

文章编号 1004-924X(2003)02-0125-05

基于原子力显微镜(AFM)的微加工系统

夏加飞,孙涛,闫永达,梁迎春,程凯,董申
(哈尔滨工业大学 精密工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:目前原子力显微镜(AFM)已经成为纳米加工领域中一种重要的加工手段,但由于其自身扫描陶瓷管及针尖等因素的影响,AFM的微加工能力在很大程度上受到限制。利用三维微动工作台结合原子力显微镜以及锋利的金刚石针尖组成微加工系统,通过编程获取微结构的轮廓,选择 RS-232 串口作为通讯方式,发送字符串命令控制工作台的运动实现预定的轨迹,从而消除了扫描陶瓷管运动范围有限且存在漂移和滞后的影响,解决了氮化硅和单晶硅针尖加工材料范围有限的问题,提升了 AFM 的加工能力,并加工出较为复杂的微结构及微传感器。实验表明这是一种可行的微加工方法。

关键词:AFM; 微加工; 串口通讯

中图分类号:TH742.9 **文献标识码:**A

Micro-machining system based on AFM

XIA Jia-fei, SUN Tao, YAN Yong-da, LIANG Ying-chun, CHENG Kai, DONG Shen
(Harbin Institute of Technology, Precision Engineering Research Institute, Harbin 150001, China)

Abstract: It is proposed to establish a micro-machining system with a three-dimension micro-displacement stage, an AFM system working in Contact and Height mode and a sharp diamond tip. A closed loop system is composed of the tip, the PSD, the feedback circuit, the scanning PZT, and the controller computer to keep the load force at the tip constant. A RS-232 serial port is used to perform the communication between a computer and the stage with programs provided to get the geometric locus of the microstructure, and then control the movement of the stage. Experimental results indicate that this system proposed is able to fabricate microstructures and parts, for example, micro sensors. The precision of their shape and dimension is mainly determined by the high precision stage. The depth can be changed by the load force of the tip or the feed of the stage. The working range of the AFM is therefore extended and almost any of the materials can be machined with this system. High precision and complex microstructures can be fabricated by optimizing the parameters.

Key words: AFM; micro machining; serial communication

1 引言

在过去的 10 年里纳米技术的发展引起了科研人员广泛的关注,纳米尺度超微细图形加工技术越来越受到重视,并成为制备纳米结构和器件

的关键^[1]。扫描探针显微技术以其固有的超高空间分辨能力、实时监控和加工能力在纳米加工领域取得了令人瞩目的进展。AFM 由于其不受材料限制,并具有原子级分辨能力,因此被作为一种重要的微加工工具,广泛应用于纳米技术的研究。

收稿日期:2002-10-12;修订日期:2003-01-18.

基金项目:863MEMS 专项基金(No. 2002AA404120),海外青年学者合作研究基金(No. 50028504)及航天支撑基金资助(No. 2001-HT-HGD)

目前国内外大部分基于针尖微加工的研究一般采用单晶硅或氮化硅针尖在聚合物或薄膜上进行机械刻划。德国学者 H. W. Schumacher 等人采用 AFM 在 GaAs/AlGaAs 异质结构表面进行机械刻划,使用非接触的硅探针加工出一个单控制门的单电子晶体管,该实验表明了采用基于 AFM 的机械刻划加工完全可以用于加工介观尺度的电子设备^[2];日本学者 Hideki, Atsushi 等人采用 AFM 在脂肪酸单分子层上,通过加大针尖与表面之间的作用力加工出纳米尺寸的矩形和圆,最小加工直径为 20 nm^[3];美国的 S. Cruchon-Dupeyrat 等人基于 SPM 系统,开发了一套自动矢量扫描 SPL,将其与计算机辅助设计(CAD)相连,采用氮化硅针尖进行机械刻蚀,这种系统可以实现复杂形状或结构纳米图形的加工^[4]。

以上研究中大都使用单晶硅或氮化硅针尖,因而限制了被加工材料的选择。金刚石针尖由于其具有极高的硬度和耐磨性,可以对非金属以及金属直接进行机械刻划,从根本上解决这一问题。另外在加工复杂图形时,采用 AFM 自身系统由于受扫描陶瓷管的局限,难以满足要求。为此,采用三维微动工作台与 AFM 系统相结合,利用金刚石针尖在镀铜的硅片上进行机械刻蚀,可以较好的解决上述问题,并且通过实验加工出较为复杂的微结构。

2 微加工系统原理及研制

AFM 对于表面成像而言,其作用力在纳牛顿级(10^{-9} N),所以不会导致被测表面的损伤。而

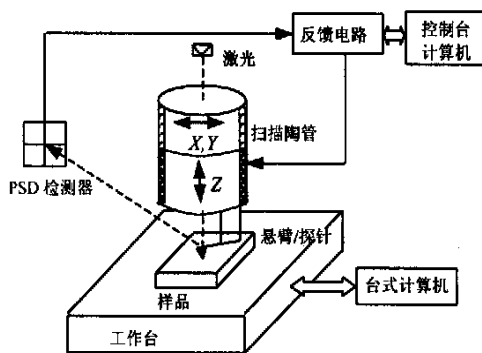


图 1 微加工系统原理图

Fig. 1 Block diagram of micro-machining system

对于把金刚石针尖模拟成一个尖锐的单点金刚石

车刀在样品表面进行切削加工时,这种作用力必须增加到基于样品材料特征及组织形态的某一阈值,从而足以破坏样品表面,达到微加工的目的,这也是微加工系统得以实现的重要前提。图 1 是微加工系统原理图。

该系统由原子力显微镜、三维微动工作台和台式计算机(用于串口通讯)等组成。加工过程中,工作台实现微量进给,保持针尖与样品表面作用力和切削速度的恒定,可以达到稳定的切削状态。系统可完成微小结构的加工,并利用 AFM 自身扫描成像系统进行在线检测,实现加工检测一体化。

系统中各部件的作用是:AFM 系统中金刚石针尖作为微加工工具,在样品表面进行刻蚀,反馈系统根据 PSD 位置敏感检测器监测结果,不断调整针尖位置;保持针尖—样品之间的作用力恒定;三维微动工作台完成样品在加工过程中的 X、Y、Z 三向微动进给,保证加工需要的尺寸精度和重复性精度;台式计算机提供使用者方便的操作界面,通过编程可以实现对工作台运动轨迹的控制。

2.1 AFM 系统参数的设定

本实验采用美国 DI 公司生产的 DimensionTM 3 100 系列 SPM,选用其中的接触模式 AFM。与通常所用的 AFM 成像功能不同,加工中针尖相对于样品的移动由微动工作台而不是由扫描陶瓷管自身偏移量来实现,所以扫描范围应设置为零。对于二维结构的加工,AFM 选取 Height 模式,即恒力模式,由针尖、PSD 检测器、反馈电路、扫描陶瓷管以及控制台计算机组成一个闭环回路,从而保证微悬臂变形量不变,使控制力恒定。控制台计算机设定积分和比例增益,接触模式一般设为 2.0 左右,参数 Setpoint 值(维持恒定力对应的电压值)根据需要设定,扫描频率一般设置为 1~2 Hz。

2.2 三维微动工作台工作原理

采用 PI 公司生产的高精度三维微动工作台,其 X、Y 和 Z 向移动范围分别为 100 μm 、100 μm 、20 μm 。X、Y 向重复性精度为 ± 5 nm, Z 向重复性精度为 ± 2 nm。该工作台控制箱由压电陶瓷驱动(PZT)放大器模块、伺服控制模块和显示/接口模块组成,可以选择不同模块实现不同功能。实验中选用电容传感器伺服控制模块、三通道低压压电陶瓷驱动放大器模块和含有 IEEE-488 及

RS-232 接口的显示模块。PZT 可通过面板上的电位器或外部控制信号来控制,本实验采用外部信号控制。电容传感器对压电陶瓷驱动器进行位置伺服控制,保证工作台运动精度。显示面板在线显示 PZT 的位置和输出电压,IEEE-488 以及 RS-232 串口用来接受外部计算机发送的标准的 SCPI 命令语言对工作台运动进行在线控制。因此在加工程序开始前,电容传感器伺服控制模块上所有伺服开关均应设置为 OFF,显示/接口模块的通讯方式在面板上选择,在线/离线模式由软件触发。此三维工作台的灵活性提供了应用上的多种选择,保证了系统的加工精度。

3 微加工系统软件设计

微动工作台的运行轨迹通过 RS-232 串口由编程控制,最终实现微结构的纳米尺度加工。软件采用模块化设计,每一模块实现一种微结构的加工功能,由使用者预先设定工作台的参数和被加工结构的特征参数。软件的主程序框图示于图 2,用户界面和数据处理部分均用 VC6.0 编制。

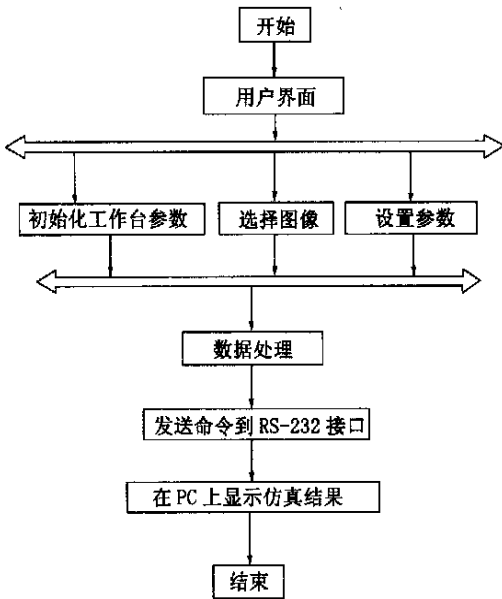


图 2 主程序框图

Fig. 2 Block diagram of softwares

3.1 软件通讯方式

软件的通讯方式采用 RS-232 串口通讯,利用 VC 中提供的 ActiveX 通讯控件 Microsoft Communication Control (简称 MScComm 控件)。这种

通讯方式可以自动捕获通讯过程中发生的各种事件和通讯错误,可以方便的选定进行串行通信的端口并进行初始化,因此被认为是处理串行端口数据交换的一种非常有效的处理方法^[5]。利用 ActiveX 通讯控件实现串行通讯的步骤为:

- (1) 嵌入通讯控件,初始化串口(配置通讯的波特率、缓冲区大小、数据位、停止位、奇偶校验位等参数);
- (2) 打开串行端口,发送字符串控制命令占用串口;
- (3) 关闭串口通讯资源。

因为受串口通讯的速度所限,实际加工中每传送一字符串,需在软件中设置延时,从而保证工作台有足够的时间响应接收的字符串命令。

3.2 微加工结构轮廓处理的基本算法

微加工结构轮廓提取根据材料去除方式的不同可以运用两种算法,以圆加工为例,可采用如图 3 所示两种加工方法。图(a)在样品表面加工出凹圆面,图(b)通过去除周围的材料在样品表面加工出凸圆面。

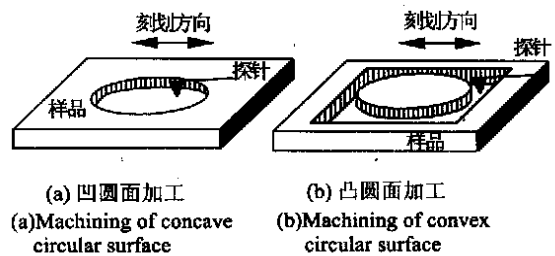


图 3 圆面的两种不同加工方法

Fig. 3 Two different methods to machine circular surface

编程过程中,采用拟合的方法,若加工对象由圆弧、二次曲线或高次曲线组成,可以采用一小段直线或高次曲线来拟合。具体步骤为选取一个方向作为进给方向,另一方向作扫描加工运动,设进给方向上各点坐标值为 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, K)$, 则由相应函数关系 $Y_i = g(X_i)$, 采用逐点运算的方法计算出待加工轮廓在另一方向上的坐标值 Y_i , 其中函数关系 $g(X_i)$ 由待加工轮廓曲线的特征确定。在选择步长时,需要考虑到针尖的刃口半径,尽量减少针尖对加工带来的影响。

这 2 种方法的优点在于使工作台可以通过简单的运动实现相对复杂的轨迹,完成较为复杂的结构和图形加工。因工作台精度很高,采用拟合的方法可以保证较高的尺寸精度。

4 实验结果与分析

利用所提供的微加工系统实际加工得到的结构如图 4、图 5 所示。样品材料为镀在硅片上的单晶铜薄膜,图 4 为采用上述两种不同方法加工出直径为 $7.5\ \mu\text{m}$ 的凸圆面和凹圆面,加工深度约为 $60\ \text{nm}$ 。图 5 为微加速度传感器典型结构,平面内形状尺寸为 $40\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m} \times 70\ \text{nm}$ 。

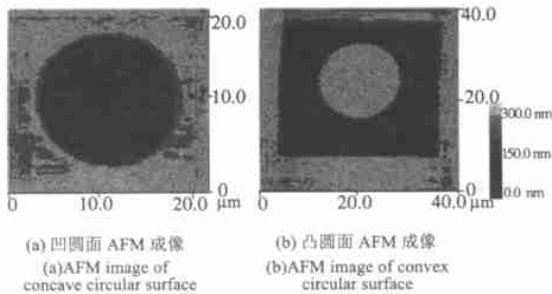


图 4 凹圆面和凸圆面的 AFM 成像

Fig. 4 AFM image of concave and convex circular surface

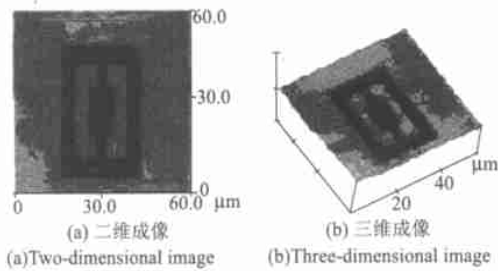


图 5 微传感器结构的 AFM 成像

Fig. 5 AFM image of micro sensor structure

由加工后测量所得到的 AFM 图像可以看出采用本系统加工出的微结构均具有很好的形状精度和尺寸精度。随加工过程中工作台进给量不同以及施加在金刚石针尖上载荷不同,加工所得深度也不同。进给量越小,加工深度越深;施加载荷越大,加工深度也越深。但进给量过小会影响加工的效率,同样载荷过大,对金刚石针尖影响也越大。因此应选择合适的工作台进给量和载荷。另外加工时产生的切屑以及环境(温度、振动等)都会对加工后的结果产生一定的影响。

5 结 论

该系统解决了 AFM 单独用于微加工时加工范围小且精度不高的问题,系统加工精度主要由工作台决定。由于金刚石针尖的高硬度及耐磨性,被加工样品材料根据不同使用目的可以是金属,也可以是半导体硅、锗、绝缘体玻璃、陶瓷等,因此所能加工材料的范围十分广泛。与传统的三束加工技术及 LIGA 技术等相比,这种基于 AFM 的刻蚀技术虽然存在加工效率低等问题,其优点在于:不受材料特性影响(其他如离子束加工时,存在材料对溅射率影响很大等问题),精度高,加工单个器件时相比上述方法成本低。因此该方法完全可用于单个原型、IC 模板以及微传感器等 MEMS 微小器件及微结构的加工,且通过优化 AFM 系统及工作台参数可获得令人满意的加工结果^[6]。

参考文献:

- [1] 陈海峰,宋家庆. 利用原子力显微镜在 Au-Pd 合金膜上制备纳米结构[J]. 科学通报, 1998, 43(18): 1950-1953. CHEN H F, SONG J Q. Fabrication of nanostructures on Au-Pd alloy film using atomic force microscopy[J]. *Science Report*, 1998, 43(18): 1950-1953. (in Chinese)
- [2] SCHUMACHER H W. Controlled mechanical AFM machining of two-dimensional electron systems: fabrication of a single-electron transistor[J]. *Physica E*, 2000, (6): 860-863.
- [3] SUGIHARA H, TAKAHARA A, KAJIYAMA T. Mechanical nanofabrication of lignoceric acid monolayer with atomic force microscopy[J]. *J Vac Sci Technol*, 2001, 19(2): 593-595.
- [4] CRUCHON-DUPEYRAT S, PORTHUN S, LIU G Y. Nanofabrication using computer-assisted design and automated vector scanning probe lithography[J]. *Applied Surface Science*, 2001, 175-176: 636-642.
- [5] 吕文哲. 用 Visual C++ 开发 Windows 环境下串行通信程序[J]. 电子技术应用, 1997, 23(8): 29-31.

LU W Z. Using Visual C++ to develop serial communication program under windows environment[J]. *Application of Electronic Technique*, 1997, 23(8): 29-31 (in Chinese)

[6] 孙立宁,陈立国,刘品宽,等. 微操作机器人显微视觉系统若干问题[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 171-175.

SUN L N, CHEN L G, LIU P K, *et al.* Some issues on the micro-vision system for a micromanipulation robot[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2): 171-175. (in Chinese)

作者简介:夏加飞(1980-),男,江苏南京人,现为哈尔滨工业大学机械制造及自动化专业硕士研究生,主要研究方向为:基于 AFM 的微系统及加工工艺与技术;
孙 涛(1964-),男,黑龙江佳木斯人,副研究员,哈尔滨工业大学精密工程研究所副所长,主要从事超精密加工及检测技术的研究。

《发光学报》(双月刊)

——物理学类;无线电电子学、电信技术类核心期刊

《发光学报》是中国物理学会发光分学会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分学会学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊,曾于 1992 年,1996 年和 2000 年连续三次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于 2000 年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年始;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(P)自 2000 年始已定期收录检索该刊论文。2001 年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”,首批进入“中国期刊方阵”。2002 年获中国科学院 2001~2002 年度科学出版基金“择重”资助。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为双月刊,大 16 开本,100 页,国内外公开发行。2003 年国内定价:12.00 元,全年 72 元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市人民大街 140 号

《发光学报》编辑部

邮 编:130022

电 话:(0431)5261594

E-mail:fgxb@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN22-1116/O4

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:8-173

国外发行代号:4863Q

http://www.ciom.ac.cn