削后的表面粗糙度越低、车削精度越高,当 PMMA 溶液质量比超过 75% 以后,车削精度不再发生明显变化。

综合上述车削与刻蚀实验,选择质量比为 3:1 的 PMMA 与 AZ50XT 混合材料作为掩模材料。经实验验

证,该掩模在刻蚀参数为 O_2 20 sccm、 SF_6 12 sccm、功率 100 W 时可实现良好的刻蚀结果,此参数下掩模与石英玻璃刻蚀速率比为 9:1,因此通过该刻蚀参数加工得到的石英微结构矢高会变为掩模图形矢高的 1/9。

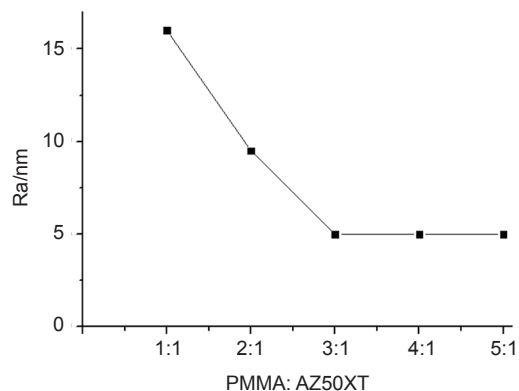


图 3 不同参数掩模材料车削后的表面粗糙度曲线
Fig. 3 Surface roughness curves of masking materials with different parameters after turning

4 实验验证

为验证该石英玻璃微结构元件加工方法的可行性,进行石英玻璃非球面微透镜阵列的制备。首先清洗基片并制作掩模层,实验选用直径 20 mm 的石英玻璃基片,先后置入丙酮、纯水中超声清洗 10 min,放置在电热板上以 140 °C 烘干 20 min。烘干后的石英玻璃基片通过旋转涂胶机进行 12 s 的掩模溶液旋涂,其转速为 1500 r/min。通过旋涂使得掩模溶液在石英玻璃表面实现了均匀分布,短时间静置使掩模溶液自然流平后,放入真空干燥箱,真空下由 20 °C 升温至 70 °C,烘烤 60 min。真空烘烤使掩模溶液内的乳酸乙酯完全蒸发,提高了粘附性,使得掩模溶液固化在石英玻璃表面形成掩模层,此参数下的掩模层厚度约为 17 μm。

掩模层制作完成后进行第二步,利用 SPDT 对掩模层进行车削加工,实验所采用的单点金刚石车床为 Nanotech 350 FG。首先使用车削加工工艺将掩模层表面车削为光滑平面,然后通过快刀伺服系统在掩模层上加工出周期为 280 μm、矢高为 2.2 μm 的凹非球面微透镜阵列。车削加工得到的阵列通过 ZYGO 公司的 NewView 7100 白光干涉仪进行检测,得到图 4(a)、4(b)、4(c),分别为微透镜阵列俯视图、微透镜阵列 3D 图、微镜截面轮廓图。通过图片可以看出,加工得到的掩模图形具有良好的面型精度,其周期及矢高与预计参数一致。

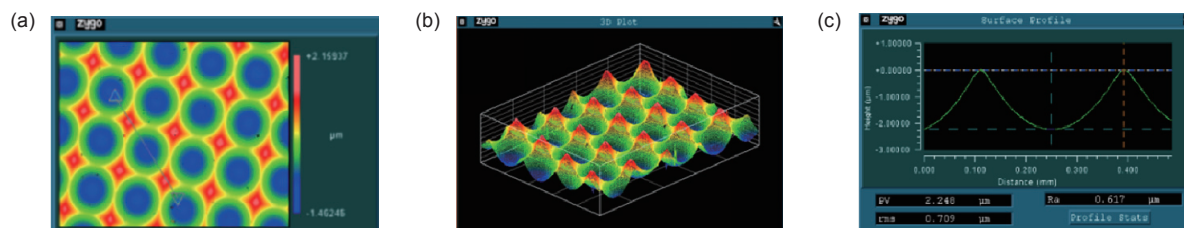


图4 非球面微透镜阵列掩模检测结果图

Fig. 4 Test results of aspheric microlens array

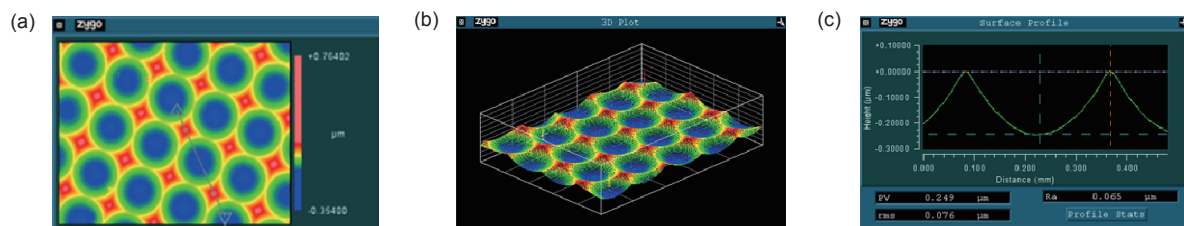


图5 石英玻璃元件检测结果图

Fig. 5 Test results of quartz glass elements

第三步进行掩模图形的转移,车削加工出掩模图形后,通过磁增强反应离子刻蚀机 ME-3A 对掩模及石英玻璃进行刻蚀,刻蚀参数为 O_2 20 sccm、 SF_6 12 sccm、射频功率 100 W。刻蚀结束后,掩模图形转移至石英玻璃表面,实现了非球面微透镜阵列的制备。

5 实验结果与分析

对刻蚀后得到的石英玻璃元件进行白光干涉仪检测,得到图 5。其中图 5(a)、5(b)、5(c)分别为微透镜阵列俯视图、微透镜阵列 3D 图、微镜截面轮廓图。通过图 4 与图 5 对比可以看出此次刻蚀未使得图形精度发生明显变化,其周期仍为 $280\ \mu m$ 。刻蚀选择比因素导致矢高发生了变化,由 $2.2\ \mu m$ 转变为 $0.243\ \mu m$,刻蚀前后矢高比与刻蚀选择比 9:1 相符。

针对图形精度问题进行数据分析,提取掩模数据并针对刻蚀选择比补偿,得到实验预期加工图形。通过对预期图形与实际加工得到的石英玻璃元件图形进行对比分析,其结果如图 6 所示。设预期图形各点矢高分别为 $y_{(0,1)}$ 、 $y_{(0,2)}$ 、 $y_{(0,3)}$ 、...、 $y_{(0,n)}$,实际加工所得微镜截面各点矢高分别为 $y_{(1,1)}$ 、 $y_{(1,2)}$ 、 $y_{(1,3)}$ 、...、 $y_{(1,n)}$,对面型误差均方根进行计算,其中 $n \approx 1100$ 。

$$RMS = [(y_{(1,1)} - y_{(0,1)})^2 + (y_{(1,2)} - y_{(0,2)})^2 + \dots + (y_{(1,n)} - y_{(0,n)})^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中: $(y_{(1,m)} - y_{(0,m)}) (1 \leq m \leq n)$ 即为图 6 中的误差值,通过计算得到石英玻璃非球面微透镜截面图形与预期图形的误差均方根 $RMS = 1.155\ nm$,其面型精度误差仅为 0.47%,良好地实现了面型精度的控制。由图 6 可以看

出,最大误差约为 $\pm 20\ nm$,小于现有光刻技术误差 $\pm 40\ nm$ [22]。

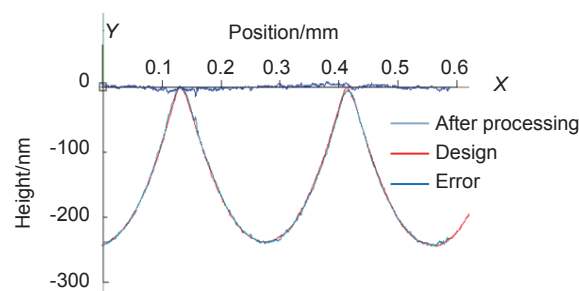


图6 预期微镜截面与加工后微镜截面对比图

Fig. 6 Comparison of the expected cross section of micromirror and the cross section of the micromirror after processing

6 结论

随着光学仪器应用领域的拓展,对光学元件也提出了越来越高的要求,石英玻璃元件作为光学应用的主力军之一,吸引了人们大量的关注。现有加工方法不能良好控制面型精度且工艺稳定性较差,因此元件加工技术的发展具有重要意义。文中提出了车削掩模技术,进行了掩模材料的优选,并发展了一种石英玻璃加工方法。该方法兼具了单点金刚石车削技术面型精度高、加工稳定性高且工艺成熟以及反应离子刻蚀技术良好的各向异性等优点,具有很大的发展潜力,也为石英玻璃材料更加广泛的应用提供了有力支撑。

参考文献

- [1] Yang G S, Chen T, Chen H. Crack-free silica glass surface

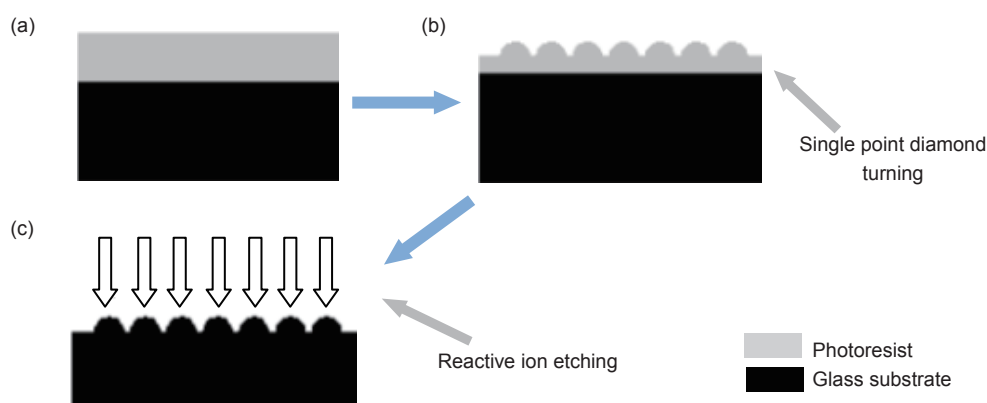
- micro-grooves etched by 248 nm excimer lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(9): 0902004.
杨桂栓, 陈涛, 陈虹. 248 nm 准分子激光刻蚀的无裂损石英玻璃表面微通道[J]. 中国激光, 2017, **44**(9): 0902004.
- [2] Zhang J, Sugioka K, Takahashi T, et al. Dual-beam ablation of fused silica by multiwavelength excitation process using KrF excimer and F₂ lasers[J]. *Applied Physics A*, 2000, **71**(1): 23–26.
 - [3] Cui Z. *Micro-nanofabrication Technologies and Applications*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013: 24–32.
崔铮. 微纳米加工技术及其应用[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 24–32.
 - [4] Zhang J, Dai L, Wang F, et al. Restraint of mid-spatial-frequency error aspheric surface by small-tool adaptive polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(8): 0822002.
张健, 代雷, 王飞, 等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J]. 光学学报, 2013, **33**(8): 0822002.
 - [5] Ridge M T, Cox D C, Webb R P, et al. The fabrication of aspherical microlenses using focused ion-beam techniques[J]. *Micron*, 2014, **57**: 56–66.
 - [6] Yuan W, Chan C Y, Li L H, et al. Investigation of the surface profile along the cutting trajectory and its correlation with cutting forces in single point diamond turning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, **89**(5–8): 1327–1338.
 - [7] Wang Y, Yu J C. Compensation for error of diamond tool's cutting edge in single diamond turning[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(1): 98–102.
王毅, 余景池. 超精密车削金刚石刀具刃口误差的高精度补偿[J]. 光电工程, 2011, **38**(1): 98–102.
 - [8] Gong L B, Cheung C F. Modeling and characterization of surface generation in fast tool servo machining of microlens arrays[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, **63**(4): 957–970.
 - [9] Dunkel J, Wippermann F, Brückner A, et al. Fabrication of refractive freeform array masters for artificial compound eye cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9130**: 91300P.
 - [10] Mukaida M, Yan J W. Ductile machining of single-crystal silicon for microlens arrays by ultraprecision diamond turning using a slow tool servo[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, **115**: 2–14.
 - [11] Chen Y L, Cai Y D, Tohyama K, et al. Auto-tracking single point diamond cutting on non-planar brittle material substrates by a high-rigidity force controlled fast tool servo[J]. *Precision Engineering*, 2017, **49**: 253–261.
 - [12] Yan F, Fan D, Zhang B Z, et al. Manufacturing and testing of a SiC unrotational-symmetric aspherical optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(3): 135–139.
闫锋, 范镒, 张斌智, 等. 一种 SiC 非回转对称非球面的加工与检测[J]. 光电工程, 2009, **36**(3): 135–139.
 - [13] Zhu H F, Jia C P, Fang Z L. Design method and optical performance of aspherical IOL[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 56–59.
朱海丰, 贾翠萍, 方志良. 非球面人工晶体设计及其光学性能研究[J]. 光电工程, 2009, **36**(4): 56–59.
 - [14] En D, Xu K X, Chen C H, et al. Development of integrated optical aplanatic double-convex aspherical waveguide lens[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 98–101, 115.
恩德, 徐可欣, 陈才和, 等. 集成光学非球面消球差双凸波导透镜的研制[J]. 光电工程, 2008, **35**(10): 98–101, 115.
 - [15] Zhang S F, Liu Z T, Li Y P, et al. Preparation and characterization of nanoimprint template on quartz by reactive ion etching[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, **31**(11): 1786–1789.
张少峰, 刘正堂, 李阳平, 等. 反应离子刻蚀法制备石英纳米压印模板的工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2012, **31**(11): 1786–1789.
 - [16] Chiromawa N L, Ibrahim K. Fabrication of micro-array of Fresnel rings on Si by electron beam lithography and reactive ion etching[J]. *Applied Physics A*, 2016, **122**(2): 129.
 - [17] Xie Y P, Wu P, Yang Z, et al. Continuous microstructure etching process polyimide based moving mask exposure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0922004.
谢玉萍, 吴鹏, 杨正, 等. 基于移动掩模曝光的聚酰亚胺连续微结构刻蚀工艺研究[J]. 光子学报, 2015, **44**(9): 0922004.
 - [18] Yu E, Kim S C, Lee H J, et al. Extreme wettability of nanostructured glass fabricated by non-lithographic, anisotropic etching[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9362.
 - [19] Mahoney S A, Rufford T E, Rudolph V, et al. Creation of microchannels in Bowen Basin coals using UV laser and reactive ion etching[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, **144–145**: 48–57.
 - [20] Lu Z Y, Hu G H, Yun B F, et al. RIE technological study of polymer optical waveguide[J]. *Microfabrication Technology*, 2008(3): 5–9.
陆志远, 胡国华, 恽斌峰, 等. 聚合物光波导的反应离子刻蚀工艺研究[J]. 微细加工技术, 2008(3): 5–9.
 - [21] Zhang C C, Yang C S, Ding G F, et al. Deep reactive ion etching of polymethylmethacrylate[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2004, **24**(2): 157–160.
张丛春, 杨春生, 丁桂甫, 等. PMMA 的反应离子深刻蚀[J]. 真空科学与技术学报, 2004, **24**(2): 157–160.
 - [22] Shi L F, Du C L, Dong X C, et al. Effective formation method for an aspherical microlens array based on an aperiodic moving mask during exposure[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(34): 8346–8350.

Fabrication method of quartz aspheric microlens array for turning mask

Wang Hao^{1,2}, Dong Lianhe^{1*}, Zhu Guodong², Zhang Dong², Zhang Weiguo^{2*}

¹School of Opto-Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Micro-Nano Manufacturing and System Integration Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China



Fabrication method of aspheric microlens array based on turning mask

Overview: In the existing mature processing methods, the processing of micro optical structure can be divided into two major categories: microstructural lithography and single point diamond turning. Microstructural lithography can be used to process inorganic materials, such as quartz, silicon and so on. However, microstructural lithography has not been able to solve the problem of micro and nano structure shape control. The single point diamond turning technology can achieve precise control of the surface shape, but it is difficult to process the inorganic and brittle materials.

In order to solve the two difficult problems of quartz aspheric microlens array processing, such as poor controllability and low surface accuracy, a method of making quartz glass based on turning mask and etching is proposed. The single point diamond turning technology and micro photomask technology is innovatively combined. The mask layer pattern is made by single point diamond turning, and then the mask pattern is transferred by reactive ion etching. Finally the fabrication of quartz glass aspheric microlens array element is completed.

We mainly make the selection of the mask material and study the etching performance and turning performance of PMMA and AZ50XT photoresist. We find that the addition of AZ50XT photoresist in PMMA can effectively improve the anti etching performance, not only meet the requirements of single point diamond turning, and after reactive ion etching after the mask pattern can be maintained by the original still. By analyzing the surface roughness of mask after single point diamond turning and the surface roughness of mask after reactive ion etching, we get the most suitable mask material for this processing method. Finally, the new material is used to make the mask. The pattern is made on the mask surface by single point diamond turning, and the mask pattern is transferred to the quartz substrate by reactive ion etching technology. The aspheric microlens array with area of 5 mm×5 mm is obtained.

The experimental results are compared with the expected parameters. The analysis shows that the root mean square error of the quartz glass element manufactured by this method is 1.155 nm and the accuracy of face shape error is 0.47%. The experimental results show that this method possesses not only the advantages of single point diamond turning technology, such as high surface accuracy, high processing stability and mature technology, but good anisotropy of reactive ion etching technology. This method has great potential for development, and it also provides a strong support for the wider application of quartz glass materials.

Citation: Wang H, Dong L H, Zhu G D, *et al.* Fabrication method of quartz aspheric microlens array for turning mask[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170671

* E-mail: custdong@126.com; zwg@cigit.ac.cn