

# 纳米级光学超精密加工技术

于劲 曹健林

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

纳米级光学超精密加工是软 X 射线光学和光电子学元件制备的重要基础技术之一。本文概述这一技术研究的主要内容并介绍近 10 年来特别是 80 年代后期在这一研究领域的最新进展, 例如单点金刚石车削、可延展磨削、浮法抛光以及离子束抛光等。超精密加工的最终目标是直接操纵原子, 本文还介绍了用扫描隧道显微镜 (STM) 实现亚纳米级超精密加工的可能性。亚纳米级超精密加工技术将成为下个世纪重要的高技术。

## Abstract

The past decade has seen rapid progress in nano scale optical superprecision machining, a basic technology of great importance for the fabrication of soft X-ray and photoelectronic optical components. We present the latest advances in this field, including single point diamond turning, ductile grinding, float polishing and ion beam polishing. In addition, we discuss the possibility of using the scanning tunneling microscope in sub-nano superprecision machining, to achieve the ultimate goal of moving atoms or molecules directly. Sub-nano superprecision machining will become one of the major high technologies of the next century.

## 一、纳米级光学超精密加工

加工技术是时代科技发展水平的一个重要标志。按其所能达到的加工界限, 加工技术分为普通加工、精密加工、高精密加工以及超精密加工。何谓超精密加工, 这一概念在加工工艺发展的不同历史阶段有着不同的划分标准。一般地说, 将能达到时代最高加工界限的加工称为超精密加工。图 1 是本世纪各类加工技术加工界限的发展概况。目前所能实现的最高加工界限已达到纳米( $10^{-9}\text{m}$ )量级, 因此当今的超精密加工技术也被称为纳米加工技术。

与一定的精密程度联系着的加工界限一般称为几何精度。这种几何精度包含两个量: 其一是形状精度; 其二是表面粗糙度。图 1 中的加工界限指的是形状精度。至于表面粗糙度, 目前人们已可将某些材料(例如单晶硅)加工到均方根粗糙度  $\sigma \leq 0.1\text{nm}$ 。

精密光学元件的制造一直是超精密加工技术的重要应用领域。近十几年来, 随着光学研

究的深入和光电子学产业的兴起, 掌握纳米级光学超精密加工技术的重要性显得越来越突出。例如, 目前各主要发达国家都在致力于将成像光学研究推向软 X 射线波段(波长为 1—30nm), 力争在该波段研制出具有高分辨率、高成像质量的显微镜、望远镜以及投影光刻机等。由于该波段的光学系统只能由反射型元件组成, 如何提高元件的反射率至今仍是软 X 射线成像光学研究的核心<sup>[1]</sup>。根据简单的标量散射理论, 表面粗糙度引起的光散射所造成的光强反射率降低可以表示为

$$R' = R_0 \exp[-2(2\pi\sigma \cos\theta/\lambda)^2], \quad (1)$$

式中  $R'$  为实际表面的反射率,  $R_0$  为理想表面(表面粗糙度为 0)的反射率,  $\sigma$  为表面粗糙度的均方根值 (rms),  $\theta$  为入射角,  $\lambda$  为入射光波长。按通常光滑表面的要求,  $\sigma/\lambda$  要小于 0.1。对于  $\lambda = 10\text{nm}$  的软 X 射线, 这就要求  $\sigma$  小于 1nm。目前人们用于研制 X 射线光学元件的超光滑基板可加工到  $\sigma < 0.5\text{nm}$ 。

纳米级光学超精密加工技术的另一方面重要应用是光电子学产业中的光盘、磁盘、磁鼓和

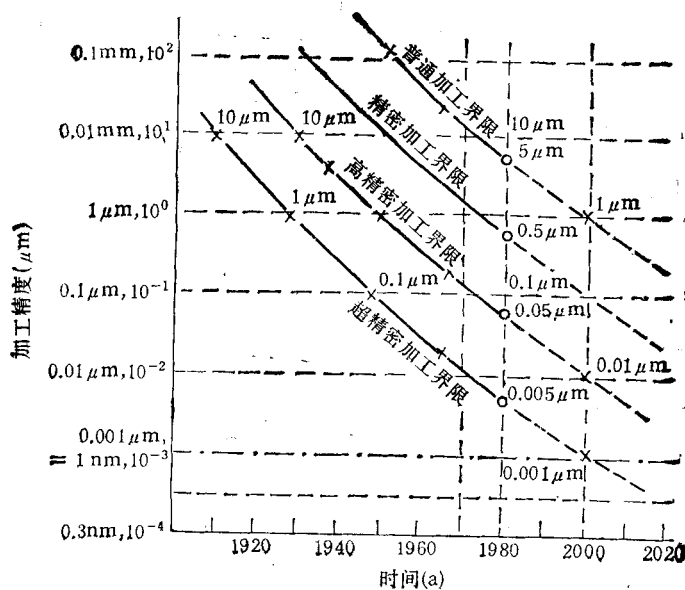


图1 各类加工技术的发展概况

磁头等记录存储元件的加工。随着存储密度的提高，这类元件的工作表面粗糙度必须是纳米甚至是亚纳米量级。谁掌握了高效率的超精密加工技术，谁的产品就能占领市场，获取巨额利润。因此，全世界所有光电子学大公司都在全力发展超精密加工技术，并且对已掌握的技术作为赖以生存的基础进行严格控制。

## 二、纳米级光学超精密加工的主要研究内容

### 1. 提高加工精度和减小随机误差

(1) 缩小基本加工单位，使加工的最小去除量降到纳米级或者更小。基于这一思路，人们已发展了许多非固体刀具加工方法。三束（电子束、离子束、光束）加工是其典型代表。

(2) 提高所有运动装置的刚性（特别是工具台、加工台和夹具等），使其变形、磨损、摩擦、冲击、振动以及运动间隙等极小化。

(3) 采用高分辨率和高重复性的微细运动装置或元件，使工具、加工台以及夹具等运动机构的位置和运动能够精密控制。

(4) 提高固体加工刀具的锐利程度（例如金刚石车刀的刀尖半径应小到 nm 量级），同时还要确保刀具的硬度，使得在加工过程中刀具

的磨损可以忽略。

(5) 提高被加工材料的均匀性，使材料单晶化或非晶化。

(6) 尽量使加工过程自动化和程序化，减少操作者介入引起的随机误差。

(7) 改善加工环境，提供严格的环境保证，如严格控制温度、湿度、气压以及采取除尘、隔振等措施。

### 2. 降低系统误差

(1) 使加工中有相对运动的机构都具有误差补偿功能，其最小可调量至少应做到 10nm。

(2) 开发分辨率至少比所要求的加工精度高一个数量级的测量装置以及具有快速响应和高可靠性的反馈控制装置。

(3) 对产品进行严格的检查，对加工过程进行严格的质量管理。检测仪器的分辨率至少应比加工精度高一个数量级。

### 3. 开发适于超精密加工的新装置、新方法和新系统

(1) 利用边界元法和有限元法等对加工过程进行数学模拟和解析，加深对超精密加工过程的理解和认识。

(2) 开发具有高效率、高精度、高刚度、高可靠性以及能加工各种复杂几何曲面的加工装

置。

(3) 对于非固体工具加工,在目前依靠模具和掩膜成型的基础上开发出能够直接进行测量控制的加工方法。

(4) 开发能够自己建立超高精度基准面的自动加工方法。

(5) 开发用于制造超精密加工设备和工具的高刚性、高耐磨性以及低的热变性材料。

(6) 为了使超精密加工产品能适应市场需要,对加工系统、测量系统、控制系统以及检测系统进行综合开发和改进,其核心是提高效率和降低成本。

### 三、几种有代表性的加工方法

#### 1. 超精密切削

超精密切削起源于 50 年代末或 60 年代初受美国国家宇航局(NASA)和美国能源部支持的研究工作。目前,以单点金刚石车削(single point diamond turning, 简称 SPDT)为代表的该项技术已发展得相当成熟,美国、日本、英国、原联邦德国和荷兰的许多国家实验室和公司都研制了 SPDT 设备,一些公司还推出了商品。

典型的 SPDT 设备由以下几部分组成:(1) 刃口半径可小到 20nm 的单结晶金刚石刀具;(2) 主轴采用高精度、高刚性的静压油轴承或气浮轴承,并配有压电式微位移机构,可以实现纳米级微位移;(3) 用计算机数字控制(CNC)来确定运动机构的位置和运动;(4) 由激光干涉测长仪实时测量运动机构的位置并将其结果反馈给运动控制机构,作误差修正和补偿;(5) 严格控制温度、湿度以及采取防尘、除尖等措施。

目前的 SPDT 主要用于直接车削出红外光学元件,例如激光反射镜(平面、球面和非球面)、多面棱镜以及用于铸塑生产光学元件的铸模等。加工材料为无氧铜、电解镍和铝,加工的面型精度已达到几十纳米量级,表面粗糙度 $\sigma$ 可接近 1nm<sup>[2]</sup>。此外,还可加工锗、铌酸锂和 KDP 等软晶体。

1986 年,美国和日本联合进行一项题为

“超精密切削加工极限”的研究,结果表明:SPDT 原则上可以实现纳米甚至亚纳米级的稳定切削。这已经极其接近理论上的最小切削极限——单层剥离原子。据推算,这时的刀具刃口半径应为 2—3nm。

#### 2. 延展性磨削

目前,SPDT 的最大局限性在于只能加工软金属和软晶体,而制作光学元件需要大量使用光学玻璃和熔石英玻璃等硬脆材料。研究结果表明,即使是硬脆材料,当切削深度很小时,材料脆裂所需之能量大于使其塑性变形所需之能量,因此可以在材料脆裂之前进行塑性加工。据此,在保证微小进给量前提下人们发展了金刚石砂轮直接磨削玻璃和陶瓷等脆硬材料的延展性磨削(ductile grinding)加工方法。

图 2 是日本中部大学工学部和丰田精机公司联合开发的一台超精密立轴圆台平面磨床示意图<sup>[3]</sup>。其中的关键部件是零热膨胀系数玻璃陶瓷主轴,它使用静压油轴承,旋转工作台具有大刚度和高的振动吸收率以及高旋转精度。采用零热膨胀系数玻璃陶瓷高精度主轴解决了通常难以避免的主轴热变形问题。这种玻璃陶瓷由日本电气硝子株式会社生产,它在 30—750℃ 温度范围内测定的线膨胀系数为  $-1.2 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 。其主要成分是硅砂,是陶瓷中比较容易加工的一种材料。但性脆,加工中容易产生裂纹,粗加工效率极低。为此,他们采取的办法是:先把材料加热到 1700℃ 熔化后,用金属浇注成成型毛坯,以减少磨削余量。然后用金刚石砂轮和金刚石空心钻通过粗磨、钻孔、半精磨、精磨和超精密加工等,使主轴圆度达 0.2  $\mu\text{m}$ 。主轴安装到磨床上后,回转轴向跳动在 0.05  $\mu\text{m}$  以内。主轴和工作台的运动全部采用 CNC 控制。加工结果表明,BK-7 光学玻璃经过一次磨削,表面粗糙度可达到 2.2  $\text{\AA}$ (rms),见图 3。目前,美国和日本都在花气力研制非球面延展性磨削 CNC 机床。据国外科学家预测,可延展性磨削不仅会在非球面镜加工和玻璃模具制造方面占主导地位,而且在 nm 量级半导体材料加工方面的发展中将开创新纪元。

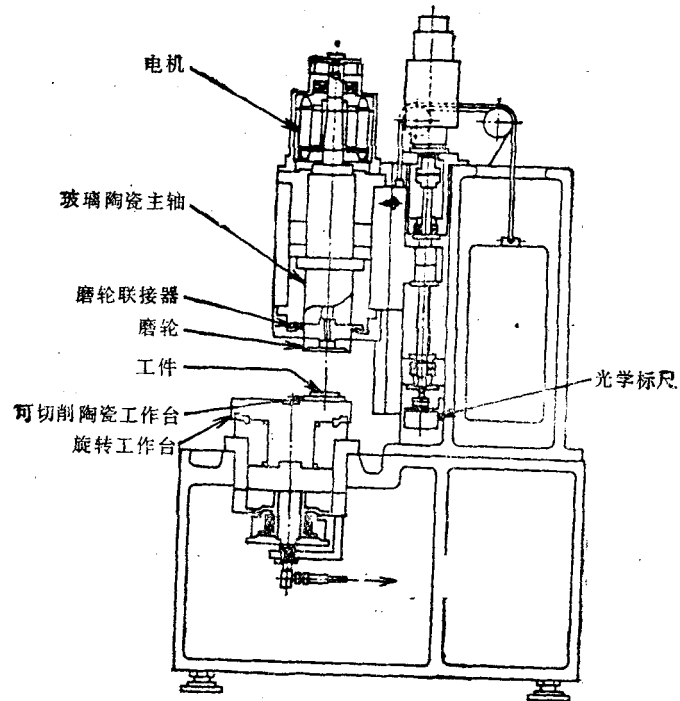


图2 可延展性磨床结构图

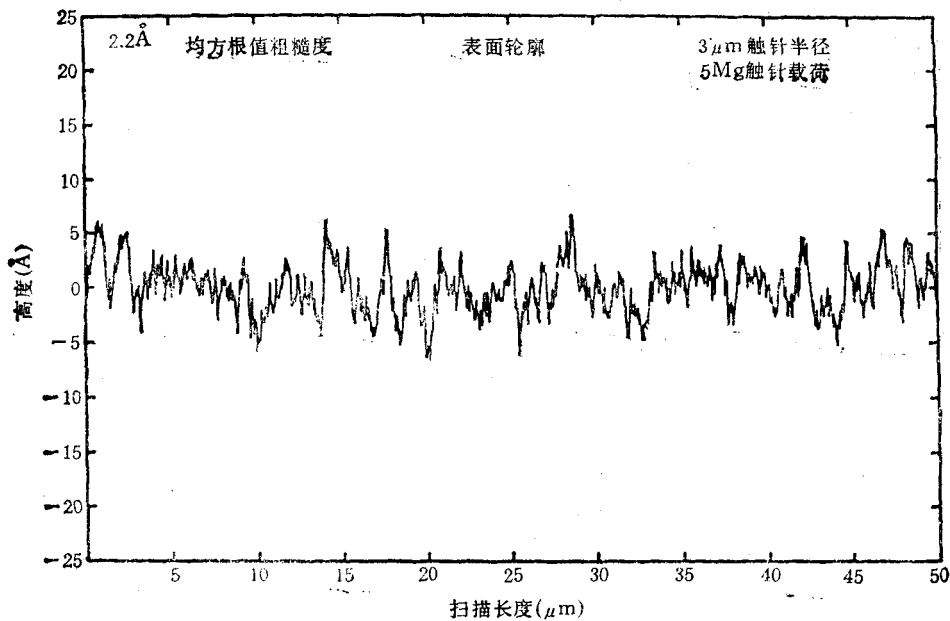


图3 磨削 BK-7 玻璃所得到的表面粗糙度结果

### 3. 浮法抛光

长期以来传统的研磨抛光方法一直是光学元件加工的主要手段。这类加工方法的主要优点在于可以用相对简单的加工工具（模盘和磨

料等）并借助于操作者长期积累的经验，加工出远高于加工工具精度的产品。然而，传统研磨抛光的效率太低，一个超光滑表面往往要经过数百甚至数千个小时的加工。

在对传统研磨抛光进行改进的研究中, 浮法抛光 (float polishing) 是较为成功的一种。1977年, Namba 首次报道了用  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磨粒 ( $4\sim 7\mu\text{m}$ ) 水溶液 (去离子水) 在金刚石车削的锡盘上研磨蓝宝石晶体。磨粒含量为  $2\sim 8\% \text{m/V}$ 。实验结果表明, 用这种方法可以稳定获得  $1\text{nm}(\text{rms})$  或更小的表面粗糙度, 去除率为  $1 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{s}$ 。这种方法被 Namba 称之为浮法抛光<sup>[4]</sup>。浮法抛光的特色是 (见图 4): 使用较硬的锡抛光盘取代传统抛光法中的

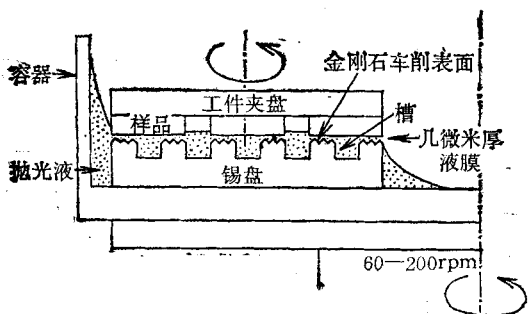


图 4 浮法抛光原理

沥青或合成材料; 利用悬浮抛光液使工件表面与抛光盘之间保持一个比磨粒度大几倍的流动间隙; 两者之间的相对速度非常高, 约为  $1.5\sim 2.5\text{m/s}$ ; 两者之间的压力在  $70\sim 500\text{Pa}$  之间, 约为沥青抛光通常使用压力的 10 倍。用这种方法抛光 304 不锈钢得到  $2\text{nm}(\text{rms})$  的表面粗糙度 (使用  $\text{MgO}$  粉)<sup>[5]</sup>。将浮法抛光应用于光学材料 (包括光学玻璃、石英玻璃和低膨胀合成非晶玻璃), 可以抛光到表面粗糙度为  $0.2\text{nm}(\text{rms})$ <sup>[6]</sup>。浮法抛光还可用于加工磁锌铁氧体 (manganese-zinc ferrites), 磨料使用金刚石,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  以及  $\text{MgO}$ 。这种磁锌铁氧体广泛用作计算机和磁带录音机的磁头, 目前日本的光电子企业有十几台这样的浮法抛光机在工作, 每周能加工数百万个, 效率极高。

#### 4. 离子束抛光

离子束抛光是一种以溅射现象为基础, 用离子轰击来微量去除表面材料的超精密加工方法。从 60 年代起, 人们就开始尝试用这种方法来加工光学表面。70 年代后期, 美国的军工企

业还研制了专门用于光学元件进行最后加工和修琢的大型离子束抛光设备。

离子束抛光不仅可以减小表面粗糙度, 还可以清除表面污染、消除表面内应力以及改善表面的微观结构等。因此, 近年来这种方法被广泛用于光学镀膜行业, 作为提高薄膜质量的一个重要手段。例如, 美国 IBM 公司 E.Spiller 的研究表明, 离子束抛光可有效地减少多层膜反射界面之间的表面粗糙度。对于 RhRu-C 膜系,  $\sigma$  从  $0.95\text{nm}$  降到  $0.63\text{nm}$ ; 对于 Co-C 膜系,  $\sigma$  从  $0.75\text{nm}$  降到  $0.46\text{nm}$ 。对于  $\lambda = 63.5\text{\AA}$  和  $\lambda = 114\text{\AA}$  这两种情况, RhRu-C 和 Co-C 多层膜, 其反射率均能提高 1 倍<sup>[7]</sup>。显然, 这一方法对于 X 射线多层膜元件 (X 光学中的核心元件) 的制备很有好处。

#### 5. 用 STM 实现亚纳米量级加工

超精密加工的最高境界是“移动原子”, 但是要抓住原子并非易事。然而在 1989 年 11 月, 青年物理学家 Eigler 不仅成功地移动了单个原子, 而且还使它们乖乖地排成队。Eigler 所用的工具是 STM, STM 是 1986 年诺贝尔物理奖获奖项目。至此, STM 不仅实现了人类长期以来希望看到原子真面目的愿望, 而且成为一个可排布原子的工具, 并可推动整个纳米科学技术的发展。Eigler 用 STM 的探针接近单个原子, 并使其移动, 使原子重新定位, 一个挨着一个。经过历时 5 年的研究, Eigler 终于用 35 个氩原子拼出了“IBM”的字样, 字母的大小是一个标点符号的 50 万分之一<sup>[8]</sup>。最近, 日本电气公司用半导体材料硅制成超微“金字塔”, 高度仅有 36 个原子高, 有 18 级台阶, 每阶 2 个原子高。这是世界上首次用 STM 将原子排成立体形状。虽然要预测科学家和工业界如何使用这一技术还为时过早, 然而我们相信, 这种能使原子移动的能力在不远的将来会产生新一代亚纳米量级超精密加工技术。

#### 四、国内发展情况简介

随着我国经济建设的迅猛发展, 国内目前已有许多单位致力于超精密加工技术的研究,

并取得了成果。

中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室近年来一直开展 SPDT 的研究,并在金刚石刀具制作、超精密切削机理和材料处理等许多方面都做了探讨。目前该实验室加工软金属面型精度可优于  $1\mu\text{m}$ ,表面粗糙度  $\sigma$  为  $10\text{nm}(\text{rms})$  左右。此外,哈尔滨工业大学、吉林工业大学和中国科技大学等单位也在做与 SPDT 相关的技术研究。机械电子工业部北京机床研究所已研制出 JCS-027 超精密球面车床,该机床采用空气静压主轴和静压导轨,主轴回转误差径向为  $0.025\mu\text{m}$ ,轴向为  $0.02\mu\text{m}$ ,刚度达到  $50\text{kg}/\mu\text{m}$ ,滑板运动平直度为  $0.13\mu\text{m}/400\text{mm}$ ,加工零件的表面粗糙度算术平均值  $R_a < 0.01\mu\text{m}$ 。这些指标已经接近世界先进水平。

在超精密研磨抛光方面,中国科学院长春光学精密机械研究所用传统抛光方法加工镜片已达到相当高的水平。加工 K, 玻璃、熔石英和单晶硅所得到的平面和球面,其表面粗糙度均方根值小于  $0.5\text{nm}$ 。哈尔滨工业大学庞滔等人曾做过浮法抛光实验研究,采用  $\text{SiO}_2$  微粉溶液抛光石英片,表面粗糙度不大于  $0.0256\mu\text{m}$ 。西北工业大学任敬心等人用传统的抛光法加工激光陀螺反射镜晶片(陶瓷玻璃),表面粗糙度

算术平均值小于  $1\text{nm}$ 。

然而总体说来,我国的超精密加工技术距离世界先进水平还有相当大的距离。超精密光学元件的加工基本上还是靠传统的研磨抛光,效率很低。离子束抛光和延展性磨削等方法的研究国内还没有真正开展起来。特别是我国的超精密加工技术与工业生产结合得不好,没有为国内迅速发展的光学和光电子学产业解决技术难题,造成这些产业中的许多元件依赖进口。我们认为,必须强化我国的超精密加工技术的研究,以推动光学、光电子学和整个高科技产业的发展。

本文在资料整理过程中得到翁志成教授的鼓励。另外,Y. Namba 教授向作者提供了他的研究论文。在此一并致谢。

- [1] 曹健林,物理,20(1991),288.
- [2] I. F. Stowers et al., Proc. SPIE, 966(1988), 67.
- [3] Y. Namba et al., Annals of the CIRP, 38(1989), 331.
- [4] Y. Namba et al., Annals of the CIRP, 26(1977), 325.
- [5] Y. Namba et al., Annals of the CIRP, 29(1980), 409.
- [6] J. M. Bennett et al., Applied Optics, 26(1987), 696.
- [7] E. Spiller, Optical Engineering, 29(1990), 609.
- [8] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, Nature, 344(1990), 524.

## 锗硅超晶格的结构完整性达到国际先进水平

复旦大学应用表面物理国家重点实验室用硅分子束外延方法生长了各种不同组分的  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  应变超晶格,提供给国内不少单位和开放课题进行研究,取得了很好的结果。

他们与复旦大学分析测试中心及中国科学院上海冶金研究所合作,在 X 射线小角衍射中观察到了超晶格的多达 17 级的衍射峰,并发现了衍射峰强度的调制现象,这在国外文献中均未报道过。在 X 射线大角衍射中观察到的衍射峰也多达 8 级,双晶衍射摇摆曲线的半高宽只有  $40-50\text{rads}$ 。

他们与北京大学合作,用拉曼光谱表征锗

硅超晶格,观察到了 9 级折迭声子峰,而在国外文献所报道的同类结构中只有 5 级折迭声子峰。

他们与中国科学院电镜实验室合作,用会聚束电子衍射研究锗硅超晶格中的应变与缺陷,得到了清楚的边带图样,其强度分布与理论的预期符合得很好。以上结果都证明了我们所生长的锗硅应变层超晶格在结构完整性上已达到国际先进水平。

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室 王 迅 盛 麓 俞 鸣 人)