

文章编号 1004-924X(2012)01-0031-07

光纤激光诱导背面干法刻蚀制备 二元衍射光学元件

陈继民*, 何超, 周伟平, 申雪飞

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 为了降低激光直接辐照透明介电材料的表面加工粗糙度和激光能量密度刻蚀阈值, 提高微光学元件的产出率, 介绍了一种用固体介质作吸收层, 激光直接作用在透明光学材料上进行微纳加工的激光诱导背面干法刻蚀工艺。首先, 选用 95% 氧化铝陶瓷作固体材料辅助吸收层, 应用中心波长为 1 064 nm 的掺镱光纤激光器, 在 3.2 mm 厚的熔融石英玻璃表面刻蚀了亚微米尺度的二维周期性光栅结构。然后, 对刻蚀参数进行拟合并探讨了激光能量密度对刻蚀参数的影响。最后, 观察该二元光学元件的衍射花样图形并讨论其衍射特性。实验制备了槽深为 4.2 μm , 槽底均方根粗糙度小于 40 nm, 光栅常数为 25 μm 的二维微透射光栅, 其刻蚀阈值低于 7.66 J/cm²。结果表明, 应用该工艺制备二维透射光栅, 降低了激光刻蚀透明材料的密度阈值及加工结构的表面粗糙度。

关键词: 激光刻蚀; 微纳加工; 二元衍射光学元件; 能量密度阈值

中图分类号: TN305.7; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0031

Fabrication of binary diffractive optical element by fiber laser induced backside dry etching

CHEN Ji-min*, HE Chao, ZHOU Wei-ping, SHEN Xue-fei

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

* Corresponding author, E-mail: jimin@bjut.edu.cn

Abstract: With the aim to lower the surface roughnesses of etched samples and the etching threshold fluence of a direct laser irradiation source and to raise the yield of micro-optical elements, a laser induced backside dry etching technique with the assistance of a solid medium as the absorbed layer was proposed to fabricate transparent dielectric materials by direct laser irradiation. By using an alumina ceramic wafer (Al_2O_3 in 95%, surface roughness less than 500 nm) as the absorber, a 2D transmittance grating in a micro size binary Diffractive Optical Element (DOE) was fabricated on the fused silica with a thickness of 3.2 mm by the 1 064 nm Ytterbium Doped Fiber (YDF) laser. And then, the etching parameter curves were fitted and the effect of laser energy density on the parameters was discussed. Finally, the diffraction patterns of micro structure were observed to examine the features of binary DOE. According to the measured results, the binary transmittance grating shows its grating constant in 25 μm , the depth of trench in 4.2 μm , and the RMS roughness of the trench bottom below

收稿日期: 2011-06-20; 修订日期: 2011-11-18.

基金项目: 北京市教委重点项目 (No. KZ20091005006)

40 nm. Furthermore, the etching threshold influence is estimated below 7.66 J/cm^2 . These results are much lower than those of the etching without any absorbers.

Key words: laser etching; micro/nano fabrication; binary Diffractive Optical Element (DOE); energy threshold fluence

1 引言

微透镜、微光栅、相位元件和微偏振器等微光学元件能够实现微小阵列集成、成像和波面转换等普通光学元件难以实现的功能,在工业及国防科技中具有重要的应用价值^[1]。

衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)是微光栅的一种,也是微光机电系统(MEOMS)中应用最广泛的光学元件之一^[2]。其性能由光学结构参数直接决定,包括刻槽深度,槽底粗糙度,边界平直度等。常用的光学材料,熔融石英, CaF_2 , 玻璃等介电材料在热应力及机械应力作用下易碎而且容易产生非均匀裂纹,因此,这对微光学元件的加工提出了更高的要求。与机械刻蚀^[3], 电子束直写等传统方法相比,激光直写刻蚀具有非接触,作用时间短等优点,是一种理想的加工手段^[4]。然而在一般情况下,激光直接作用透明光学材料所需的能量密度非常高,例如 CaF_2 和 MgF_2 对 355 nm 紫外激光的功率阈值分别是 43 J/cm^2 和 60 J/cm^2 , 这增加了加工难度^[5]。

激光诱导背面干法刻蚀(Laser Induced Backside Dry Etching, LIBDE)是利用准分子紫外激光或飞秒激光,基于固体辅助吸收层的热量积累效应和反冲动量机制实现材料的刻蚀去除^[6-8]。常用金属镀膜(如铜,银,铝等^[9-11])固体材料取代激光诱导背面湿法刻蚀(Laser Induced Backside Wet Etching, LIBWE)中应用的有毒易燃有机液体作为吸收层^[12-14]。K. Zimmer 等最先提出用 248 nm KrF 准分子激光器,以甲苯和甲苯/丙酮混合液作为吸收介质,在石英材料上刻蚀出微米级结构,而且将激光阈值密度降低 2 个数量级,约等于 0.3 J/cm^2 。他们还应用液态镱作为吸收层,在 3.4 J/cm^2 的激光能量密度下,在石英玻璃上刻蚀出 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 深度为 $7.6 \mu\text{m}$, 粗糙度为 45 nm 的槽^[15]。D. P. Banks 等使用 100 nm 厚的金属 Cr 层,在飞秒激光辐照下实现了低能量密度刻蚀^[16]。B. Hopp 等人用固态

和熔化态锡作为吸收层,在熔融石英上改进了常规激光诱导背面干法刻蚀方法^[17]。哈尔滨工业大学的单明广等应用 441.6 nm 的 He-Cd 激光制作了用于无模光刻的连续浮雕衍射透镜阵列,该阵列 $F/\#$ 为 7.5, 衍射效率优于 70%^[18]。

然而,由于透射率和热影响等因素,中心波长为 1 064 nm 的光纤激光作为能量源加工透明光学材料的报道并未多见。光纤激光器体积小,能量密度高,配备振镜扫描系统后加工效率会大幅提高。Z. Q. Huang 等使用 1 064 nm 波长 Nd:YVO₄ 激光器,在饱和硫酸铜溶液中以能量密度约为 2 J/cm^2 的激光,成功实现对 1 mm 厚透明玻璃不同形状的切割^[19]。本文建立了以 1 064 nm 光纤激光为能量源,氧化铝陶瓷作为背面吸收层,在石英玻璃表面刻蚀微光学结构的加工装置;并探讨了应用氧化铝陶瓷作为吸收层的光纤激光诱导背面干法刻蚀过程中的材料去除原理,以及激光能量密度对刻蚀深度的影响,通过计算得出了石英玻璃在这种刻蚀条件下的刻蚀能量密度阈值;最后,配合使用扫描振镜,成功制备了亚微米尺度的二维周期性光栅结构。

2 激光诱导背面干法刻蚀装置与原理

使用固体材料作为辅助吸收层的激光背面诱导干法刻蚀实验装置如图 1 所示,吸收层材料置于石英玻璃与衬底之间,用夹具夹紧固定在工作台上。吸收材料可以是致密的薄片,也可是均匀铺排的粉末。本实验采用 95 氧化铝陶瓷片,厚度为 1 mm,表面粗糙度 $< 500 \text{ nm}$, 其熔点为 $2 072 \text{ }^\circ\text{C}$, 热导率为 $40 \text{ W/m} \cdot \text{K} (@20^\circ\text{C})$ 。掺镱光纤激光器中心波长为 1 064 nm, 最大输出功率为 20 W, 重复频率为 20~80 kHz, 激光束经过振镜系统改变输出路径和扫描速度, 焦距为 186 mm 的 $f-\theta$ 场镜将激光束聚焦在石英玻璃和氧化铝陶瓷接触平面,使其在石英玻璃背面处光斑能量密度得到最大。

设置扫描路径和速率,通过激光诱导背面干

法刻蚀方法得到二维微透射光栅样品,将其浸没在无水乙醇中超声波清洗 3 min。并用扫描电子显微镜和 WYKO 三维形貌仪观察和测量刻蚀于石英玻璃表面的光学形貌参数。最后,在 532 nm 绿光激光下观测该结构的衍射花样图,证明衍射光学元件具有空间二维结构。

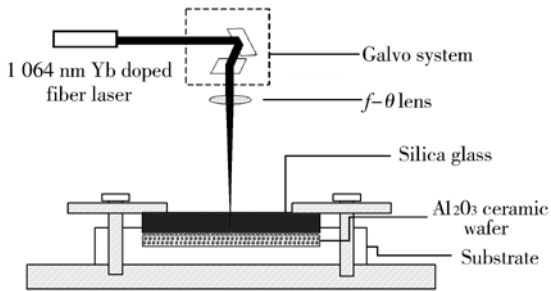


图 1 光纤激光诱导背面干法刻蚀实验装置

Fig. 1 Experimental setup for laser induced backside dry etching

由于石英玻璃对光纤激光的高透射率,激光束透过玻璃聚焦在吸收层与石英玻璃接触面,能量被氧化铝陶瓷片所吸收。在激光辐照过程中,陶瓷片吸收的激光能量在一个脉冲的极短时间(约几十微秒)内转化为分子热能,在夹具压力作用下,陶瓷片与石英玻璃紧密接触,由于氧化铝陶瓷较高的热导系数,积累的热能以激光光斑为中心集中扩散至石英玻璃表层。吸收大量热能的石英玻璃,达到软化点,开始熔融,在反冲动能作用下流向两边,从而形成刻蚀沟槽。

应用氧化铝陶瓷的干法刻蚀,不仅降低了刻蚀能量阈值,还简化了湿法或者以金属镀膜为吸收层的干法刻蚀中,后期样品的复杂处理过程。

3 实验结果与分析

3.1 材料透射曲线及吸收系数

为了研究样品在不同波长的吸收特性,使用紫外可见分光光度计间接测量了未刻蚀的石英玻璃,刻蚀后的光学结构以及吸收层氧化铝陶瓷在 250~1500 nm 的透射率曲线,如图 2 所示。图中,石英玻璃刻蚀前后在 1064 nm 处都有较高的透射率,而氧化铝陶瓷却非常低,约为 2.65%,表明其在刻蚀过程中几乎阻挡绝大部分 1064 nm 光纤激光能量穿透。

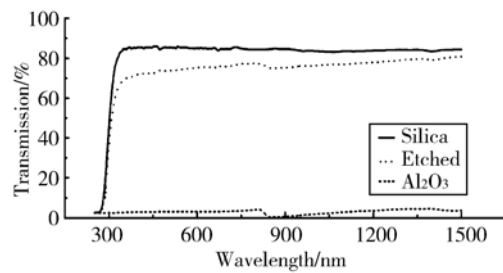


图 2 不同样品的透射率曲线:未刻蚀的石英玻璃,刻蚀后的光学结构以及吸收层氧化铝陶瓷

Fig. 2 Transmittances of different samples: silica glass, sample etched using alumina ceramic wafer as absorber, and alumina ceramic wafer

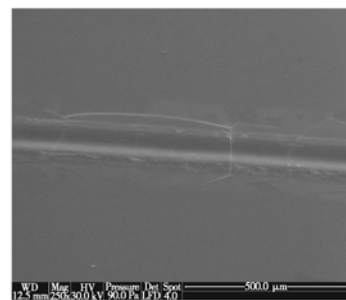
吸收层对激光能量的吸收系数以及其导热系数是激光诱导背面刻蚀过程中的重要参数,为了避免测量误差,对一定波长 λ 的吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 可通过式(1)间接计算:

$$\alpha(\lambda) = \frac{-\ln(T(z, \lambda))}{z}, \quad (1)$$

这里, $T(z, \lambda)$ 是距离入射表面 z 处材料对一定波长 λ 的透射率。当 $z=1$ mm, $\lambda=1064$ nm 即为氧化铝陶瓷片厚度时,将 $T(1$ mm, 1064 nm) = 2.65% 代入上式得到 $\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3}(1064$ nm) ≈ 36.3 cm $^{-1}$; 同样计算得到 $\alpha_{\text{silica}}(1064$ nm) ≈ 1.84 cm $^{-1}$ 。这表明氧化铝陶瓷对光纤激光的吸收系数约为石英玻璃的 20 倍。

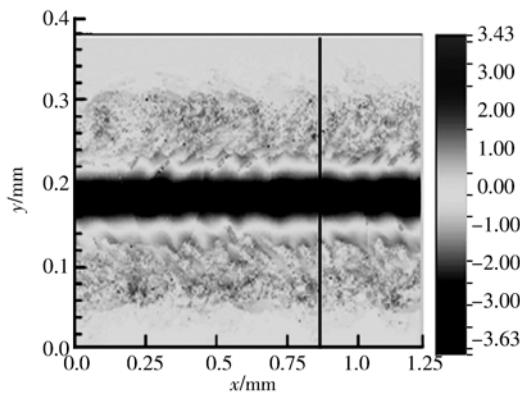
3.2 激光参数与微光学结构的关系

在激光脉冲作用下,设置振镜扫描路径,使用合适的激光参数,得到具有周期性的衍射光学结构。图 3 所示的是周期性结构中的一条微沟槽。通过扫描电镜和三维形貌仪观测沟槽的微观结构并测量了深度,宽度及槽底粗糙度等参数。



(a) 刻蚀沟槽的扫描电子显微镜图像(250 \times)

(a) SEM photography of single etched trench(250 \times)



(b) 三维形貌仪测量的微沟槽 2D 形貌

(b) Two dimensional profile of single etched trench

图 3 激光能量密度为 7.66 J/cm^2 下以氧化铝陶瓷作为吸收层刻蚀的微沟槽形貌Fig. 3 Profiles of single trench etched using Al_2O_3 wafer as absorber at laser fluence of 7.66 J/cm^2

三维形貌仪测得沟槽横截面的平均深度 \bar{d} 为 $3.17 \mu\text{m}$, 平均宽度 \bar{w} 为 $27.1 \mu\text{m}$, 槽底横截面宽度为 $10 \mu\text{m}$ 内的均方根粗糙度 $R_M = 40 \text{ nm}$, 而原始石英玻璃表面的粗糙度为 20 nm , 二者非常接近。

光纤激光器在平均激光输出功率 $P_0 = 20 \text{ W}$, 脉冲重复频率 $R_p = 20 \text{ kHz}$ 的条件下, 单个脉冲能量 $E_{p0} = P_0 / R_p = 1 \text{ mJ}$ 。

根据 D^2 方法^[20], 可以得出距离光束中心处的激光能量密度 $F(r)$ 表达式:

$$F(r) = F_0 \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right], \quad (2)$$

式中, $F_0 = \frac{2E_{p0}}{\pi\omega_0^2}$ 为最大激光能量密度, 当光斑直径为 ω_0 时, 激光束的能量密度:

$$F(\omega_0) = F_0 / e^2. \quad (3)$$

代入实验数据, 由公式(2)、(3)计算得出, 样品在激光诱导背面干法刻蚀的激光能量密度 $F \approx 7.66 \text{ J/cm}^2$ 。

图 4 中展示了刻蚀深度与激光能量密度的关系。图中拟合的线段可以分成 3 部分: 第 1 部分是在 F 约为 7.18 J/cm^2 前, 石英玻璃几乎观测不到深度变化; 第 2 部分在 F 约为 7.66 J/cm^2 后, 刻蚀深度与激光能量密度以固定斜率成线性关系, 此时, 增大激光功率, 即增大激光能量密度, 样品刻蚀深度也相应增加; 由此可以推断, 应用氧化铝陶瓷作为吸收层的激光诱导背面干法刻蚀, 其

能量密度阈值(第 3 部分)在 $7.18 \sim 7.66 \text{ J/cm}^2$ 。

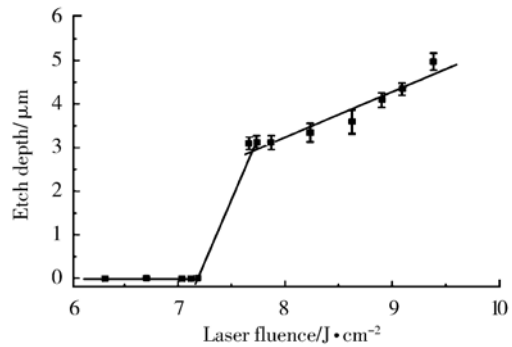


图 4 以氧化铝陶瓷作为吸收层的 LIBDE 中刻蚀深度与激光能量密度的关系

Fig. 4 Etched depths as a function of applied laser fluence for LIBDE using Al_2O_3 ceramic wafer as absorber

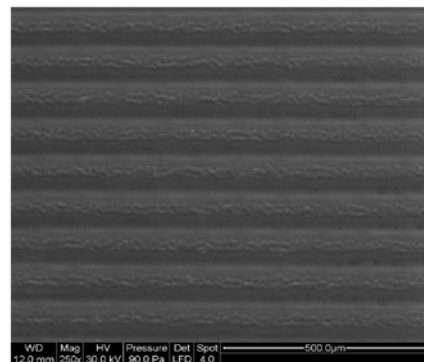
激光器在一定重复频率下的脉冲数目也是刻蚀过程中的重要参数之一, 在振镜扫描系统中, 每个光斑区域内的脉冲数目 N 为:

$$N = \frac{2\omega_s R_e}{v_s}, \quad (4)$$

式中, v_s 是激光扫描速度, 代入数值解得 $N=4$, 刻蚀速率 $R_e = \bar{d} / N = 0.80 \mu\text{m/pulse}$. 与激光诱导背面湿法刻蚀中准分子刻蚀速率 ($0.08 \mu\text{m/pulse}$)^[13] 相比要高一个数量级。

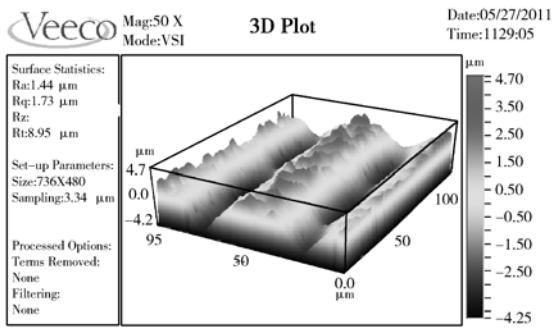
3.3 二元微透射光栅

控制激光的扫描路径, 可以使其刻蚀出不同的有规律的光学结构。图 5 是在熔融石英表面, 应用 1064 nm 光纤激光诱导干法背面刻蚀的平行微透射光栅, 图 5(a) 所示为在扫描电镜下放大 250 倍的微光栅。由于受到激光光斑直径的制



(a) 微光栅在 SEM 下的形貌(250×)

(a) SEM graph of micro transmittance grating (250×)



(b) 微透射光栅相邻两条刻槽的三维形貌图

(b) Three dimensional profile of two trenches in transmittance grating

图 5 激光背面干法刻蚀制备的光栅微观形貌

Fig. 5 Topography features of LIBDE grating

约,三维形貌仪测得光栅常数平均值为 $25 \mu\text{m}$,刻槽深度为 $4.2 \mu\text{m}$ 。

根据计算,每个光斑面积内有 4 个脉冲作用。这一过程使得光栅结构中单个沟槽中也形成相连的凹坑,呈周期性排列,如图 5(b)所示。粗略测得相邻凹坑的距离约为 $50 \mu\text{m}$,即光纤激光聚焦在石英玻璃背面的光斑直径。这种形貌说明刻蚀的微结构同时在横向和纵深方向都有深度,能形成两个方向的相位差。

以 532 nm 波长的绿光半导体激光作为检测光源,观测了微透射光栅的衍射特性,如图 6 所示。透射后的激光能量被重新分布,在 X 轴和 Y 轴方向光强分布是典型的二维衍射光场能量分布。在整个光屏中,中央零级主极大光强最强,次

级依次对称分布在主极大两边,验证了微透射光栅的二维结构,即所制备的微透射光栅是二元衍射光学元件。

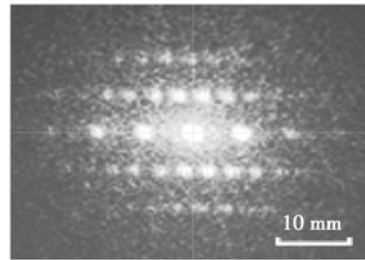
图 6 微透射光栅 532 nm 激光衍射花样

Fig. 6 Diffraction pattern of micro transmittance grating by a 532 nm diode laser

4 结 论

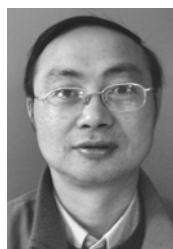
氧化铝陶瓷具有熔点高,热传导系数高以及致密性好的特点,通过将其作为辅助吸收层,在熔融石英基底上应用光纤激光诱导背面干法刻蚀成功地制备了微透射光栅,这种二元光学衍射元件具有典型的二维衍射光斑分布特性。实验表明,随着激光能量密度的增加,刻蚀深度随之增大。激光能量密度阈值介于 $7.18 \sim 7.66 \text{ J}/\text{cm}^2$,克服了直接刻蚀无法实现的问题。用光纤激光背面诱导干法刻蚀二元衍射光学元件,刻蚀平均深度可达 $3.17 \mu\text{m}$,宽度为 $25 \mu\text{m}$,小于光斑直径,底部均方根粗糙度为 40 nm ,刻蚀速率达到 $0.8 \mu\text{m}/\text{pulse}$,比基于紫外激光器的湿法刻蚀高一个数量级。

参考文献:

- [1] 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
HERZIG H P. *Micro-Optics Elements, Systems and Applications*[M]. Beijing: China National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 佟军民,胡松,李爱敏,等. 衍射光学元件在无掩模光刻中的应用[J]. 微细加工技术, 2006, 10(5): 18-23.
TONG J M, HU S, LI A M, *et al.*. Application of diffractive optical elements in maskless lithography [J]. *Microfabrication Technology*, 2006, 10(5): 18-23. (in Chinese)
- [3] 仇中军,周立波,房丰洲. 石英玻璃的化学机械磨削加工[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1554-1561.
QIU ZH J, ZHOU L B, FANG F ZH, *et al.*. Chemical mechanical grinding for quartz glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1554-1561. (in Chinese)
- [4] 沈易,吴翌旭,邢燕冰,等. 多光束无掩模光刻系统[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 537-539.
SHEN Y, WU Y X, XING Y B, *et al.*. Multi-beam maskless lithograph system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 537-539. (in Chinese)
- [5] EHRHARDT M, RACIUKAITIS G, GECYS P, *et al.*. Laser-induced backside wet etching of fluoride and sapphire using picosecond laser pulses[J]. *Ap-*

- pl. Phys. A*, 2010,101: 399-404.
- [6] ZIMMER K, BÖHME R, EHRHARDT M, *et al.*. Mechanism of backside etching of transparent materials with nanosecond UV-lasers [J]. *Appl. Phys. A*, 2010,101: 405-410.
- [7] BÖHME R, PISSADAKIS S, EHRHARDT M, *et al.*. Backside etching of fused silica with ultra-short laser pulses at the interface to absorbing liquid [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, 59: 173-176.
- [8] HOPP B, VASS C, SMAUSZ T. Laser induced backside dry etching of transparent materials [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253: 7922-7925.
- [9] ZIMMER K, BÖHME R, VASS C, *et al.*. Time-resolved measurements during backside dry etching of fused silica [J]. *Applied Surface Science*, 2009 (25): 9617-9621.
- [10] ZIMMER K, BÖHME R, RAUSCHENBACH B. Laser etching of fused silica using an adsorbed toluene layer [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, 79: 1883-1885.
- [11] SMAUSZ T, CSIZMADIA T, KRESZ N, *et al.*. Influence on the laser induced backside dry etching of thickness and material of the absorber, laser spot size and multipulse irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254: 1091-1095.
- [12] YENA M H, HUANG C W, HSU W C. Crack-free micromachining on glass substrates by visible LIBWE using liquid metallic absorbers [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257: 87-92.
- [13] EHRHARDT M, RACIUKAITIS G, GECYS P, *et al.*. Microstructuring of fused silica by laser-induced backside wet etching using picosecond laser pulses [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256: 7222-7227.
- [14] LEE T, JANG D, AHN D, *et al.*. Effect of liquid environment on laser-induced backside wet etching of fused silica [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107: 033-112.
- [15] ZIMMER K, BÖHME R, RUTHE D, *et al.*. Backside laser etching of fused silica using liquid gallium [J]. *Appl. Phys. A*, 2006, 84: 455-458.
- [16] BANKS D P, KAUR K S, EASON R W. Etching and forward transfer of fused silica in solid-phase by femtosecond laser-induced solid etching (LISE) [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255: 8343-8351.
- [17] HOPO B, SMAUSZ T, VASS C, *et al.*. Laser-induced backside dry and wet etching of transparent materials using solid and molten tin as absorbers [J]. *Appl. Phys. A*, 2009, 94: 899-904.
- [18] 单明广, 钟志, 郭黎利, 等. 用于无模光刻的连续浮雕衍射透镜阵列设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 9-14.
- SHAN M G, ZHONG ZH, GUO L L. Design of continuous-relief harmonic diffractive microlens array for maskless lithography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 9-14. (in Chinese)
- [19] HUANG Z Q, HONG M H, DO T B M, *et al.*. Laser etching of glass substrates by 1 064 nm laser irradiation [J]. *Appl. Phys. A*, 2008, 93: 159-163.
- [20] BONSE J, WROBEL J M, KRÜGER J, *et al.*. Ultrashort-pulse laser ablation of indium phosphide in air [J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2001, 72: 89-92.

作者简介:



陈继民(1965—),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,1986年、1989年于华中科技大学分别获得学士和硕士学位,2001年于北京工业大学获得博士学位,主要从事激光微加工技术及其应用,激光烧结以及激光快速成形制造方面的研究。E-mail: jimin@bjut.edu.cn



何超(1987—),男,湖北汉川人,硕士研究生,2009年于武汉工程大学获得学士学位,主要从事激光微技术与微光学元件方面的研究。E-mail: hechao@e-mails.but.edu.cn



周伟平(1987—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,2010年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事脉冲激光技术与功能陶瓷方面的研究。E-mail: china-weiping@163.com



申雪飞(1982—),男,江苏徐州人,硕士研究生,2009年于太原理工大学获得学士学位,主要从事聚合物材料激光微加工方面的研究。E-mail: xuefeishen@e-mails.bjut.edu.cn

●下期预告

宽谱段改进的车尔尼-特纳光谱成像系统设计

薛庆生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了满足宽谱段高光谱成像仪的要求,克服传统的车尔尼-特纳光谱仪像散较大的缺点,基于像差理论,提出了一种改进的车尔尼-特纳光谱成像系统。平面光栅处于发散光中,利用平面光栅产生的像散来补偿物镜产生的像散,并且推导出了宽谱像散同时校正条件,实现了宽谱像散同时校正。具体分析了解像差的原理和方法,编制了初始结构快速计算程序。作为实例,设计了一个谱段范围为 540~780 nm 的宽谱段像散同时校正的车尔尼-特纳光谱成像系统,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光谱成像系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行了分析,分析结果表明,在整个工作波段(540~780 nm)内,全视场调制传递函数均达到 0.52 以上,实现了宽谱段像散同时校正,在宽谱段内同时获得了良好的成像质量,满足设计指标要求,也表明所提出的改进方法的可行性。