

崔铮 著

# M 微纳米加工技术及其应用

*icro-*

## *Nanofabrication Technologies and Applications*



 高等教育出版社 HIGHER EDUCATION PRESS

# 微纳米加工技术 及其应用

崔 铮 著

高等教育出版社

## 内容简介

本书集作者多年来的实践经验与研究成果,系统地介绍了微纳米加工技术的基础,包括光学曝光技术、电子束曝光技术、聚焦离子束加工技术、X射线曝光技术、各种刻蚀技术和微纳米尺度的复制技术。对各种加工技术着重讲清原理,列举基本的工艺步骤,说明各种工艺条件的由来,并注意给出典型工艺参数。充分分析了各种技术的优缺点及在应用过程中的注意事项。全书强调实用,避免烦琐的数学分析,既注重基础知识又兼顾微纳米加工领域近年来的最新进展及在各高科技领域的应用,并列出了相关参考文献供进一步深入研究,因此不论是对初次涉足这一领域的大专院校的本科生或研究生,还是对已经有一定工作经验的专业科技人员,都具有很好的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

微纳米加工技术及其应用 / 崔铮著. — 北京: 高等教育出版社, 2005.6  
ISBN 7-04-016880-4

I. 微... II. 崔... III. ①纳米材料—加工工艺  
②纳米材料—应用 IV. TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第046360号

策划编辑 李冰祥      责任编辑 刘剑波      封面设计 刘晓翔  
责任绘图 朱 静      责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京佳信达艺术印刷有限公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
开 本	800 × 1050 1/16	版 次	2005年6月第1版
印 张	19.25	印 次	2005年6月第1次印刷
字 数	330 000	定 价	40.20元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究  
物料号 16880-00

# 序

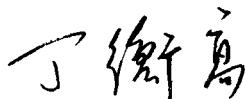
本书集崔铮博士多年来的实践经验与研究成果,并结合近年来国际上的最新进展,综合介绍了微纳米加工技术的基础,包括光学曝光技术、电子束曝光技术、聚焦离子束加工技术、X射线曝光技术、各种刻蚀技术和微纳米尺度的复制技术;充分分析了各种技术的优缺点及在应用过程中的注意事项;强调实用,避免烦琐的数学计算;并用专门一章介绍了微纳米加工技术在现代高新技术领域的应用,包括超大规模集成电路技术、纳米电子技术、光电子技术、高密度磁存储技术、微机电系统技术、生物芯片技术和纳米技术。通过实例说明了现代高新技术与微纳米加工技术的不可分割的关系,并演示了如何灵活应用微纳米加工技术来推动这些领域的技术进步。与国内外同类出版物相比,本书的显著特点是将用于超大规模集成电路生产与用于微机电系统、微传感器系统制造的微纳米加工技术综合介绍,并加以比较。

本书首次将微纳米加工归纳为平面工艺、探针工艺和模型工艺3种主要类型,突出了微纳米加工与传统加工技术的不同之处。一般制作微米以下、100 nm以上的结构仍习惯称为微细加工或微加工,制作100 nm以下的结构才是真正意义上的纳米加工。而纳米加工除了以上所说的平面工艺、探针工艺和纳米模型工艺之外,还包括由分子工程实现的纳米结构,这就是所谓自上而下(top-down)和自下而上(bottom-up)的加工技术。平面工艺是典型的自上而下的加工技术。自下而上则依赖于分子自组装过程,更多地涉及生物与化学反应,而不是传统意义上的加工技术,所以分子自组装工程一般不归类于微纳米加工技术。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。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。除了扫描微探针加工技术之外,大多数纳米加工技术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。

全书既注重基础知识又兼顾微纳米加工领域近年来的最新进展,并列

举了大量参考文献供进一步深入研究,因此不论是对初次涉足这一领域的大专院校的本科生或研究生,还是对已经有一定工作经验的专业科技人员,都具有很好的参考价值。特此郑重推荐给广大读者。

中国工程院院士  
中国微米纳米技术学会名誉理事长



2004年12月1日

# 前 言

记得1994年夏天我第一次回国,到成都参加中国科学院青年学者学术讨论会,会议的主题是光学技术在微细加工中的应用。那时的微细加工还主要集中在半导体集成电路工艺技术领域。在那次学术讨论会上我介绍了我在英国从事的有关 $0.35\ \mu\text{m}$ 集成电路光学曝光技术的研究。国内同行的专家都感叹国内外发展水平的差距,却又无能为力。中国由于长期以来受到西方先进工业国家的封锁与禁运,西方只把落后的或淘汰的微细加工设备卖给中国。虽然国家投入大量资金与人力,自主开发包括光学曝光机、电子束曝光系统与聚焦离子束加工系统等微细加工设备,但性能与可靠性总是与国外设备有差距,而且从样机研制到推广使用,中间还有很大距离。所以,中国的微细加工技术发展与应用同国外相比差距是太大了。而当时的形势是韩国与中国台湾地区正在超过日本,成为亚洲半导体集成电路加工生产的主要基地。中国大陆地区若不急起直追,就可能在这一高科技领域越加落后。1995年我在国内《科学》杂志上撰文,系统介绍了光学、电子束、离子束与X射线曝光技术在超大规模集成电路加工方面的应用(VLSI微细加工技术.科学,1995年第3期),希望能对国内微细加工技术的发展有所启发。值得欣慰的是中国在过去的10年中,尤其是最近几年已疾步赶上来。一方面是国力强盛了,另一方面是西方工业国家为打入中国市场已开放了先进微细加工设备对中国的出口。这10年中,我每年都回国讲学或进行合作研究,亲眼目睹了中国一些大学与研究所相继建立起具有与国外一流水平实验室相媲美的微细加工基础设施,装备了先进的微细加工设备。中国的半导体集成电路生产企业也已跻身世界前5大公司的行列。除了微电子与集成电路工业的发展外,中国在微系统MEMS(micro-electro-mechanical system)技术的开发研究方面也与国外水平不相上下。微细加工技术已经不仅限于集成电路加工,而且被应用到更广泛的MEMS技术、微流体技术、微光学技术与生物芯片技术。最近两年蓬勃发展的纳米技术更是将微细加工技术提到了对纳米科技发展举足轻重的地位。微细加工技术已经扩展成为微纳米加工技术,成为当今微纳米研究与产业化不可缺少的手段。

中国已经下决心在微纳米技术领域赶上和超过国际先进水平,在国家

雄厚的财力支持下,购置了先进的微纳米加工设备,建立起先进的实验基础,但这些先进设备都需要由人来操作使用,使其发挥最大效益。另外,微纳米结构器件的功能或特性与其加工成型技术密切相关,任何从事微纳米技术研究或开发的科技人员都应同时具备相应的微纳米加工技术知识。这些年来通过回国讲学与合作研究,我深深感到国内科技人员与即将投身这一领域的大学在校本科生、研究生需要一本全面介绍微纳米加工技术基础与国外最新发展的读物。我本人也一直希望将我多年来从事微纳米加工技术研究的经验与所学所知传授他人。高等教育出版社向海外学者发出的邀请终于圆了我这个梦。作为一名中国自己培养的工学博士,这本书也是我回报祖国培育之恩的一份心意。

近年来随着微纳米技术的蓬勃发展,国外介绍微纳米加工技术的专业出版物也陆续出现。但这些书或者专述集成电路微加工技术,或者专述微系统 MEMS 的微加工技术,而面向纳米科技的纳米加工技术尚无任何出版物系统加以介绍。我力求在本书中同时介绍超大规模集成电路的加工技术、MEMS 的加工技术以及纳米加工技术。这一方面反映了当今科技多领域互相借鉴、互相交叉渗透的发展趋势,另一方面也是我本人这些年来工作实践的真实总结。我于 1989 年在英国国家科学与工程研究委员会 (SERC) 的访问研究基金资助下,来到英国剑桥大学卡文迪许实验室 (Cavendish Laboratory) 微电子研究中心做博士后研究。一开始从事的是液态金属离子源与聚焦离子束技术的研究,随后又参加了电子束曝光技术的欧共体研究计划。1993 年受聘于英国卢瑟福国家实验室 (Rutherford Appleton Laboratory) 微结构中心,参加了超大规模集成电路光学曝光技术的欧共体研究计划。1996 年到 1998 年间主持了一项欧共体关于电子束纳米曝光与化学放大抗蚀剂技术的研究。1998 年后开始转向微系统 MEMS 技术的研究,并主持了欧洲的一个微系统技术中心 (Competence Centre for Microactuators and Non-silicon Microsystems), 因此开始有机会接触各种用于 MEMS 的加工技术。这些技术,包括我在这些领域的研究成果,都反映在本书之中。这也是我能够独立完成本书的原因,而不是像其他同类书籍那样由多名作者联合撰写。当然,我本人的经验与知识是有限的,不可能也不敢妄称在所有书中所介绍的技术方面都是专家,因此希望广大读者与专家学者对书中可能出现的谬误之处给予批评指正。书中对每一种微纳米加工技术的介绍也难免挂一漏万,好在每章之后都附有相关的参考文献,可供读者进一步深入研究与探讨。

目前国内全面介绍微纳米加工技术的中文书籍尚未见有出版,因此,

我在撰写本书过程中经常为如何恰当地将英文的专业名词术语翻译成中文而困扰。过去由于中国台湾地区与大陆地区在科技交流方面的缺乏,台湾地区在引进国外半导体集成电路加工技术的过程中创造了一套中文名词术语,大陆地区在过去几十年的半导体工业发展中也建立了一套专业名词术语体系。对同一英文专业名词,海峡两岸往往有完全不同的中文翻译。例如,“mask”在大陆一般翻译为“掩模”,而在台湾翻译为“图罩”;“resist”在大陆翻译为“光刻胶”或“抗蚀剂”,而在台湾翻译为“光阻剂”;“silicon wafer”在大陆翻译为“硅片”,而在台湾翻译为“晶圆”。近年来随着台湾集成电路工业对大陆投资的增加,来自台湾的与集成电路加工有关的专业名词术语多见于各种出版物。为了便于读者阅读,本书在中英文名词对照索引中对部分译法不同的名词同时列出大陆与台湾的译法。台湾译法参照了台湾交通大学龙文安教授所著《积体电路微影制程》与《半导体微影技术》两书的中文名词索引。由于微纳米加工技术的发展日新月异,对近年来国外出现的新技术名词,作者只能自行定义其中文的称呼。对这些名词,本书中通常不采取字面直译,而是按某一技术的特性决定其中文名称。例如,纳米压印中的“step and flash”技术从字面翻译很难反映其所以然,本书将其译为“透明模曝光”,这至少可以反映该技术的特点。至于这些中文译法是否能被读者和业界接受,还须经过时间的考验。为了适应国内读者与国外技术接轨的需要,同时配合国内高校的双语教学,本书出版后将由高等教育出版社接着出版其英文版。

我诚挚感谢高等教育出版社对本书出版的全力支持,并感谢丁衡高院士为本书作序。我衷心地希望以此书为促进中国在微纳米科技领域的人才培养与赶超国际先进水平尽绵薄之力。



2005年1月20日于英国牛津



# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 微纳米技术与微纳米加工技术 .....	(2)
1.2 微纳米加工技术的分类 .....	(3)
1.3 本书的内容与结构 .....	(7)
参考文献 .....	(10)
<b>第 2 章 光学曝光技术</b> .....	(11)
2.1 光学曝光方式与原理 .....	(13)
2.2 光学曝光的工艺过程 .....	(21)
2.3 光刻胶的特性 .....	(23)
2.3.1 光刻胶的一般特性 .....	(24)
2.3.2 正型胶与负型胶的比较 .....	(27)
2.3.3 化学放大胶 .....	(29)
2.3.4 特殊光刻胶 .....	(29)
2.4 光学掩模版的设计与制作 .....	(30)
2.5 突破光学曝光分辨率的新技术 .....	(34)
2.5.1 离轴照明技术 .....	(34)
2.5.2 空间滤波技术 .....	(35)
2.5.3 移相掩模技术 .....	(36)
2.5.4 光学邻近效应校正 .....	(40)
2.6 光学曝光技术的极限 .....	(43)
2.7 厚胶曝光技术 .....	(44)
2.7.1 传统光刻胶 .....	(45)
2.7.2 SU-8 光刻胶 .....	(47)
2.8 灰度曝光技术 .....	(51)
2.9 光学曝光的计算机模拟技术 .....	(55)
2.9.1 部分相干光成像理论 .....	(55)
2.9.2 计算机模拟软件 COMPARE .....	(59)
2.9.3 光学曝光质量的比较 .....	(63)
参考文献 .....	(68)

<b>第3章 电子束曝光技术</b> .....	(73)
3.1 电子光学原理 .....	(75)
3.2 电子束曝光系统 .....	(80)
3.2.1 矢量扫描与光栅扫描曝光 .....	(83)
3.2.2 变形束曝光 .....	(89)
3.2.3 投影曝光 .....	(89)
3.2.4 微光柱系统曝光 .....	(91)
3.3 电子束曝光图形的设计与数据格式 .....	(93)
3.3.1 设计中的注意事项 .....	(93)
3.3.2 中间数据格式 .....	(95)
3.3.3 AutoCAD 数据格式 .....	(97)
3.3.4 机器数据格式 .....	(97)
3.4 电子束抗蚀剂及其工艺 .....	(100)
3.4.1 高分辨率电子抗蚀剂 .....	(100)
3.4.2 化学放大抗蚀剂 .....	(103)
3.4.3 多层抗蚀剂工艺 .....	(108)
3.5 电子束散射与邻近效应 .....	(110)
3.5.1 电子束在固体材料中的散射 .....	(110)
3.5.2 电子束曝光的邻近效应 .....	(115)
3.5.3 点扩散能量分布的近似 .....	(116)
3.6 电子束曝光邻近效应的校正 .....	(118)
3.7 电子束曝光的计算机模拟 .....	(121)
3.8 电子束曝光的极限分辨率 .....	(125)
3.8.1 电子束曝光系统 .....	(125)
3.8.2 二次电子散射效应 .....	(125)
3.8.3 抗蚀剂工艺 .....	(126)
参考文献 .....	(126)
<b>第4章 聚焦离子束加工技术</b> .....	(131)
4.1 液态金属离子源 .....	(132)
4.2 聚焦离子束系统 .....	(135)
4.3 离子在固体材料中的散射 .....	(137)
4.4 聚焦离子束加工原理 .....	(140)
4.4.1 离子溅射 .....	(140)

4.4.2 离子束辅助沉积 .....	(143)
4.5 聚焦离子束加工技术的应用 .....	(144)
4.5.1 审查与修改集成电路芯片 .....	(144)
4.5.2 修复光刻掩模缺陷 .....	(145)
4.5.3 制作透射电镜样品 .....	(149)
4.5.4 多用途微切割工具 .....	(150)
4.6 聚焦离子束曝光技术 .....	(153)
4.7 聚焦离子束注入技术 .....	(155)
参考文献 .....	(156)
<b>第5章 X射线曝光技术 .....</b>	<b>(159)</b>
5.1 X射线曝光原理 .....	(160)
5.2 X射线曝光系统 .....	(165)
5.2.1 X射线源 .....	(165)
5.2.2 X射线对准式曝光机 .....	(168)
5.2.3 X射线曝光掩模 .....	(169)
5.2.4 X射线曝光抗蚀剂 .....	(172)
5.3 超微细结构的X射线曝光技术 .....	(172)
5.4 超深结构的X射线曝光技术(LIGA技术) .....	(174)
5.4.1 X射线光源 .....	(177)
5.4.2 LIGA掩模 .....	(177)
5.4.3 用于LIGA的厚胶及其工艺 .....	(179)
5.4.4 影响LIGA图形精度的因素 .....	(182)
参考文献 .....	(184)
<b>第6章 刻蚀技术 .....</b>	<b>(187)</b>
6.1 化学湿法腐蚀技术 .....	(188)
6.1.1 硅的各向异性腐蚀 .....	(189)
6.1.2 硅的各向同性腐蚀 .....	(196)
6.1.3 二氧化硅的各向同性腐蚀 .....	(198)
6.2 干法刻蚀之一:反应离子刻蚀 .....	(199)
6.3 干法刻蚀之二:反应离子深刻蚀 .....	(206)
6.4 干法刻蚀之三:离子溅射刻蚀 .....	(211)
6.5 干法刻蚀之四:反应气体刻蚀 .....	(213)
6.6 干法刻蚀之五:其他物理刻蚀技术 .....	(214)

6.6.1	激光微加工技术 .....	(214)
6.6.2	电火花微加工技术 .....	(218)
6.6.3	喷粉微加工技术 .....	(219)
	参考文献 .....	(221)
<b>第7章</b>	<b>复制技术 .....</b>	<b>(225)</b>
7.1	纳米压印技术 .....	(226)
7.2	透明模曝光技术 .....	(231)
7.3	软印模技术 .....	(233)
7.4	塑料微成型技术 .....	(235)
7.4.1	热压成型 .....	(237)
7.4.2	注塑成型 .....	(238)
7.4.3	浇铸成型 .....	(241)
7.5	激光三维微成型技术 .....	(242)
7.6	其他图形复制技术 .....	(245)
7.6.1	扫描探针点墨法 .....	(246)
7.6.2	纳米球阵列掩模法 .....	(247)
7.6.3	纳米阴影掩模法 .....	(249)
	参考文献 .....	(250)
<b>第8章</b>	<b>微纳米加工技术的应用 .....</b>	<b>(253)</b>
8.1	超大规模集成电路技术 .....	(254)
8.2	纳米电子技术 .....	(259)
8.3	光电子技术 .....	(262)
8.4	高密度磁存储技术 .....	(265)
8.5	微机电系统技术 .....	(269)
8.6	生物芯片技术 .....	(275)
8.7	纳米技术 .....	(279)
	参考文献 .....	(282)
	中英文名词对照索引 .....	(287)
	结束语 .....	(295)

# 绪论

# 第 1 章

- 1.1 微纳米技术与微纳米加工技术 (2)
- 1.2 微纳米加工技术的分类 (3)
- 1.3 本书的内容与结构 (7)
- 参考文献 (10)

## 1.1 微纳米技术与微纳米加工技术

自 1947 年世界上第一只晶体管问世以来,半导体微电子技术以及由此引发的各种微型化技术已经发展成为现代高科技产业的主要支柱。集成电路已经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、小巧玲珑的移动通信工具和花样翻新的家用电器随处可见。到 2004 年,全世界半导体集成电路的产值已达到 2 150 亿美元,它支持着全世界超过 1 万亿美元的信息类产品市场。在未来 6 年内,集成电路工业仍将以每年 15% 的速度增长,到 2010 年全世界半导体集成电路的销售额可望达到 4 100 亿美元<sup>[1]</sup>,所支持的信息设备产业将达到 4 万亿~5 万亿美元。

除了集成电路的持续高速发展外,在 20 世纪 80 年代,另一场技术革命悄然兴起,这就是微系统技术。微系统技术包括微机械系统、微光机电系统、微流体与生物芯片系统。直径只有 1 mm 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都已经或正在成为产品进入现代生产与生活的各个领域。集成电路技术主要集中应用于 3C 类产品,微系统技术则有着更广泛的应用领域。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。到 2000 年,全世界的微系统技术产业产值已经达到 30 亿美元,预计到 2005 年该产业的市场将达到 60 亿美元。

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,而且代表了质的跃迁。材料与结构在 100 nm 以下显现出不同于宏观世界的性质。世界各国尤其是工业发达国家在过去几年中掀起了对纳米技术前所未有的关注和热情。从 2000 年以来,美国已经投入了 20 亿美元研究开发纳米技术。2003 年 12 月美国总统又签署了联邦立法,准备在今后 4 年中再投入 37 亿美元的纳米技术研发基金。欧盟在其 2002—2006 的研究计划中也将投入 13 亿欧元,支持欧盟各国在纳米技术方面的研究。纳米

技术已经迅速成为一个新兴产业。目前全世界与纳米科技相关的公司已超过 1 000 家,相关产业的产值在 2002 年已达到 864 亿美元,预计到 2006 年将达到 1 350 亿美元。纳米技术成为影响人类未来生活的三大新科技之一<sup>[2]</sup>。

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。功能结构的微纳米化带来的不仅仅是能源与原材料的节省,而且导致多功能的高度集成和生产成本的大幅降低。微纳米技术不但推动着科技的进步,而且造就了现代知识经济的物质基础。中国正在迎来微纳米技术产业前所未有的蓬勃发展时期。在微电子产业方面,全世界集成电路加工业的目光正在转向中国。世界各主要集成电路生产公司纷纷在中国投资建厂。仅 2002 年到 2003 年上半年,全国就有 24 家在建和筹建的集成电路芯片生产线,总投资额将近 130 亿美元<sup>[3]</sup>。在微系统技术方面,由于国家在“九五”计划期间的大力支持,全国已有 70 多家科研单位与大学从事这一领域的研究。中国在纳米技术方面的研究开发也是紧跟世界其他工业发达国家发展的步伐。在 2001—2005 年间,中国预计投资 20 亿人民币用于支持纳米科技相关的研究开发。

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,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 90 nm 的集成电路芯片已经开始批量生产。65 nm 和 45 nm 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外,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。

## 1.2 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。但这里的微米或纳米是指工件形状的精度。微纳米加工不同于传统机械加工,其最本质的区别是加工形成的部件或结构本身的尺寸在微米或纳米量级。形成微纳米结构的工艺技术可大体分为3种类型:平面工艺、探针工艺和模型工艺。

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。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。这里的光刻是广义的,因为实现感光层图案不仅可以通过光学的曝光,还可以是电子束曝光、离子束曝光和X射线曝光。这些图案可以通过掩模投影实现,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和电铸沉积。

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以下3个方面。①微细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,根本无法走传统的先加工各个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。以加工机械传动系统为例,图1.1是美国SANDIA国家实验室通过平面微细加工技术制作的多齿轮传动系统<sup>[4]</sup>。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。图1.1中的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一次做成的,因此平面系统的设计方法与传统三维系统的设计方法完全不同。平面系统中考虑的是层与层之间的关系,而不是



各个部件之间的关系。

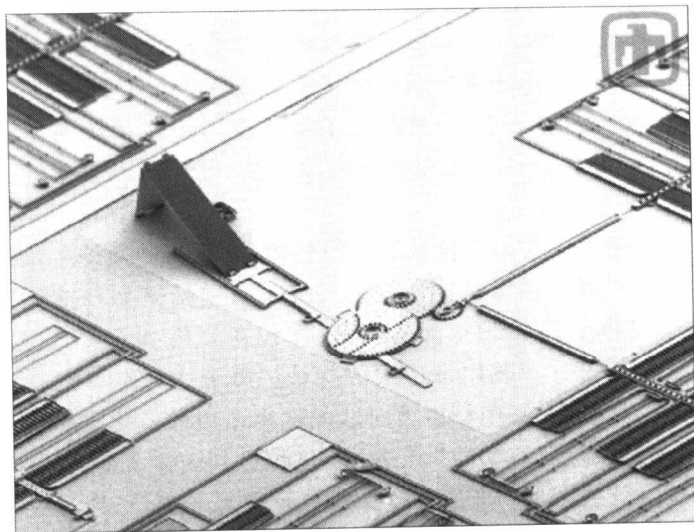


图 1.1 由平面微细加工技术制作的微齿轮传动系统<sup>[4]</sup>

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基于两项关键技术,即扩散结 (diffused junction) 工艺和氧化硅掩模 (oxide masking) 工艺<sup>[5]</sup>。通过热扩散掺杂可以在硅基底上形成晶体管的源极 (source) 与漏极 (drain) 载流子区,而二氧化硅掩模可以用来限定扩散的区域,同时可以作为绝缘膜。所谓集成电路制造,主要是制造晶体管和制造晶体管之间的互联系统。为了在单位面积硅片上制作出数百万个晶体管并把它们按照不同功能要求互相连接起来,需要上百道制造工艺。这些工艺概括起来为 4 个方面。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 制图 (patterning)。所谓制图,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大方面。更确切地说,制图是集成电路微纳米加工的核心。集成电路的结构是通过制图实现的。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。

形成超大规模集成电路的核心技术是平面制图技术。集成电路发展的历史也是平面制图技术不断进步的历史。集成电路加工是平面微纳米