

文章编号: 1001-3806(2002)02-0094-03

准分子激光刻蚀聚合物微图形制作研究

章琳 楼祺洪 魏运荣 董景星 李铁军 黄峰
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

摘要: 主要描述了紫外准分子激光刻蚀聚酰亚胺 (polyimide, PI) 制作微图案实验。通过这种刻蚀方法, 成功地在 PI 上制作了微米量级线宽和亚微米量级深度的图案。

关键词: 紫外准分子激光; 刻蚀; PI; 微图形制作

中图分类号: TN248.5 **文献标识码:** A

Micropatterns on polymers etched by excimer lasers

Zhang Lin, Lou Qihong, Wei Yunrong, Dong Jingxing, Li Tiejun, Hang Feng
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800)

Abstract: In the paper, the experiment with UV excimer laser etching PI for micropatterns is described in detail. With this method, micropatterns with micron-scale line-width and sub-micron depth have been successfully fabricated on PI.

Key words: UV excimer laser; etching; PI; micropattern

引言

准分子激光对聚合物有极佳的刻蚀性能, 这主要得益于准分子激光的两个特性: 短波长特性(波长范围 157nm ~ 351nm) 以及窄脉宽特性(脉宽一般为数十纳秒)。准分子激光刻蚀聚合物可达到亚微米分辨率, 深度精度优于 0.1 μ m, 同时刻蚀表面光洁, 刻蚀边缘锐利。1996 年, 瑞士 Paul Scherrer 学院报道利用 XeCl 准分子激光消融聚碳酸酯类制作微齿轮。Wang^[1]通过 ArF 准分子(193nm) 激光刻蚀 PI 材料, 和 Behrmann^[2]通过 KrF 准分子(248nm) 激光刻蚀 PI 材料成功地制作了一些基于衍射原理的光学元件, 并具有很高的衍射效率。

我们实验中采用的基质材料为 PI, PC, PMMA, 3 种材料对 XeCl(308nm) 以及 ArF(193nm) 准分子激光的吸收系数如表 1 所示。

Table 1 Absorptivities of PI, PC and PMMA at 308nm and 193nm

	PI	PC	PMMA
308nm / cm ⁻¹	9 × 10 ⁴	22	20
193nm / cm ⁻¹	4.2 × 10 ⁵	5.5 × 10 ⁵	2 × 10 ³

作者简介: 章琳, 男, 1974 年出生。光学硕士。现从事激光应用研究。

收稿日期: 2000-11-27; 收到修改稿日期: 2001-03-28

刻蚀实验表明: 对准分子激光刻蚀性能影响最大的是材料对激光的吸收系数, 308nm 准分子激光对 PC 和 PMMA 的刻蚀面有气孔、裂纹产生, 而 308nm 激光对 PI 以及 193nm 激光对 PI, PC 和 PMMA 均能刻蚀出光洁的表面并有锐利的边缘。

1 实验装置

准分子激光刻蚀系统装置示意图如图 1 所示, 为投影法刻蚀, 实验在空气中进行。

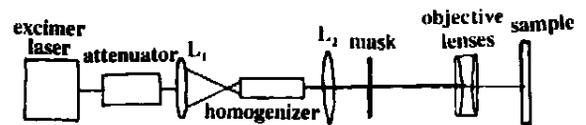


Fig. 1 Experimental setup of the 308nm excimer laser etching PI

其中准分子激光器为实验室研制的 SY-200 (XeCl: 308nm, 脉宽 30ns), 输出单脉冲能量约 100mJ。衰减器作用是改变激光束能量, 从而改变到达刻蚀样品表面激光能量密度。装置中透镜的材料全部为石英, 以保证对 308nm 激光的良好透过率。聚光透镜 L₁ 焦距为 30cm, 其作用是将激光束全部聚入匀束器内, 光束在匀束器内经过多次反射后在出口处重叠而形成光强分布均匀的光斑, 此时一束分成数十束光束。匀束器为一段矩形“光波导”, 长度为 30cm, 通光口径为 5mm × 5mm, 内壁镀有铝膜以增大对 308nm 激光的发射率, 降低匀束器

吸收,提高传输效率,匀束器传输损耗约 40%,出口处光斑能量不均匀性小于 $\pm 2\%$ 。透镜 L_2 将匀束器出口处成像到掩模板处,放大倍率可改变以适合掩模板大小。 L_1 、匀束器和 L_2 组成匀束系统。

成像物镜的分辨率直接决定了刻蚀精度,这里物镜是专门为 308nm 准分子激光设计的一个物镜组,其表面镀有 308nm 增透膜,整个物镜对 308nm 激光的透过率为 80%。物镜具体光学参数见表 2。

Table 2 Optical parameters of objective lenses

reduction: 4 ×	numerical aperture: 0.15
working distance: 127mm	depth of focus: $0.7 / (NA)^2 = 10\mu\text{m}$
maximun field size: $\varnothing 30\text{mm}$	diffraction limited resolution: $0.7 / NA = 1.5\mu\text{m}$

设计的工作距离比较大,这样可以避免物镜被刻蚀溅射物污染。数值孔径较大程度上决定了刻蚀边缘的锐利程度,数值孔径越小,刻蚀边缘越垂直。衍射极限分辨率采用瑞利相干光照明判据,显然数值孔径越大衍射极限分辨率越高。焦深决定了衍射极限下允许的刻蚀深度,数值孔径越小,焦深则越大。衍射极限分辨率和焦深是一对矛盾,同时衍射极限分辨率和刻蚀边缘垂直程度也是一对矛盾。

掩模板采用一般的镀铬石英片,在较高能量密度下铬膜会被激光剥离,阈值约 $100\text{mJ}/\text{cm}^2$,但由于物镜有 4 倍的缩小倍率,在样品表面的激光能量密度高于刻蚀阈值的同时,可保证镀铬掩模板表面的激光能量密度低于破坏阈值。实验中激光脉冲频率为 1Hz,以减小对掩模板的损坏。

2 实验结果和讨论

实验中采用的是一种溶于有机溶剂 PI,通过旋涂法在玻璃或石英基片上制备厚数微米(厚度通过基片转速来控制)的 PI 薄膜,然后在高温下处理数小时,使材料亚酰胺化。制备的 PI 薄膜表面非常平整,膜厚均匀,达到光学精度。PI 对石英、玻璃和硅等都具有良好的亲和力,制备的 PI 薄膜比较坚固,在激光辐照下不易被剥离。PI 是电子技术中常用的绝缘材料,具有良好的热稳定性和化学稳定性,可以承受 300 高温,不溶于酒精和丙酮。选用 PI 作为刻蚀样品的一个主要原因如前所述:PI 薄膜制备简单;PI 对 308nm 激光具有较大的吸收系数,能被刻蚀出光洁的表面和锐利的刻蚀边缘。

图 2 给出两张采用上述方法刻蚀出的微图案显微图,原始的镀铬掩模板为占空比 1:1 的振幅光栅

图案。如图 2a,当刻蚀线宽为 $10\mu\text{m}$ 时,占空比很好地保持了 1:1,刻蚀面也很光洁;而当刻蚀线宽为 $2.5\mu\text{m}$ 时,如图 2b,占空比变得略小于 1:1,这主要是受到光衍射和透镜像差的影响,由于成像透镜数值孔径较小,衍射极限分辨率约 $1.5\mu\text{m}$,因而在刻蚀 $2.5\mu\text{m}$ 以下的线条时衍射不能忽略。两张图中的刻蚀边缘都比较锐利,有较好的垂直度。

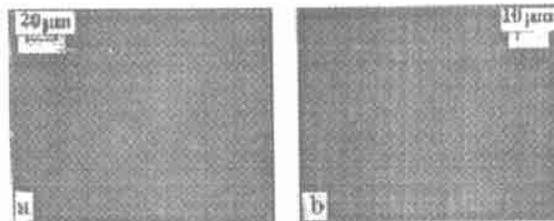


Fig. 2 Micrographs of patterns on PI etched by XeCl laser by projection

a—linewidth: $10\mu\text{m}$ b—linewidth: $2.5\mu\text{m}$

利用准分子激光进行刻蚀时,激光光子和由光能转换的热能都会引起 PI 材料的分解,分解产物主要包括 CO , CO_2 , C_2H_2 , C_2 , HCN , C_6H_6 等气态或固态物质。在刻蚀表面四周可以清楚地观察到一些黑色分解产物淀积,这些淀积物可以通过酒精等清洗掉。但在刻蚀表面基本观察不到淀积物,因此,分解产物的淀积对刻蚀性能影响不大。

投影法有较高的精度,但投影法要求定位精度高,防震要求高,并且难以实现套刻等工艺,因此,本实验研究了其它两种刻蚀方法,这两种方法借鉴光刻技术中的接触式光刻和接近式光刻:将掩模板紧贴 PI 膜或将掩模板接近 PI 膜(间隔约 $50\mu\text{m}$),镀铬的一面朝 PI 膜,将其置于图 2 中匀束器出口处,刻蚀图案显微图分别如图 3a、图 3b 所示。

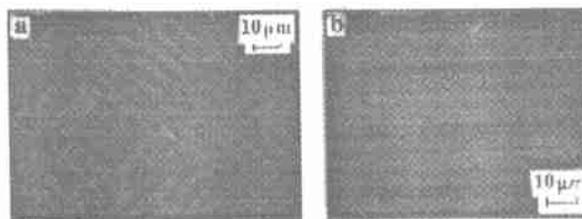


Fig. 3 Micrographs of patterns on PI etched by XeCl laser

a—contact b—near-contact

准分子激光器输出光斑为 $2\text{cm} \times 3\text{cm}$,聚光透镜 L_1 焦距为 30cm,因此,等效数值孔径约 0.05,等效焦深约为 $90\mu\text{m}$ 。对接触式刻蚀,其分辨率基本与激光衍射无关。如前所述,准分子激光刻蚀过程中有气态分解产物生成,分解产物要有空隙排出,故接触式刻蚀不适合刻蚀非常复杂的封闭图案。接触式刻蚀比其它刻蚀方法具有最干净的刻蚀和非刻蚀

表面。如图 3a,刻蚀边缘较锐利,有较好的垂直度。

对接近式刻蚀,主要受刻蚀光源发散的影响,在间距为 $50\mu\text{m}$ 时刻蚀极限分辨率约 $5\mu\text{m}$,如图 3b,“脊条”上可以观察到一些刻蚀的痕迹,刻蚀边缘有较好的垂直度。

接触式和接近式刻蚀结构和步骤简单,有较高的精度,并且对定位和防震基本没有要求。这两种方法最主要缺陷是所需的激光能量密度比投影法高,很容易造成掩模板的破坏,此外刻蚀产物会对掩模板产生污染。

193nm 准分子激光可精细刻蚀的材料种类比 308nm 激光多,我们利用 MPB 公司的 ASX-750 ArF (193nm,脉宽 17ns)激光对 PI,PC 和 PMMA 等聚合物进行刻蚀实验。结果表明,193nm 激光对上述 3 种聚合物都具有很好的刻蚀性能,刻蚀表面光洁度以及边缘锐利程度与 308nm 激光刻蚀 PI 相近,图 4 为 193nm 准分子激光刻蚀 PC 微图案显微图。

实验中测得:当能量密度为 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,308nm 激光对 PI 材料刻蚀速率为 $0.11\mu\text{m}/\text{pulse}$,

而 193nm 激光对 PMMA 刻蚀速率为 $0.4\mu\text{m}/\text{pulse}$,对 PI 和 PC 约 $0.07\mu\text{m}/\text{pulse}$ 。这些结果与他人实验吻合。

相比较离子束刻蚀,准分子激光刻蚀在横向分辨率上要低于前者,并且刻蚀边缘垂直度也不如前者,在深度精度上两者相近,而后者和前者相比有着极高的刻蚀速率。准分子激光刻蚀一般采用投影法进行,其优势是实验装置和刻蚀步骤都更简单,并且刻蚀速率高。

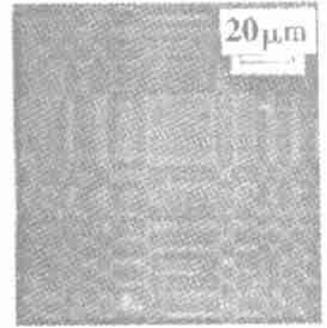


Fig. 4 Micrographs of patterns on PC etched by ArF laser

参考文献

- [1] Wang X M, Leger J R. Appl Opt, 1997, 36(20): 4660 ~ 4665.
- [2] Behrmann G P, Duignan M T. Appl Opt, 1997, 36(20): 4666 ~ 4674.

(上接第 85 页)

测器 PD1 将接受到一个频率为 $2 \times 94\text{Hz} = 188\text{Hz}$ 的信号,此时系统记录下光栅尺的输出作为系统的输出信号;当 G_1 的反射光谱的峰值点不与 G_1 的反射光谱的峰值点匹配时,如图 3 的位置 1 和位置 3, PD1 将接受到一个频率为 94Hz 的信号,此时电路将反馈给 PZT1 一个微小的直流电压,使 PZT1 伸长一点或缩短一点,使 G_1 的反射光谱的峰值点与 G_1 的反射光谱的峰值点匹配,系统记录下光栅尺的输出作为系统的输出。图 4 为测量结果示意图,光纤光栅的最大应变为 $2400\mu\text{strain}$,对测得点作最小二乘直线拟合,得此测量系统的灵敏度约为

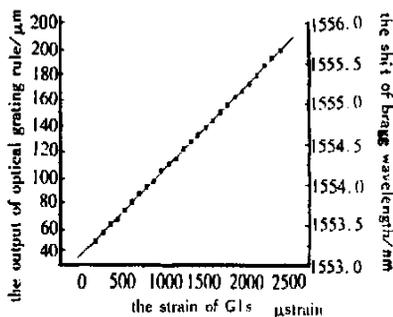


Fig. 4 The experimental results

the experiment result —the fitting line $Y = 38.1937 + 0.0666x$
 $R = 0.9998$

$0.07\mu\text{m}/\mu\text{strain}$,测得数据的线性相关性为 $R = 0.9998$ 。由此可见,此测量系统线性度非常高。

2 结论

提出并实验了一种探测光纤光栅传感网络的方法。该方法用抖动倍频的方法跟踪传感光纤光栅的反射波长,使对反射光谱的峰值点的对准精度提高 4 ~ 5 倍。同时,系统采用一个高分辨率的光栅尺作为系统读出设备,避免了用压电陶瓷的驱动电压作为系统的输出,使测量结果的直线相关性达 $R = 0.9998$ 。只要通过多路选择开关就可方便地进行多点传感的检测。

参考文献

- [1] Rao Y J. Meas Sci Technol, 1997, 8: 355 ~ 375.
- [2] 鲍吉龙,章献民,陈抗生 *et al.* 激光技术, 2000, 24(3): 174 ~ 179.
- [3] Zhang W G, Dong X Y, Feng D J *et al.* Electron Lett, 2000, 36(20): 28.
- [4] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Opt Lett, 1993, 18(16): 15.
- [5] Jackson D A, Ribeiro A B L, Reekie L *et al.* Opt Lett, 1993, 18(14): 15.