

文章编号 1004-924X(2003)03-0234-05

# 双光子三维微细加工技术及实验系统的开发

蒋中伟<sup>1</sup>, 袁大军<sup>1</sup>, 祝安定<sup>1</sup>, 夏安东<sup>1,2</sup>, 黄文浩<sup>1</sup>, 褚家如<sup>1</sup>, 刘允萍<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院 分子反应动力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:**介绍了一种新型的三维微细加工技术, 描述了自行开发的双光子微细加工实验系统。双光子三维微细加工技术利用材料与飞秒激光束在焦点局域发生的双光子激发, 通过逐点扫描, 实现微器件的三维成型。由于材料发生双光子激发的几率与激发光强的平方成正比, 所以具有极高瞬时光强的飞秒激光器和可以对光束进行强聚焦的显微镜装置成为系统的关键部件, 对此进行了详细的说明。最后, 给出了部分利用上述加工系统所获得的初步实验结果。

**关键词:**双光子激发; 光聚合; 飞秒激光器; 三维微器件

中图分类号: TG665 文献标识码: A

## 2-photon 3-D microfabrication technology and its experimental system

JIANG Zhong-wei<sup>1</sup>, YUAN Da-jun<sup>1</sup>, ZHU An-ding<sup>1</sup>, XIA An-dong<sup>1,2</sup>,  
HUANG Wen-hao<sup>1</sup>, CHU Jia-ru<sup>1</sup>, LIU Yun-ping<sup>1</sup>

(1. *Precise Machinery and Precise Instrument Department, USTC, Hefei 230026, China;*

2. *State Key Lab of Molecular Reaction Dynamics, CAS, Beijing 100080, China*)

**Abstract:** The 2-photon 3D microfabrication technology employs the 2-photon excitation locally induced between the femtosecond laser and the material to achieve 3D shaping through point to point scan. For the probability of two-photon excitation is in direct proportion to the squared intensity of laser, both the femtosecond laser with extremely high pulse intensity and the microscope with high numerical aperture become critical components in the system, and therefore much detail information is provided on this particular aspect. Some preliminary experimental results obtained with the machining system are presented as well.

**Key words:** two-photon excitation; photopolymerization; femtosecond laser; three-dimensional microdevice

## 1 引言

随着激光技术的飞速发展, 与之紧密相关的激光加工技术也取得了长足的进步。YAG 激光

器、CO<sub>2</sub> 激光器和准分子激光器都曾成功地应用于激光加工。飞秒钛宝石激光器进入了微细加工领域后, 推动激光加工技术进一步向三维微加工方向发展。

收稿日期: 2003-01-24; 修订日期: 2003-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50275140)

自 Rentzepis 小组将双光子技术应用于光学存储<sup>[1]</sup>以来, 双光子技术引起了世界范围内的广泛重视。1992 年 Webb 小组将双光子技术引入了微细加工领域<sup>[2]</sup>。传统的光刻技术, 如紫外光刻和 LIGA 工艺, 与双光子技术相比, 后者在微细加工方面有其独特的优势: (1) 一次性直接写入成型, 且整个加工过程中不需要牺牲层。(2) 柔性好, 加工的模型可以通过 CAD 软件直接生成。(3) 实现了真正的三维立体加工。因此, 它在光子器件 (photonic devices)<sup>[3-4]</sup>、微机电系统 (MEMS)<sup>[5-6]</sup> 的制作中已得到了广泛应用。在论述双光子微细加工技术的同时, 全面地介绍了自行开发的双光子微细加工系统, 并给出了已获得的初步实验结果。

## 2 双光子微细加工技术

光是一种电磁波, 当光通过介质时, 介质也会相应地产生极化。通常情况下, 由于激发光的强度相对较弱, 极化与电场强度的非线性关系表现得不明显。随着脉冲激光, 特别是超短脉冲激光的出现, 激发光与物质相互作用所表现出来的非线性现象也越来越明显。双光子吸收 (TPA) 作为一种非线性光学现象, 其激发原理如图 1 所示。在激发光两个光子 (也可以是两个不同频率的激发光) 的能量与物质从基态跃迁到激发态所需要的能量相当时, 双光子吸收就有可能发生。但是由于现有材料的双光子吸收截面 ( $\sigma^{(2)}$ ) 约为  $10^{-50} \text{ cm}^4/\text{photon}$  量级, 而单光子吸收 (SPA) 的吸收截面 ( $\sigma^{(1)}$ ) 通常为  $10^{-10} \text{ cm}^2$  量级, 因此发生双光子吸收的几率较小, 只有具备了很强的激发功率才能诱导材料发生显著双光子吸收。

飞秒激光作为一种新型的激发光源, 可以在很低的平均输出功率下实现很高的脉冲功率, 经放大后, 其脉冲功率甚至可达到 Gw 级。将飞秒激光技术引入到三维微细加工中实现材料的双光子吸收, 使这种新型的微细加工技术表现出了很多优良特性。由于材料发生双光子吸收的几率与激发光强度的平方成正比, 由双光子吸收引发的光化学反应将被局限在光强度很高的焦点周围极小的区域内 (体积的数量级为  $\lambda^3$ ,  $\lambda$  为入射激光的波长), 光束途经的其它部分几乎不受影响。由图 1 可知, 在该技术的实际应用时, 材料吸收峰频

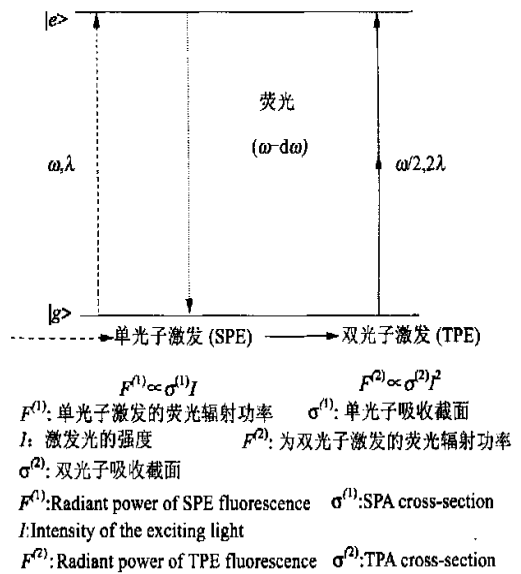


图 1 单光子吸收与双光子吸收

Fig. 1 Single photon absorption and two photon absorption

率应为入射飞秒激光频率的两倍, 且其吸收边界频率应明显大于入射激光频率。这样既保证了两个入射光子的能量与跃迁所需能量相当, 也使材料发生单光子吸收的几率变得极低。系统通过控制激光焦点在材料中各个方向的扫描运动, 可以实现高精度的三维成型。

双光子加工过程中只要精确地控制激光束焦点的扫描动作就可以实现对材料的“直接写入”, 从而快速地加工出预先设计的微器件。这同时也保证了双光子微细加工具有很强的柔性: 不需要对加工系统的结构做任何调整就可以通过改变 CAD 的设计模型实现新器件的加工。飞秒钛宝石激光器是双光子微细加工技术常用的激发源, 它的中心波长通常为 800 nm 左右, 这一波长的激光对材料优异的穿透性 (对常见的紫外光刻胶, 穿透深度大于 200  $\mu\text{m}$ ), 保证了系统工作时有较大的纵向加工深度, 同时也使多种通常用作紫外光刻的材料在双光子加工中得到应用。当然, 超短脉冲飞秒激光在其它材料的微细加工中也有广泛应用<sup>[4,7]</sup>。

## 3 双光子微细加工实验系统

激光双光子加工技术是一项集超快激光技术、显微镜技术、超高精度定位技术、CAD/CAM 技术以及光化学材料技术于一体的新型微细加工技术。本实验室结合在微纳米技术和显微镜技术

中已取得的研究成果<sup>[8,9]</sup>,自行开发了一套双光子微细加工实验系统。图 2 为该系统的结构示意图。从功能上划分,系统由以下四个部分组成:(1)飞秒激光源。它由泵浦激光源和飞秒超快谐振腔组成。(2)光束导向系统。其中包括对飞秒光束的滤光、衰减和扩束,最后通过一个大数值孔

径的物镜将激光束聚焦到样品中。加工光束的通断由光路中的光闸通过计算机控制来实现。(3)用于实现三维扫描的 PZT 移动平台。该平台动作由计算机控制,纳米级的移动精度保证了曝光点的准确定位。(4)实时监测部分。激光焦点处材料所发生的变化可通过 CCD 进行实时监测。

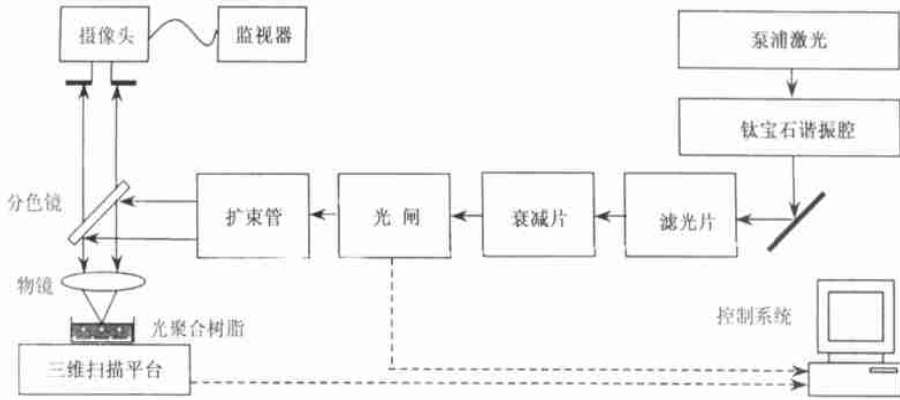


图 2 双光子微细加工实验系统示意图

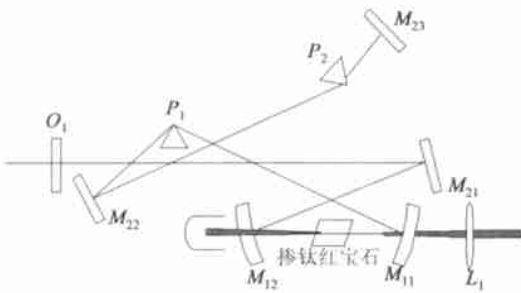
Fig. 2 Diagrammatic sketch of two-photon excited microfabrication experimental system

### 3.1 飞秒激光器系统

飞秒激光器是双光子微细加工系统的核心部件,飞秒激光器的光束质量及其工作的稳定性直接影响到加工系统的性能。图 3(a)中给出了自行设计的飞秒激光器谐振腔的元件布置图。该飞秒激光器是以二极管泵浦的固体激光器为超快泵浦源,泵浦激光为 532 nm 的连续光,超快部分的整体布置为 X 型谐振腔。在 4.5 W 的泵浦功率下,系统可输出 650 mW 连续的近红外激光。利

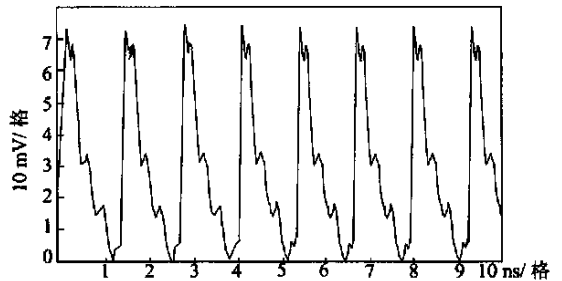
用 Ti 宝石晶体的光 Kerr 效应,使连续的红外激光发生自锁模,进而输出稳定的飞秒激光。图 3(b)所示为飞秒激光脉冲重复频率的测量结果,图中激光脉冲的周期为 12.5 ns,即 80 MHz。经测试,该激光器输出激光的脉宽为 80 fs,稳定输出功率 > 450 mW,激光中心波长 800 nm。

对于一些常见的紫外光刻胶,如:shipley 1830,进行双光子加工时对飞秒激光的输出功



(a) 飞秒激光谐振腔的布置图

(a) Arrangement plan of the resonant cavity of femtosecond laser



(b) 飞秒激光脉冲重复频率测量

(b) The measurement result of the repetition frequency of femtosecond pulse

图 3 飞秒激光器谐振腔的布置图及重复频率

Fig. 3 Arrangement plan and the repetition frequency of the femtosecond laser

率要求很低,通常物镜输出的平均功率仅为10~30 mW即可。此时,单脉冲的能量为1.25~3.75  $\times 10^{-10}$  J,而单脉冲所对应的瞬间功率则高达1.56~4.69 kW。在经过大数值孔径的物镜聚焦后(假设经聚焦后激光的束腰为 $1 \times 1 \mu\text{m}$ ),发生双光子吸收的焦点处的激光强度可达到100 GW/cm<sup>2</sup>以上。

### 3.2 激光共焦显微镜

激光共焦显微镜是以光学系统的共焦成像为基础,利用光扫描技术或样品扫描技术对样品进行三维动态测量的装置<sup>[8-9]</sup>。它利用激光作为光源,在光学设计时,采用共轭焦点(共焦)技术,使光源、被照物点和探测器处在彼此对应的共轭位置。光源经物镜在样品内聚焦成衍射极限的光点,其荧光(或反射光)再次通过物镜或聚光镜到达空间滤波器的共焦针孔内,由靠近针孔后面的探测接收器接受光信号,进而通过扫描聚光点在对样品进行三维成像。考虑到共焦显微镜的成像方式与双光子加工方式的相似之处,我们在研制完成了激光共焦显微镜的基础上,将飞秒激光引入到显微镜系统中。在共焦显微镜的设计过程中,我们在光学结构中采用了无限光学设计原则。因此,在物镜和管透镜之间的平行光路内,允许加入必要的附件而对焦点和像差校正产生很小的影响,这就为系统功能的调整和完善提供了极大的方便。另外,在实现了进行三维加工的同时,显微镜也对系统的加工过程(尤其是激光焦点附近)进行实时监控。

由于双光子加工材料的多样性,材料吸收双光子后,可能会发出荧光,但也有可能是发生了折变或相变,甚至是发生了微爆炸<sup>[7]</sup>。因此,我们在利用激发荧光进行观测的同时,也可利用显微镜照明灯的透射光来观察系统的工作情况。

### 3.3 其它重要部件

在双光子加工系统中,光路开关和三维移动平台也是很重要的。本系统中所使用的光路开关(shutter)是基于SGS6008振镜扫描器改装而成,它在系统光路中起通断光束的作用。由于双光子加工高精度、高速度的特点,系统对它的通断质量和频率都有很高的要求。经测试,该光路开关的通断位移 $> 2.5 \text{ mm}$ ,开启时间2 ms,斩断时间1 ms,这与系统的工作要求基本相符。三维移动平台在系统中可用作光点的三维扫描。因此,移动平台的工作精度、响应速度和线性范围的工作参数也需要着重考虑。在本系统中选用德国PI公司的P-537.CL纳米三维扫描台。它由PZT

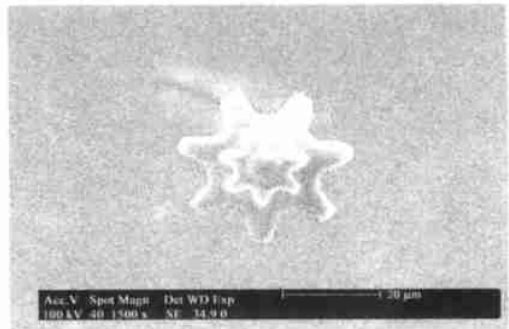
驱动,扫描范围 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ,在工作范围内,扫描台的闭环线性度为0.03%。经实际使用验证,该设备可较好地满足微细加工的要求。

### 3.4 软件控制系统

本系统的软件部分实际为一个CAD/CAM系统。从功能上来划分,包括图像处理部分、仿真部分和硬件控制部分。所要加工的三维微器件首先在Autocad平台进行图形设计,然后经过切片分割和离散等处理,随后存成dxf文件以便为图像处理部分读取。图像处理部分进一步对图像进行轮廓分析和实体填充,直至生成对应的硬件控制命令。考虑到双光子加工影响因素的多样性,软件允许根据实际加工条件进行多项参数的设置,可以分别对扫描方式、层叠方式、轨迹扫描顺序、扫描速度和扫描精度进行控制。同时系统还提供了仿真功能,它可模拟在实际的加工条件下进行加工,便于操作者及时发现器件设计中存在的缺陷。系统所生成的控制命令主要用于控制光路开关通断、PI纳米微动台的三维扫描,及两者之间的协调动作。

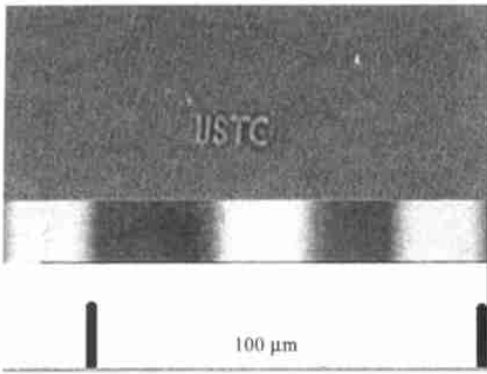
## 4 初步的实验结果

应用现已建立的双光子微细加工系统,已经得到了一些双光子加工三维微细结构。图4中给出了由紫外光刻胶经双光子聚合后形成的微器件和图形。图4(a)中双联齿轮所使用的材料为一种由聚氨酯丙烯酸酯单体/低聚物和紫外光引发剂的混合物构成的光刻胶,底部大齿轮外径为25  $\mu\text{m}$ ,小齿轮外径为15  $\mu\text{m}$ ,整个结构全高16  $\mu\text{m}$ 。图4(b)中的“USTC”图样由Shipley1830加工形成,整体字长18  $\mu\text{m}$ 。加工过程中具体的实验条件将在后续的文章中论述。另外,微器件的机械性能和其他力学性能还有待进一步测试。



(a) 双联齿轮的SEM照片

(a) SEM image of a duplicate gear



(b)“USTC”的 CCD 照片  
(b) CCD image of “USTC”

图 4 应用双光子微细加工系统所得的初步实验结果  
Fig. 4 Preliminary experimental results of the TPE microfabrication system

## 5 结 论

在建立了飞秒激光系统、共焦显微镜系统和其他重要部件后,已搭建起了一套用于双光子三维微细加工的系统。应用现有的紫外光刻胶材料,成功地加工出了多个三维微器件。今后的工作重点将是系统性能的完善和三维微器件的性能分析。

致谢:

感谢日本大阪大学孙宏波博士为我们提供的材料和研究过程中的帮助。感谢国家自然科学基金对我们研究工作的支持。

## 参考文献:

- [1] PARTHENOPOULOS D A, RENTZEPIS P M. Three dimensional optical storage memory[J]. *Science*, 1989, 245: 843-845.
- [2] WU E S, STRICKLER J, HARREL R, *et al*. Two photon lithography for microelectronic application[J]. *SPIE*, 1992, 1674: 776-782.
- [3] CUMPSTON B H. Two photo polymerization initiators for three dimensional optical data storage and microfabrication[J]. *Nature*, 1999, 398: 51-54.
- [4] SUN H B, NUSHII J J. Arbitrary lattice photonic crystals created by multiphoton microfabrication[J]. *Opt Lett*, 2001, (26)6: 325-327.
- [5] KAWATA S, SUN H B, TANAKA T, *et al*. Finer features for functional micro devices[J]. *Nature*, 2001, 412: 697-698.
- [6] LI CH D. Two photon microstructures polymerization initiated by a coumarin derivative of iodonium salt system[J]. *Chem Phy Lett*, 2001, 8: 304.
- [7] MARCINKEVICIUS A. Femtosecond laser assisted three dimensional microfabrication in silica[J]. *Opt Lett*, 2001, 26 (5): 277-279.
- [8] 陈荣刚, 沈建华, 黄文浩. 一种用于激光加工系统的智能化精密平台的研制[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(3): 304-306.  
CHEN R G, SHEN J H, HUANG W H. Design and manufacture of the intelligent precision platform for a laser processing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 277-279.
- [9] HERMAN B. 荧光显微镜[M]. 西安: 世界图书出版公司 西安公司, 2001. 15-37.  
HERMAN B. *Fluorescence microscope* [M]. Xi'an: World Publishing Corporation Xi'an, 2001. 15-37. (in Chinese)
- [10] 陈德强, 夏安东, 王克逸, 等. 双光子激光扫描荧光显微镜及其应用[J]. *物理*, 2000, 29(4): 232-236.  
CHEN D Q, XIA A D, WANG K Y, *et al*. Two photon laser scanning fluorescence microscopy and its application[J]. *Physics*, 2000, 29(4): 232-236. (in Chinese)

作者简介: 蒋中伟(1976-), 男, 江苏宜兴人, 1998年毕业于合肥工业大学机械系, 获工学学士学位, 2001年毕业于合肥工业大学机械学院, 获工学硕士学位, 现就读中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 博士研究生, 研究方向为激光双光子微细加工技术, E-mail: jiangzw@mail.ustc.edu.cn