

三维激光直写技术制备光学器件浅析

王娇

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要: 三维激光直写技术应用广泛, 其在微纳米光学器件上的应用更是备受瞩目。如何利用现有设备条件制备出精度更好, 品质更好的微纳光学器件也成为困扰设备用户的难点。简要分析如何降低德国 Nanoscribe 公司 Photonic Professional 型三维激光直写设备中椭圆形光斑对结构造成的影响及在特殊结构上制备复杂结构, 必将对各位同行相关研究的开展大有裨益。

关键词: 三维激光直写; 光学器件; 结构误差; 复杂结构

Example Analysis of Optical Device Preparation via 3D Laser Direct Writing Technology

Wang Jiao

(School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Three-dimensional laser direct writing technology has been widely used in several fields, and its application in micro-optics is particularly attractive. How to use the Nanoscribe equipment to prepare high-quality micro-optics devices with better accuracy has become one big challenge for the users. The discussing on reducing the influence of elliptical laser spots on final structures and preparing complex structures on special substrates via Photonic Professional type equipment will benefit the other researchers.

Keywords : Nanoscribe 3D Laser direct writing; Optical devices; Structure error; Complex Structure.

1 背景

微纳米结构的制备技术飞速发展, 为制备新型的微纳米光学传感器提供了更多更有效的技术手段。其中, 利用基于飞秒激光的双光子技术更是凭借其特有的制备精度高, 可实现三维复杂图形制备, 成为微纳米加工技术中的翘楚^[1]。不同的设备制造商, 开展了多种类型的, 基于激光技术开展的三维光科学技术。其中, 德国 Nanoscribe 公司的三维激光直写设备在微纳

米结构制备及其在生物，医疗，物理，半导体芯片等领域的非常优秀的科研成果而备受各领域科学家的青睐^[2,3]。

复旦大学信息科学与工程学院现有的一台德国 Nanoscribe 公司的三维激光直写设备是 Photonic Professional 型号。针对该设备在微纳光学器件开发上有很多应用，本文仅选取器件制备过程中相关的椭圆形激光光斑可能引起的图形偏差与在直径百微米的光纤顶端制备微纳器件结构两个案例展开粗浅讨论。希望通过这样的方式能够为更多相关领域的研究者提供更多有趣的思路^[4,5]。

2 设备简介

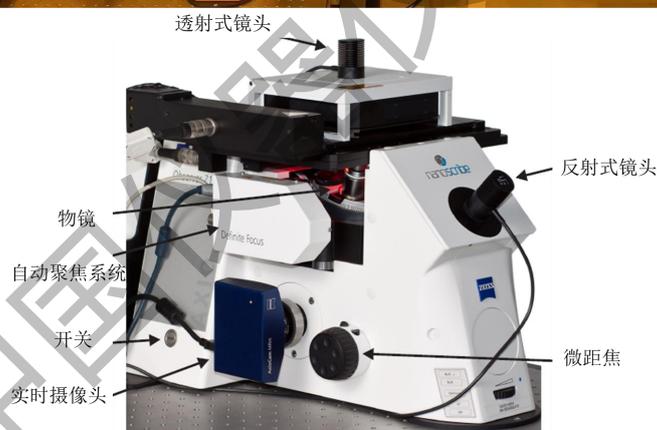


图1 实验室中 Nanoscribe 设备开机状态（上）具体关键部件[1, 2]（下）

三维激光直写技术是一种高精度、高效率、灵活、可靠和重复性高的先进微纳米制造技术，被广泛应用于微纳制造领域，如微电子、生物医学、光学等领域^[1]。实验室 Nanoscribe 公司 Photonic Professional 型激光器放置在黄光间，一般洁净度没有特别要求，如果器件目标器件对颗粒比较敏感，可以选择放置在洁净间的黄光间内。这台设备基于双光子飞秒激光的三维光刻设备具体配置及参数参看表 1。

该设备的优势：具有自动调节聚焦位置，现场刻写控制功能，简单易用，拥有直观用户界面，可通过程序文件对所有相关参数进行调节。由于该设备是厂商初代产品，制备样品依

靠压电台移动完成三维结构制备，导致样品成品速度慢，限制其即时应用，及时调整设计方案的可能。

表 1 Photonic Professional 型三维激光直写设备技术参数及配置

关键配置	技术参数
飞秒光纤激光器	脉宽 < 120fs; 重复率: 80MHz±1MHz, 平均功率 > 120mW, 中心波长: 780nm±10nm;
压电控制扫描工作台	范围: 100×130 mm, 写入范围 100×100 mm;
显微镜	蔡司油浸式接物镜(×100), 数字孔径: 1.4, 垂直方向工作距离: 170μm;
高分辨率显微镜照相机	分辨率: 1388(H)×1038(W)=1.4MPixel, 彩色, 4.65μm×4.65μm, 芯片尺寸: 1/2";
自调水平式防震台	对应 900×900mm 面包板;
样品架	10×30mmØ, 样品厚度: 170μm, 铝制, 阳极处理; 2 个打印头, SHR (取代单式打印头)
光刻胶	各类商用光刻胶及 IP-L 780; IP-G 780

3 微纳光学器件制备浅析

3.1 修正结构误差

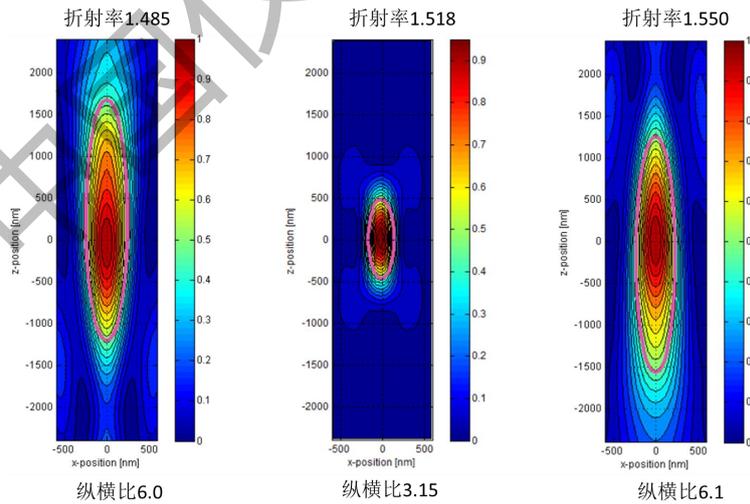


图 1 不同折射率光刻胶中，光斑的大小及纵横比 (z/x) [2]。

微纳米光学器件，对于几何结构的细微变化非常敏感。结构的精确度直接影响到最后器件的性能。Nanoscribe 三维激光直写用的飞秒激光器聚焦光斑在光刻胶承椭圆形（图 1）。

普遍情况下，聚焦光斑在 XY 方向上的精度高于 Z 方向，纵横比都显著大于 1。因此，在选用这一技术快速制备平行于衬底的管状微流道结构，光斑特性引起的最终结构与目标结构的偏差包括：（1）产生管壁厚度不均匀（图 2）；（2）实际制备的管状结构为椭圆形（图 2）；（3）实际结构表面非常粗糙的问题（如图 3 所示）。越是采用高纵横比的光刻胶制备的微纳结构，最终结构出现以上问题越突出，所以尽量选择低纵横比的光刻胶更有利于高品质的光学谐振器件的制备。针对光刻胶的选择，主要还是以最后器件性能最优为标准。

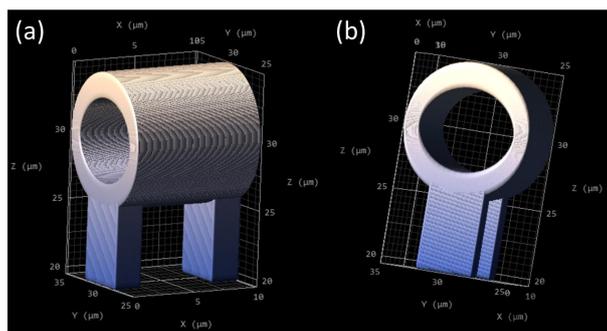


图 2 采用设备自带代码编写软件撰写代码获得平行衬底的管状结构

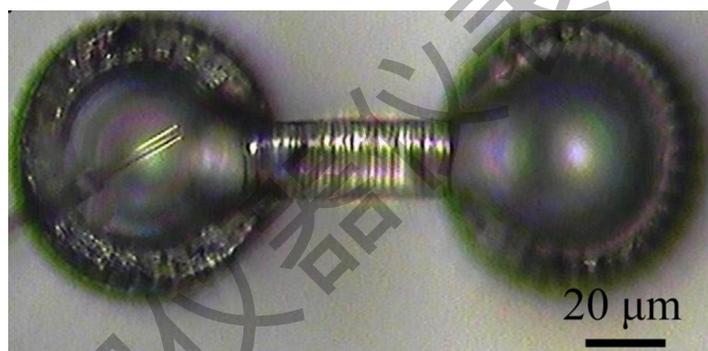


图 3 平行衬底的管状回音壁模式光学谐振腔光学显微镜下的表面粗糙

以上存在的问题势必对最终光学器件产生不良影响，造成不必要的光学损耗，信号噪声，甚至难以实现回音壁模式高品质光学谐振。为了避免（1-2）两个问题，实现器件 Z 方向上不存在尺寸差异，需要依据使用光刻胶的种类，光刻胶折射率的大小及激光能量大小在设计结构的过程通过修改结构参数进行适当的修正。为了避免（3）表面粗糙的问题，需要在光刻控制步骤尽量缩小直写步长有利于消除因椭圆形光斑引起的表面粗糙[3]。针对简单多边形几何结构组成的三维结构，尽量选择撰写脚本的方式控制激光直写过程，采用三维结构划分点的方法会加大粗糙度。

3.2 在光纤顶端完成复杂结构制备

三维激光直写技术理论上能够实现在各种类型衬底及结构表面上进一步完成结构制备的能力。但是为了实现这一目标，需要依据不同的衬底类型和现有设备的条件，有针对性的

对设备进行适当的改造。在相关研究进展过程中，需要在直径为 100 微米的光纤顶端制备一个复杂结构，实现光纤顶端制备磁场下热测试的探针。

为实现这样的制备，需要把原来配置的样品架进行重新设计调整成为能够只放置光纤夹具的样品架（图 4）。把原有的投射式摄像头（图 1）拆除，在设备上为光纤夹具（图 5）留出足够的空间。



图 4 设备自带的样品架（左）与自行设计制作的改造后样品架（右）



图 5 光纤夹具配件

经过这样的设备关键部件的改造，激光光束通过透镜聚焦到衬底上的情况发生重大变化（图 6）。在一般直写模式下（图 6a），设备垂直 z 方向上的工作距离为 170 微米（表 1）；在镜头浸入光刻胶的模式下（图 6b），垂直 z 方向上工作距离没有限制，可以做比较大型的三维结构；经过调整后，光纤顶端进行光刻的模式（图 6c）工作距离为光纤和衬底之间的距离，一般应该小于 170 微米，方便寻找衬底表面。相比于一般的激光直写（图 6a）与镜头浸入光刻胶（图 6b）两种情况，z 方向的工作距离严重受到限制，取决于光纤顶端与盖玻片的距离大小，不适合做大尺寸的样品。但是，为了解决这一问题。我们在光纤夹具上添

加了螺旋微调，方便调整光纤与盖玻片之间的距离。在样品制备过程中，需要耐心细致在反射式显微镜下寻找光纤，确定位置，完成相应的结构制备（图3）。

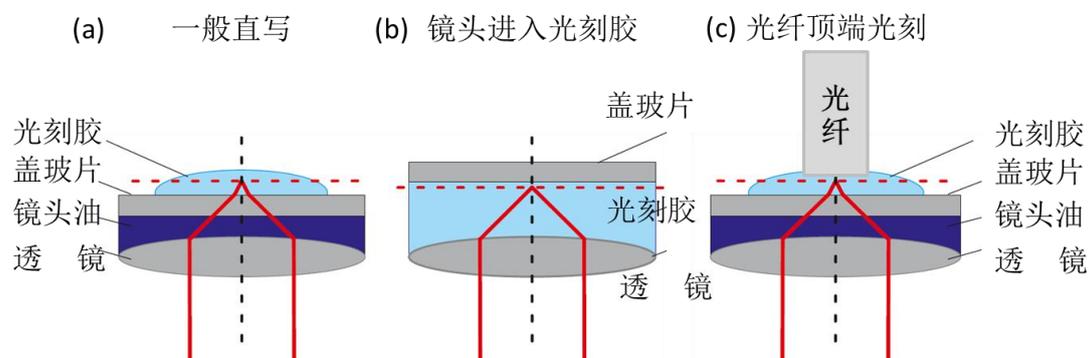


图6 (a)一般激光直写模式下激光光斑聚焦情况；(b)镜头进入光刻胶模式下激光光斑聚焦情况；(c)设备改造后光纤顶端制备复杂结构情况下激光光斑聚焦情况。红色虚线为光斑聚焦焦平面。

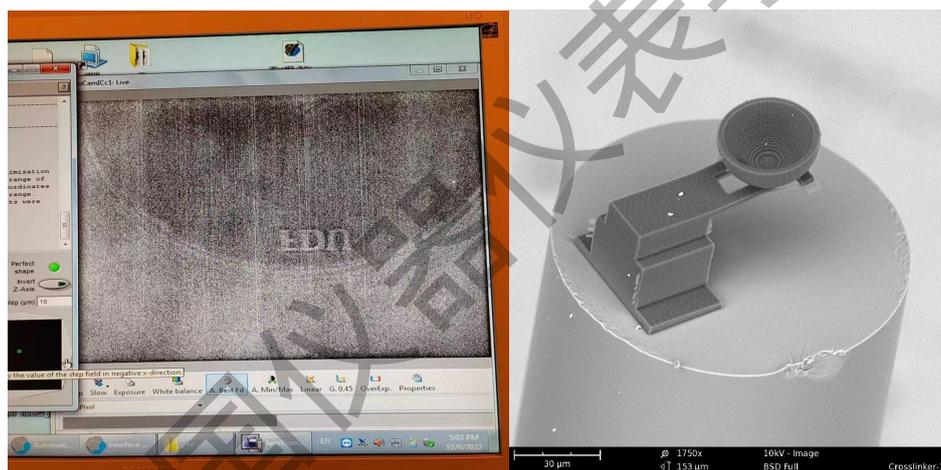


图3 实验过程中在光纤顶端直写出反向 FDU 字母（左）和在光纤顶端制备的特殊结构扫描电子显微镜图片（右）

4 结论

在利用最早一代的 Nanoscribe 设备实现更好的微纳米光学器件制备的过程中，势必会遇到很多问题，在开展实验的过程中，调整实验参数，完善结构设计，适当优化改装设备部件都是可行的途径。

参考文献：

- [1] 顾长志等编著，微纳加工及在纳米材料与器件研究中的应用[M]. 北京：科学出版社，2013: 97-110.

- [2] Justyna K, Gansel M T, Michael S, et al. Gold Helix Photonic Metamaterial as Broadband Circular Polarizer [J]. Science, 2009, 325(5947):1513-1515.
- [3] Gräfe D, Wickberg A, Zieger M M, et al. Adding chemically selective subtraction to multi-material 3D additive manufacturing. Nature Communication , 2018, 9:2788.
- [4] Li Y L, Fang Y F, Wang J, et al. Integrative optofluidic microcavity with tubular channels and coupled waveguides via two-photon polymerization [J]. Lab On A Chip, 2016,16(22).
- [5] Xiong C, Wang C Y, Ji W, Xiao L M. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature by using 3D printed multicore fiber-tip probes [C]//Asia Communications and Photonics Conference, Nov. 4-7, 2023, Wuhan, China. Accept.
- [6] Photonic Professional User Manual. Gemany: Nano Precision Corp.

中国仪器仪表表学