

微纳米加工技术及其应用综述*

崔 铮[†]

(英国卢瑟福国家实验室微结构中心)

摘 要 材料与结构在微纳米尺度展现了许多不同于宏观尺度的新特征,纳米技术已经成为当前科学研究与工业开发的热门领域之一。微小型化依赖于微纳米尺度的功能结构与器件,实现功能结构微纳米化的基础是先进的微纳米加工技术。文章对微纳米加工技术做了一个综合的介绍,简要说明了微纳米加工技术与传统加工技术的区别。在微纳米加工技术的应用方面提出了一些合理选择加工技术的原则,并对当前微纳米加工技术面临的挑战和今后发展的趋势作了预测。

关键词 微纳米技术,微纳米加工,微系统技术,微小型化

Overview of micro/nanofabrication technologies and applications

CUI Zheng[†]

(Rutherford Appleton Laboratory, Central Microstructure Facility, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX, UK)

Abstract It has been revealed that materials and structures on the micro and nanometer scale demonstrate many characteristics different from their macro dimensions. Nanotechnology has become a hot topic in current research and industrial applications. Miniaturisation relies on functional structures and devices of micro and nanometer dimensions. An overview is presented of micro/nanofabrication technologies which are the basis for the realisation of micro and nanoscale structures. A brief description of the difference between such fabrication and conventional machining is given, and a few principles on how to choose an appropriate micro/nanofabrication technology for a specific application are suggested. Current challenges are presented, together with a prediction of future developments.

Keywords micro/nanotechnology, micro/nanofabrication, microsystem technology, miniaturisation

1 引言

当 1947 年 12 月美国贝尔实验室的科学家发明了世界上第一只晶体管,他们不会想到 50 多年后的今天,这场由晶体管引发的微电子技术革命已经深刻地影响了现代社会的面貌。由半导体微电子技术以及由此引发的各种微型化技术除了成为现代高科技产业的主要支柱之外,也深入到现代生活的所有领域,尤其是所谓 3C 领域,即消费类电子产品(consumer),计算机(computer)与通信(communication)。今天,功能强大的笔记本电脑,品种繁多小巧玲珑的多功能移动通信工具和花样翻新的家用电器已随处可见。除了集成电路之外,微型化技术导致了微系统的发展,

开发出直径只有 1mm 的微马达,指甲大小的微摄像头,豌豆大小的气相色谱分析装置,芯片上的光学平台和化学分析实验室等。如果说集成电路芯片提供了一个系统的思考与决策的大脑,微系统技术则以各种微传感器与微执行器提供了系统的感官、手与脚。系统微型化成为今后现代工业发展的必然趋势。如果按微型化的尺度衡量,集成电路技术与微系统技术还属于微米技术。自 21 世纪以来,由半导体微电子技术引发的微型化革命进入了一个新的时代,这就是纳米技术时代。从微米到纳米的过渡不仅仅是量的过渡而且

* 2005-10-17 收到

† Email: z. cui@rl.ac.uk

代表了质的跃迁. 材料与结构在 100nm 以下显现出不同于宏观世界的性质. 纳米科技为人类展现了微观世界的新天地. 从晶体管到集成电路, 从微电子到微机械与微流体, 从微米技术到纳米技术, 微纳米技术已经成为当今高科技的代名词.

无论是集成电路技术, 还是微系统技术或纳米技术, 其共同的特征是功能结构的尺寸在微米或纳米范围, 因此可以统称为微纳米技术. 微纳米技术依赖于微纳米尺度的功能结构与器件. 实现功能结构微纳米化的基础是先进的微纳米加工技术. 在过去的 50 年中, 正是微纳米加工技术的发展促进了集成电路的发展, 导致集成电路的集成度以每 18 个月翻一番的速度提高. 现代微纳米加工技术已经能够将上亿只晶体管做在方寸大小的芯片上. 最小电路尺寸为 90nm 的集成电路芯片已经开始大规模生产. 65nm 的集成电路芯片已开始小批量工业化生产, 而 45nm 加工水平的集成电路已经在研发阶段. 除了集成电路芯片中的晶体管越做越小, 微纳米加工技术还可以将普通机械齿轮传动系统微缩到肉眼无法观察的尺寸. 微纳米加工技术可以制作单电子晶体管, 可以实现单个分子与原子操纵. 微纳米加工技术可以建筑人类进入微观世界的桥梁, 是人类了解和利用微观世界的工具. 因此了解微纳米加工技术对于理解微纳米技术, 以及由微纳米技术支撑的现代高科技产业是非常重要的.

2 微纳米加工技术的分类

自人类发明工具以来, 加工是人类生产活动的主要内容之一. 所谓加工是运用各种工具将原材料改造成具有某种用途的形状. 一提到加工, 人们自然会联想到机械加工. 机械加工是将某种原材料经过切削或模压形成最基本的部件, 然后将多个基本部件装配成一个复杂的系统. 某些机械加工也可以称为微纳米加工. 因为就其加工精度而言, 某些现代磨削或抛光加工的精度可以达到微米或纳米量级. 但本文所讨论的微纳米加工技术是指加工形成的部件或结构本身的尺寸在微米或纳米量级. 微纳米加工技术是一项涵盖门类广泛并且不断发展中的技术. 在 2004 年国际微纳米工程年会上, 曾有人总结出多达 60 种微纳米加工方法. 可见实现微纳米结构与器件的方法是多样的. 本文不可能将所有微纳米加工技术一一介绍. 对这些加工技术的详细介绍目前已有专著出版^[1]. 笔者在此仅将已开发出的微纳米加工技术归纳为三种类型作概括性的介绍.

2.1 平面工艺

以平面工艺为基础的微纳米加工是与传统机械加工概念完全不同的加工技术. 图 1 描绘了平面工艺的基本步骤. 平面工艺依赖于光刻(lithography) 技术. 首先将一层光敏物质感光, 通过显影使感光层受到辐射的部分或未受到辐射的部分留在基底材料表面, 它代表了设计的图案. 然后通过材料沉积或腐蚀将感光层的图案转移到基底材料表面. 通过多层曝光, 腐蚀或沉积, 复杂的微纳米结构可以从基底材料上构筑起来. 这些图案的曝光可以通过光学掩模投影实现, 也可以通过直接扫描激光束、电子束或离子束实现. 腐蚀技术包括化学液体湿法腐蚀和各种等离子体干法刻蚀. 材料沉积技术包括热蒸发沉积, 化学气相沉积或电铸沉积.

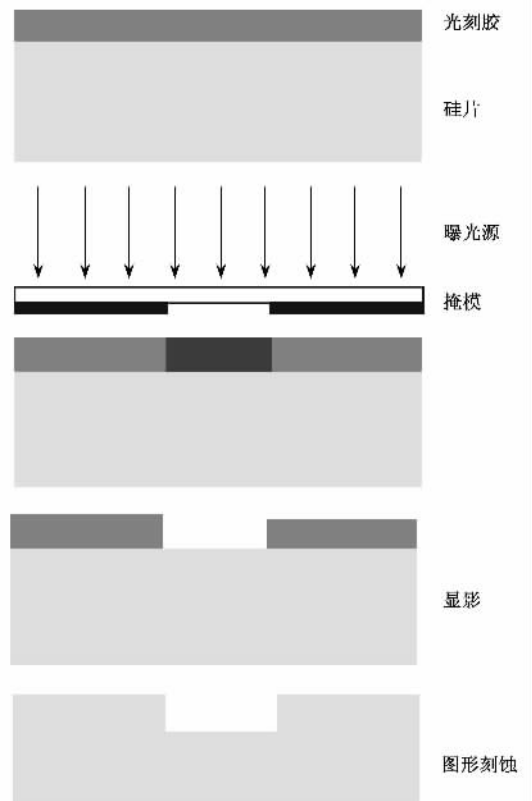


图 1 平面工艺的基本过程: 在硅片上涂光刻胶、曝光、显影, 然后把胶的图形通过刻蚀或沉积转移到其他材料

平面工艺是最早开发的, 也是目前应用最广泛的微纳米加工技术. 平面工艺之所以不同于传统机械加工是因为 (1) 微纳米结构由曝光方法形成, 而不是加工工具与材料的直接相互作用. 所以限制加工结构尺寸的不是加工工具本身的尺寸, 而是成像系统的分辨率, 例如光波的波长、激光束、电子束或离子束直径 (2) 平面工艺一般只能形成二维平面

结构,或准三维结构,而不是真正的三维系统.平面工艺形成的三维结构是通过多层二维结构叠加而成的(3)平面工艺形成的是整个系统,而不是单个部件.由于每个部件如此之小,根本无法按传统的先加工分立部件然后装配成系统的途径.所以系统中的每个部件以及它们之间的关系是在平面加工过程中形成的.

平面工艺产生于20世纪60年代集成电路的开发.半导体晶体管由分立到集成就是基于平面工艺.集成电路制造的平面工艺概括起来为4个基本方面^[2]:

(1)薄膜沉积(layering).包括各种氧化膜,多晶硅膜,金属膜等.金属连线,晶体管栅极,掺杂掩模,绝缘层,隔离层,钝化层等是集成电路的基本组成部分.

(2)图形化(patterning).所谓图形化是在硅基底和沉积的薄膜上形成各种电路图形.这包括光刻和刻蚀两个方面.更确切地说,图形化是集成电路微纳米加工的核心.集成电路的结构是通过图形化实现的.集成电路发展的历史也是平面图形化技术不断进步的历史.

(3)掺杂(doping).晶体管的载流子区通过掺杂形成.掺杂包括热扩散掺杂和离子注入掺杂.

(4)热处理(annealing).离子注入后通过热处理可以恢复由离子轰击造成的晶格错位,热处理也可以使沉积的金属膜与基底合金化,形成稳固的导电层.

平面微纳米加工技术虽然主要应用于集成电路制造,但近年来微系统技术中也大量应用平面工艺制作各种微机械、微流体和微光机电器件等.例如,图2是美国SANDIA国家实验室通过平面工艺制作的多齿轮传动系统.从表面来看,它与传统机械加工形成的齿轮传动系统没有什么区别.但这里的每个齿轮的直径不超过1mm.即使当今最先进的精密机械加工技术也无法制作这样微小的齿轮.它是通过多层多晶硅沉积与刻蚀形成的.而且各个齿轮以及它们的传动配合关系是通过巧妙的设计与硅平面工艺的结合一次做成的.微系统所需要的加工技术除了没有掺杂工艺外与集成电路的平面加工技术基本相同.但由于某些微系统特殊功能的需要,其结构尺寸一般远大于集成电路的结构尺寸.因而产生了某些适用于微系统的特殊平面工艺,例如厚胶曝光、电铸工艺、硅深刻蚀工艺以及制作微光学元件的灰度曝光工艺等.



图2 美国SANDIA国家实验室利用多层硅平面工艺(SUMMIT)制作的微机械齿轮

2.2 探针工艺

探针工艺可以说是传统机械加工的延伸,这里各种微纳米尺寸的探针取代了传统的机械切削工具.微纳米探针不仅包括诸如扫描隧道显微探针,原子力显微探针等固态形式的探针,还包括聚焦离子束,激光束,原子束和火花放电微探针等非固态形式的探针.原子力探针或扫描隧道电子探针一方面可以直接操纵原子的排列,同时也可以直接在基底材料表面形成纳米量级的氧化层结构或产生电子曝光作用.这些固体微探针还可以通过液体输运方法将高分子材料传递到固体表面,形成纳米量级的单分子层点阵或图形.非固态微探针如聚焦离子束,可以通过聚焦得到小于10nm的束直径,由聚焦离子束溅射刻蚀或化学气体辅助沉积可以直接在各种材料表面形成微纳米结构.聚焦激光束已经广泛应用于传统加工工业,作为切割或焊接工具.高度聚焦的激光束也可以直接剥蚀形成微纳米结构,例如近年来出现的飞秒激光加工技术.利用激光对某些有机化合物的光固化作用也可以直接形成三维立体微纳米结构.只要加工的工具足够小,即使传统机械加工技术也有可能制作微米量级的结构.例如,利用聚焦离子束的微加工能力可以制造尖端小于 $10\mu\text{m}$ 的高速钢铁刀.这种微型铣刀可以加工小于 $100\mu\text{m}$ 的沟槽或台阶结构.探针工艺与平面工艺的最大区别是,探针工艺只能以顺序方式加工微纳米结构,而平面工艺是以平行方式加工,即大量微结构同时形成.因此平面工艺是一种适合于大生产的工艺,但探针工艺

是直接加工材料,而不是像平面工艺那样通过曝光光刻胶间接加工。

2.3 模型工艺

模型工艺则是利用微纳米尺寸的模具复制出相应的微纳米结构。模型工艺包括纳米压印技术、塑料模压技术和模铸技术。纳米压印是利用含有纳米图形的图章压印到软化的有机聚合物层上。纳米图章可以用其他微纳米加工技术制作。虽然平面工艺中的曝光技术也可以制作此类纳米图形,但纳米压印技术可以低成本大量复制纳米图形。纳米压印还有多种派生技术,包括以曝光辅助压印形成纳米图形。模压技术即传统的塑料模压成型技术,模压的结构尺寸在微米以上,多用于微流体与生物芯片的制作。模压技术也是一种低成本微细加工技术。模铸技术包括塑料模铸和金属模铸。无论模压还是模铸都是传统加工技术向微纳米领域的延伸。模压与模铸的成型速度快,因此也是适用于大批量生产的工艺。

以上所介绍的三种类型的加工技术不但适用于微米尺度结构的加工,也可以用于纳米加工。它们都属于所谓自上而下(top-down)的加工技术,即功能结构是由基底材料表面通过光刻腐蚀方法成型的。平面工艺是典型的自上而下的加工技术。在纳米加工领域还有一类完全不同的形成功能结构的方法,即自下而上(bottom-up)方法。这种加工技术依赖于分子自组装过程,它更多地涉及到生物与化学反应,而不是传统意义上的加工技术。但在大多数情况下,分子自组装也要依赖自上而下的微细加工技术来构筑自组装的平台^[3]。纳米加工技术不可能孤立存在,纳米尺度的物理化学现象通常需要通过微米结构的器件或系统过渡到宏观世界。除了扫描探针加工技术之外,大多数纳米加工技术上是在微米加工技术基础上发展起来的。因此微米与纳米加工是不可分割的。

3 微纳米加工技术的应用

尽管微纳米加工方法多种多样,但目的只有一个,这就是制作具有实际用途的微纳米结构与器件。同一种微纳米器件或结构可以用多种不同微纳米加工技术实现。任何一种微纳米结构的加工都需要不止一种微纳米加工技术。脱离开实际应用谈微纳米加工技术是毫无意义的。但在众多加工技术中如何针对某一特殊应用选择合适的加工方法,应参考以下原则:

(1) 最小结构尺寸

不同的加工技术有不同的可加工最小结构尺寸的能力。以光学曝光技术为例,接触式曝光的加工能力为 $1\mu\text{m}$ 左右。若要加工亚微米结构必须采用投影式曝光技术。投影式曝光技术又由于光源波长的不同和采用不同的分辨率增强技术而具有不同的最小加工尺寸。目前最先进的光学曝光技术可以达到 50nm 左右的加工能力。更小的结构则需要电子束曝光、纳米压印或离子束加工技术。

(2) 最经济的加工方法

微纳米加工技术设备的投资通常是非常高的。建立一条先进的集成电路芯片加工生产线需要耗资10亿美元以上。购买一台先进的电子束曝光机需要数百万美元。除了设备投资之外,材料成本也必须考虑。单晶硅虽然是集成电路加工的基础材料,但并不是一种低成本材料。如果用硅材料制造一次性使用的微器件,会大大增加器件的单位成本。因此,医用与生物化学类微系统结构通常可以由塑料或玻璃材料加工制作。

(3) 加工批量要求

微纳米平面制图技术分为平行和顺序两种方式。光学曝光,X射线曝光和纳米压印为平行式加工,电子束曝光与聚焦离子束加工为顺序式。平行式加工适用于大批量生产。这就是为什么大规模集成电路的生产始终坚持使用光学曝光技术,尽管光学曝光技术并不具有最高的分辨能力。虽然集成电路生产线的投资极大,但由于采用了平行式加工与大尺寸硅片(目前最大的硅片直径为 300mm),单个集成电路芯片的成本仍然很低。

(4) 生产与科研

大规模生产对微纳米加工技术的要求与科研对微纳米加工技术的要求完全不一样。大规模生产要求尽可能高的成品率,因此通常并不需要最先进的加工技术,而需要最稳定最能保证成品率的技术。尽管已经报道了大量新颖的微纳米加工技术,但只有很少几种最终能被工业界在大规模生产中采用。而在微纳米器件开发阶段或微纳米科学研究中,对成品率没有特殊的要求,因此可以采用多种技术去实现所需要的微纳米结构。

(5) 加工对象

微纳米器件的功能不但与器件结构有关,也与器件的材料有关。对不同的材料有不同的加工技术。例如,对硅材料的加工技术与III-V族半导体材料的微加工就有所不同。其他非硅材料如金属、玻璃、陶瓷以及塑料,都有其各自不同的加工技术。

微纳米加工技术与微纳米器件的开发是相互依存又相互促进的. 新型微纳米器件推动微纳米加工技术的进步, 而微纳米加工技术的进步反过来又会启发新型微纳米器件的开发. 在现代高科技发展中, 微纳米技术可以说是无处不在. 微型化已经从集成电路芯片发展到其他各个应用领域. 微纳米加工技术是微纳米技术的基础. 这种依赖关系集中体现在下述应用领域: 半导体集成电路, 纳米电子学, 高密度磁存贮, 微系统, 生物芯片与纳米科技. 这些领域都是当前热门的高科技发展领域. 本文不准备分别介绍微纳米加工技术在这些领域的具体应用. 有兴趣的读者可以参阅文献[1] 获得更详细的信息. 这里仅就微纳米技术今后发展的趋势以及微纳米加工技术在其中所能发挥的作用发表一些看法.

到目前为止人们所能看到和亲身感受到的微纳米技术的进步是各种微小型化的电子类产品. 集成电路芯片的功能越来越强大. 微传感器, 微执行器, 微光学元件, 生物化学分析芯片也越来越广泛地应用与现代工业与现代生活的各个领域. 但目前这些微电子与微系统还都是作为单元系统独立存在. 今后 10 年的发展趋势是将所有这些分立的功能集成到单一的芯片上或单一的元器件内, 形成所谓芯片上的微系统 (system-on-chip, SoC) 或封装单元内的微系统 (system-in-package, SiP). 这一发展趋势几年前已经在集成电路行业内部开始. 过去集成电路芯片都是单一功能的, 微处理器、存贮器、接口电路、数字与模拟电路都有单一芯片. 一个完整的电路系统由这些不同功能的芯片在印刷电路版上组合而成. 现在的集成电路芯片正在朝着将所有这些功能集成为单一芯片的方向发展. 由于不同电路的芯片加工工艺可能差别很大, 要把这些电路加工在同一芯片上其技术难度目前还很大, 或者说技术成本还很高. 另一个途径是单一功能的芯片单独加工, 然后将这些芯片通过互连技术安放在另一个芯片上, 封装成单一器件 (SiP). 未来的目标不光是集成电路之间的集成, 而且包括微电子机械、微传感器、微流体系统、微光学系统与集成电路的集成. 图 3 显示了未来系统集成芯片的构想. 实现系统集成的最大的挑战是开发出全面兼容的低成本的微纳米加工技术. 这也为未来微纳米加工技术的发展提出了新的课题.

4 微纳米加工技术发展趋势

微纳米加工技术是一项不断发展中的技术. 新

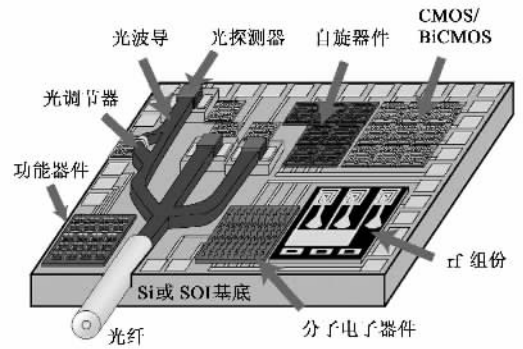


图 3 未来系统芯片 (system on chip) 的构想

技术取代老技术, 先进技术取代落后技术是客观发展规律. 加工技术本身从来都只是手段, 其目的是服务于科学研究或工业产品开发与生产. 因此新的科研课题或新的工业产品开发会不断对加工技术提出新的要求. 新的加工技术将会不断出现.

就集成电路开发而言, 将电路尺寸做得越来越小始终是工业界不懈追求的目标. 目前证明传统晶体管工作原理在 50 nm 以下的结构尺寸仍适用. 而量子器件可以将电路尺寸缩小到 10 nm 以下. 纳米电子器件与分子电子器件都对加工技术的能力提出了更高的要求. 光学曝光技术目前可以实现 45 nm 左右的分辨能力. 当光学曝光技术退出历史舞台, 后面有极紫外技术或纳米压印技术和电子束投影曝光技术. 这些“后光学时代”的加工技术仍在进一步发展完善之中. 虽然有许多加工技术可以实现 50 nm 以下的加工能力, 但在工业生产中, 经济因素往往是某一技术的生命力的决定因素. 最说明问题的例子是 X 射线光刻技术. X 射线光刻曾有其辉煌发展时期. 曾经为半导体工业界看好为最终的光刻技术. 但光学曝光技术本身的进步与高经济效益使工业界逐渐放弃了 X 射线光刻技术.

微系统技术, 包括微电子机械、微流体、微光学系统, 为微纳米加工技术的发展开辟了广阔的天地. 虽然微系统通常不要求非常小的结构尺寸, 但由于微系统使用的材料的多样性, 服务于微系统制造的加工技术也多种多样. 微系统加工面临的一个严峻的挑战是如何与集成电路加工工艺兼容, 以实现与集成电路的完全集成. 微系统加工面临的另一个严峻的挑战是如何实现标准化加工. 微系统加工技术的多样化与微系统本身的多样化造成了标准化生产的极大难度^[4]. 集成电路生产技术经过近半个世纪的发展已经形成一套非常标准化规范化的技术体系. 一个集成电路设计可以送到全世界任何一个代

