

文章编号: 0253-2239(2010)01-0206-04

亚微米线条的微纳光纤笔直写技术研究

田 丰 杨国光 白 剑 徐建锋 梁宜勇

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了一种利用微纳光纤笔(MNFP)直接写入亚微米线条的技术,利用微纳光纤笔在光刻胶表面接触式扫描,从而曝光产生亚微米线条。热熔拉伸和湿法刻蚀两步工艺相结合的新方法被用来制做微纳光纤笔。实验研究表明,直写分辨率可以达到稳定的 200 nm 线宽。这一分辨率已经突破了曝光波长(442 nm)的衍射极限。结果也显示了,通过改变光强,微纳光纤笔可以直写曝光出亚微米范围内宽度可变的线条。

关键词 光学制造;亚微米线条;直接写入;微纳光纤笔

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0206

Direct Writing of Submicron Lines Using the Micro-and Nanofiber Pens

Tian Feng Yang Guoguang Bai Jian Xu Jianfeng Liang Yiyong

(National Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A micro-and nanofiber pen (MNFP) direct writing technique for fabricating submicron lines is presented. Contact exposure is adopted during micro-and nanofiber pen scanning on the photoresist film. A two-step process for fabricating the sharp and short MNFP is established by flamed-heated drawing and wet etching. The MNFP direct writing experiments are performed. The resolution of 200 nm line width is obtained, which is thinner than half of exposure wavelength (442 nm). The experiment results also show that MNFP direct writing can provide various widths of line by changing the radiation power.

Key words optical fabrication; submicron lines; direct writing; micro-and nanofiber pens

1 引 言

目前,很多微纳结构的光学器件都是通过直写技术来制作,例如微结构偏振器^[1,2]、光子晶体^[3]、光纤布拉格光栅^[4]、微光机电系统^[5]等。常见的直写技术有激光直写^[6~9]、电子束直写^[10~13]和近场直写^[14,15]。激光直写稳定可靠,但是受衍射极限限制,分辨率很难达到亚微米量级。电子束直写可以实现小于 100 nm 的分辨率,但是它的设备昂贵,工艺复杂,应用受到限制。近场直写也可以实现高分辨率,但它的曝光量极小,写入速度很慢,曝光线条很浅。

微纳光纤是近年发展起来的一个崭新研究领

域,它的特点是极强的光场约束、低的传输损耗、高比例的倏逝场分量和场增强作用^[16~18]。所有这些特点对于曝光微纳图形都是十分有利的,基于此提出了全新的微纳光纤直写曝光技术。采用微纳光纤一端与光刻胶表面接触式的直接写入方法,光能量就像“墨水”一样被引入到光刻胶层,微纳光纤在光刻胶表面划过就会形成曝光痕迹,类似于用笔写字,所以这里所用的微纳光纤又称为微纳光纤笔。微纳光纤通常被用来制作微纳光子器件,与此不同,微纳光纤笔是一种截断式的微纳光纤,它的端部被用来作为亚波长尺寸的点源。已有文献分析了微纳光纤端面的光场分布^[19],这些结论对分析微纳光纤笔也

收稿日期: 2009-02-27; 收到修改稿日期: 2009-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(60778030,60678037)资助课题。

作者简介: 田 丰(1982—),男,博士研究生,主要从事微纳制造技术方面的研究。E-mail: eureka.tian@gmail.com

导师简介: 白 剑(1967—),男,博士,教授,主要从事二元光学、微光学、光电检测和全景成像等方面的研究。

E-mail: bai@zju.edu.cn

是有用的。

2 微纳光纤笔的制作

制作微纳光纤的最常用方法是将普通的单模光纤通过火焰来热熔拉伸^[14]，通常拉伸出的光纤直径在 $1\ \mu\text{m}$ 以下，长度较长而且直径均匀。但它在空气中会随意飘动，难以控制其位置，不适合用来进行直写曝光。而微纳光纤笔是一种直径渐变的截断式微纳光纤，它具有一定的刚性，可以不受空气扰动而保持静止状态，适合于直写定位。采用热熔拉伸和湿法刻蚀相结合的工艺来制作微纳光纤笔，如图 1 所示。第一步是热熔拉伸，如图 1(a)，将普通单模光纤置于酒精灯外焰，双手反向均匀施力拉伸，不要停顿直至拉断，力度要适中，使得最终形成的光纤锥端部直径在 $2\ \mu\text{m}$ 左右。第二步是湿法刻蚀，如图 1(b)，在塑料基片上滴一滴配制好的氢氟酸溶液 [质量比 $m(\text{HF}):m(\text{NH}_4\text{F}):m(\text{H}_2\text{O})=4:6:9$]，然后将第一步的光纤锥水平插入氢氟酸液滴，再滴一滴光刻胶覆盖住氢氟酸液滴，以保护光纤锥在溶液外的部分不被易挥发的氢氟酸所腐蚀。在显微镜下观察液滴中锥尖的被腐蚀状态，由于在两种溶液的交界区域 HF 的浓度渐变，所以形成的微纳光纤笔端部直径也是渐变的。经过 20 min 左右，刻蚀完成，形成的笔尖直径在 500 nm 以下。再经丙酮超声清洗，烘干，微纳光纤笔就制作完成。与近场扫描光学显微镜所用的光纤探针不同，微纳光纤笔的锥角很小，整根光纤有一定的弹性，直写过程中与基片表面接触时会产生形变而不会被撞坏。

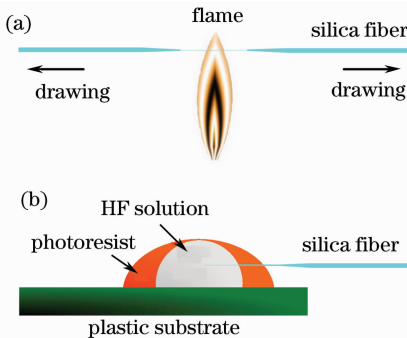


图 1 热熔拉伸(a)和湿法刻蚀(b)示意图

Fig. 1 Schematic of the flamed-heated drawing of a single-mode fiber (a) and the wet etching with HF acid solution (b)

3 直写实验

微纳光纤笔直写实验在自建的系统上进行，直写

原理如图 2 所示，采用微纳光纤笔在光刻胶表面接触式扫描曝光的方式。光刻胶经稀释后旋涂在硅基片上，所得胶层厚度在 200 nm 左右。涂胶后的基片被固定在 XYZ 三维电控平移台上。微纳光纤笔固定在基片上方，轴向与基片表面保持一个很小的倾角，为的是在二者接触后使得光纤笔产生的形变尽可能小。由于是倾斜放置，光纤笔头部的一段离光刻胶表面很近，但是光纤的粗糙度非常小，散射分量很少，所以光纤笔的未接触部分不会因光能量泄露而改变光刻线条。氦镭激光器(波长 442 nm)出射的激光经显微物镜耦合到光纤。声光调制器置于激光器出射端，以控制耦合光强。在显微物镜监控下，平移台沿 Z 轴向上移动直到笔尖与光刻胶表面相接触。完成对准后，平移台沿 Y 方向扫描，在这个过程中由于范德华力作用，笔尖始终与光刻胶表面接触。由此光能量被引入光刻胶层，形成曝光线条，由于微纳光纤笔对光的强约束作用，所以可以曝光出高分辨率的线条。与近场扫描光学显微镜的直写曝光相比，微纳光纤笔直写技术主要有三大优点：1)不需要精确控制探针和基片距离的装置，极大简化了系统；2)光纤笔的出射光强要远高于光纤探针，写入速度大大加快；3)扫描范围变得非常大。

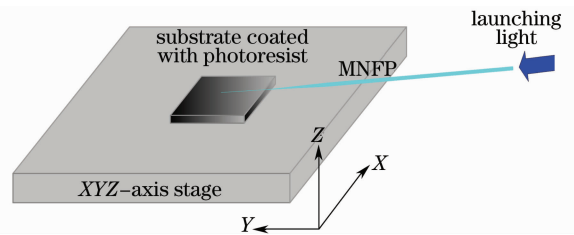


图 2 微纳光纤笔直写示意图

Fig. 2 Schematic of the micro-and nanofiber pen direct writing

4 实验结果

图 3 所示是用微纳光纤笔对两块基片进行直写曝光后的实验结果。实验所用的微纳光纤笔端部直径约为 100 nm，直写扫描速度均为 $10\ \mu\text{m}/\text{s}$ ，采用激光波长为 442 nm。第一块基片上线条的写入光强为 60 nW，获得的线宽约为 740 nm，深度为 100 nm，整条线均匀性好，其扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图 3(a) 所示。图 3(b) 是图 3(a) 的中间线条，图 3(c) 和图 3(d) 是图 3(a) 所示线条的原子力显微镜 (AFM) 测试结果。从图 3(d) 看出第三条线出现了明显的展宽，这是因为笔尖粘附了微小颗粒物产生散射的结果，所以保证基片表面的清洁是

很重要的。第二块基片上线条的写入光强为 30 nW, 获得的线宽约为 320 nm, 深度为 42 nm, 整组线条的均匀性和一致性较好, 其 SEM 照片如图 3(e) 所示。图 3(f) 是图 3(e) 的中间线条, 图 3(g) 和图 3(h) 是图 3(e) 所示线条的 AFM 测试结果。胶层表面的起伏也会对线条质量产生影响, 所以涂胶工艺要保证尽量小的表面粗糙度。

实验研究了不同的微纳光纤笔尖出射功率对直写线条宽度的影响。声光调制器用来调整功率大小。实验所获得的最细线宽为 200 nm, 如图 4(a) 所示, 对应曝光光强为 20 nW。不同功率对应直写线宽的关系曲线如图 4(b) 所示, 大功率对应宽线条, 小功率对应细线条, 而且近似成线性变化。

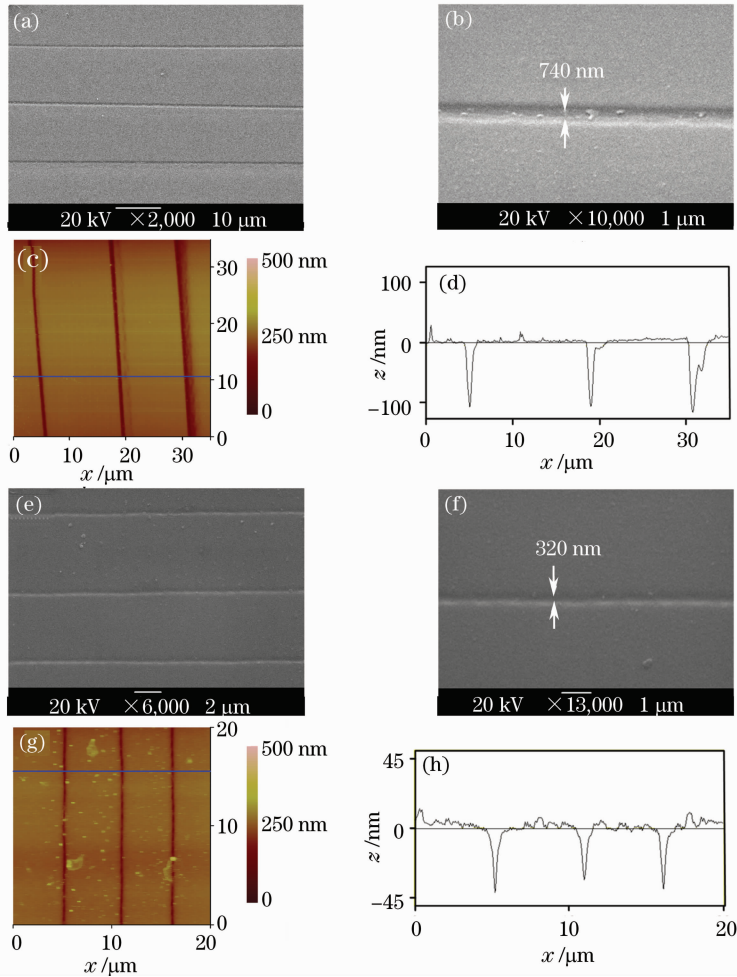


图 3 微纳光纤笔直写实验结果

Fig. 3 Experimental results of micro-and nanofiber pen direct writing

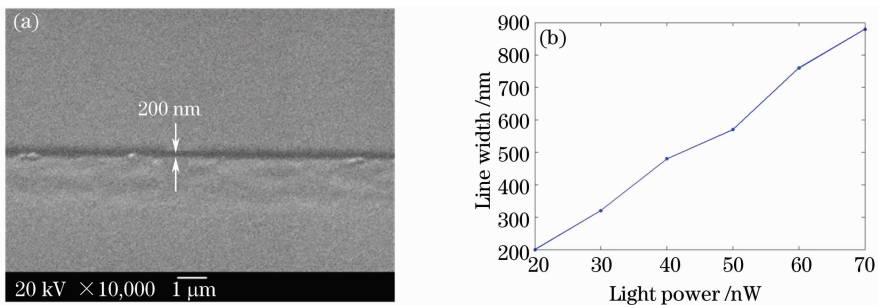


图 4 不同微纳光纤笔尖出射功率对直写线条宽度的影响

Fig. 4 Effect of different power radiated from micro-and nanofiber pen tip on the line widths

5 结 论

介绍了一种利用微纳光纤笔进行直写曝光的全新微纳加工技术。所用微纳光纤笔采用热熔拉伸和湿法刻蚀相结合的工艺。微纳光纤笔直写实验所获得的最高线条分辨率可达 200 nm,突破了光源波长(442 nm)的衍射极限。实验表明此项技术可以实现亚微米范围内宽度可变线条的直写曝光。此外,微纳光纤笔对光场的强约束力也可以使其在微纳探针传感、激光微纳捕获和微纳手术等领域有应用的可能。

参 考 文 献

- 1 H. Tamada, T. Doumuki, T. Yamaguchi *et al.*. Al wire-grid polarizer using the s-polarization resonance effect at the 0.8- μm -wavelength band[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6): 419~421
- 2 Zhang Liang, Li Chengfang, Liu Wen *et al.*. Development of broadband polarizing beam splitter/combiner[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1048~1052
张 亮, 李承芳, 刘 文等. 一种亚波长偏振分波/合波器的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1048~1052
- 3 Zhou Guangyong, Gu Min. Direct optical fabrication of three-dimensional photonic crystals in a high refractive index LiNbO_3 crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2783~2785
- 4 S. A. Slattery, D. N. Nikogosyan, G. Brambilla. Fiber Bragg grating inscription by high-intensity femtosecond UV laser light: comparison with other existing methods of fabrication[J]. *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.*, 2005, **22**(2): 354~361
- 5 H. C. Tapalian, J. Langseth, Y. Chen *et al.*. Ultrafast laser direct-write actuatable microstructures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 243304
- 6 D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, T. F. Deutsch. Laser chemical technique for rapid direct writing of surface relief in silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(12): 1018~1020
- 7 J. P. McDonald, V. R. Mistry, K. E. Ray *et al.*. Femtosecond pulsed laser direct write production of nano-and microfluidic channels[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 183113
- 8 H. B. Sun, S. Kawata. Two-photon laser precision microfabrication and its applications to micro-nano devices and systems[J]. *J. Lightwave Technology*, 2003, **21**(3): 624~633
- 9 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Shen Yan *et al.*. Design of laser direct writing system with changeable double or single beam optical head[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 487~491
陈林森, 解剑锋, 沈 雁等. 双、单光束互换光学头方光斑激光直写系统设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 487~491
- 10 S. Matsui, K. Mori. Direct writing onto Si by electron-beam stimulated etching[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(19): 1498~1499
- 11 L. E. Ocola, V. R. Tirumala. Nanofabrication of super-high-aspect-ratio structures in hydrogen silsesquioxane from direct-write e-beam lithography and hot development[J]. *J. Vacuum Science and Technology B*, 2008, **26**(6): 2632~2635
- 12 H. S. Sun, A. Chen, B. C. Olbricht *et al.*. Polarization selective electro-optic polymer waveguide devices by direct electron beam writing [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8472~8479
- 13 Li Yigui, Chen Di, Zhu Jun *et al.*. Sub-wavelength gratings based on a new microfabrication technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 1008~1010
李以贵, 陈 迪, 朱 军等. 基于一种新微细加工技术的亚波长光栅的研制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 1008~1010
- 14 T. Matsumoto, Y. Anzai, T. Shintani *et al.*. Writing 40 nm marks by using a beaked metallic plate near-field optical probe [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 259~261
- 15 I. I. Smolyaninov, D. L. Mazzoni, C. C. Davis. Near-field direct-write ultraviolet lithography and shear force microscopic studies of the lithographic process[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(26): 3859~3861
- 16 J. Bures, R. Ghosh. Power density of the evanescent field in the vicinity of a tapered fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. A-Optics Image Science and Vision*, 1999, **16**: 1992~1996
- 17 L. M. Tong, R. R. Gattass, J. B. Ashcom *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2006, **426**(): 816~819
- 18 L. M. Tong, J. Y. Lou, E. Mazur. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 1025~1035
- 19 Wang Shanshan, Fu Jian, Qiu Min *et al.*. Modeling endface output patterns of optical micro/nanofibers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8887~8895