



信息科学与工程系列专著

微纳加工科学原理

The Science of Micro- and Nano-fabrication

唐天同 王兆宏 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
电子信息科技专著出版专项资金

信息科学与工程系列专著

微纳加工科学原理

The Science of Micro- and Nano-fabrication

唐天同 王兆宏 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书基于作者长期从事微纳加工技术、带电粒子光学和光电子学等方面的科研和教学工作积累,系统、全面地论述现代微米与纳米微细加工的科学原理。主要内容包括:光子、电子、离子和等离子体及其作用,常用的衬底与薄膜材料,微细图形技术,薄膜淀积、蚀刻、外延生长、氧化、扩散和离子注入的过程和方法,以及微细结构的光学、电子显微、声学、扫描探针显微等微观分析和表征手段。本书深入浅出,物理意义明确,取材较新,比较全面地概括了国内外近10年来微纳加工领域所取得的新成果和新进展,便于读者从宽广的视角来理解本学科前沿的各种科学技术问题,进行创新性研究和开发工作。

本书可供电子科学与技术、微电子技术、光电子技术、精密机械加工、微电子集成工艺、半导体与集成电路工艺设备、光电子集成工艺设备、微机械及微光-电-机械加工、微流体技术、微传感器器件与技术等领域科研人员参考使用,也可用做高等学校相关学科的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微纳加工科学原理 / 唐天同, 王兆宏著. —北京: 电子工业出版社, 2010.6
(信息科学与工程系列专著)
ISBN 978-7-121-11018-4

I. ①微… II. ①唐…②王… III. ①纳米材料—新技术应用 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 104116 号

责任编辑: 张来盛 (zhangls@phei.com.cn)

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 33.5 字数: 810 千字

印 次: 2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

微纳加工是应用非常广泛、发展非常迅速的多学科交叉的一门新学科。它的应用领域涵盖了集成电路、集成光学、微光机电系统、微流体、微传感、纳米技术以及精密机械加工等多个科学技术领域。

为了适应微纳加工技术的发展和工程实践应用需求,推动我国微纳加工技术的自主发展和创新,作者根据长期从事微纳加工技术、带电粒子光学和光电子学等方面的科研和教学工作积累,在所取得的研究和教学成果的基础上,广泛参阅国内外该学科已有成果,编写成本书。宗旨是为微纳加工的科研和工程实践工作提供有益的指导,帮助读者理解微纳加工过程的物理内涵,以更好地解决在微纳加工工艺过程以及设备研发和使用中存在的问题。

本书系统、全面地论述了现代微米与纳米微细加工有关的科学原理,包括从事微纳加工工艺与设备研发必须掌握的有关光学,X射线与极紫外射线,电子与离子束,气体放电与等离子体,光子和带电粒子与固体样品的作用,洁净真空技术,常用衬底与薄膜材料,微细图形技术,薄膜淀积、蚀刻、外延生长,硅氧化、扩散、离子注入等方面的科学原理,涉及多个学科领域;同时,也对有关仪器设备、微细结构与器件的分析和表征手段等方面的技术现状及发展动态作了扼要论述。书中特别将纳米加工技术的科学原理与发展作为论述的重点,从全新的多方位视角对该领域的现状和发展进行把握和审视。本书取材较新,比较全面地概括了国内外近 10 年来微纳加工领域取得的新成果和新进展;在原理论述上注意做到深入浅出,物理意义明确,便于读者理解。

本书可供从事微纳加工的科研人员、工程技术人员阅读参考,也可作为高等学校电子科学与技术、微电子技术、光电子技术、传感器技术及精密机械加工等专业研究生的教材或参考书。

本书由唐天同、王兆宏共同编写,其中第 3 章及第 6 章部分内容 by 王兆宏执笔,其余章节由唐天同执笔。在编写过程中,康永锋、赵健、陈浩、赵静宜、孙雯君、李淑萍、刘子晨协助处理了本书的大部分图表,在此向他们表示感谢。

由于作者水平有限,而且微纳加工技术处在迅速发展,错误和不当之处在所难免,恳望读者不吝赐教并指正,以便在今后的修订工作中不断完善。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 微纳加工技术的意义	(1)
1.2 微电子和光电子工程与微纳加工技术的关系	(2)
1.3 平面工艺	(5)
1.4 本书内容	(6)
1.5 微细结构的其他应用领域	(9)
1.6 未来纳米结构和纳米加工	(13)
参考文献	(14)
第 2 章 光子、电子、离子和等离子体	(16)
2.1 光波与光子	(16)
2.1.1 微纳加工技术中的光源	(18)
2.1.2 几何光学的聚焦成像概念	(22)
2.1.3 光的衍射和聚焦成像分辨率的衍射限制	(26)
2.1.4 光学成像的波动理论	(30)
2.2 极紫外射线与 X 射线	(35)
2.2.1 极紫外射线与 X 射线的产生	(36)
2.2.2 极紫外线与 X 射线的控制	(45)
2.3 自由电子与电子束	(49)
2.3.1 电子发射	(49)
2.3.2 电子光学和电子束系统	(52)
2.3.3 电子枪	(65)
2.4 气体放电与等离子体	(68)
2.4.1 气体的电击穿	(68)
2.4.2 气体放电	(69)
2.4.3 等离子体	(73)
2.4.4 等离子体的电学性质	(76)
2.4.5 等离子体的化学作用	(80)
2.5 离子与离子源	(82)
2.5.1 概述	(82)
2.5.2 表面(热)电离离子源	(82)
2.5.3 场离子源	(83)
2.5.4 等离子体离子源	(86)
2.6 光子、电子及离子与物质的作用	(91)
2.6.1 光子的作用	(92)
2.6.2 X 射线与极紫外线光子的作用	(99)

2.6.3	电子的作用	(101)
2.6.4	离子相互作用	(108)
2.7	真空物理与技术概要	(113)
2.7.1	真空与低压气体的分子运动及气体流动	(113)
2.7.2	真空室内的吸气与放气过程	(116)
2.7.3	获得低压与真空的抽气技术	(118)
2.7.4	低压强与真空度的测量技术	(131)
	参考文献	(138)
第3章	微电子与光电子集成技术中常用的衬底与薄膜材料	(141)
3.1	晶体结构与性质	(142)
3.1.1	晶体的几何结构	(142)
3.1.2	晶体的电学性质	(146)
3.1.3	晶体的光学性质	(155)
3.2	半导体材料	(159)
3.2.1	元素半导体	(159)
3.2.2	III-V族化合物半导体	(165)
3.2.3	II-VI族化合物半导体	(172)
3.2.4	IV-IV族化合物半导体	(176)
3.3	介电材料	(179)
3.3.1	电介质材料	(179)
3.3.2	无源光电子材料	(181)
3.4	玻璃和聚合物	(189)
3.4.1	基本概念和术语	(189)
3.4.2	玻璃	(190)
3.4.3	聚合物	(197)
3.5	特殊微细结构及其有关材料	(198)
3.5.1	半导体超晶格结构	(198)
3.5.2	量子阱、量子线和量子点	(201)
3.5.3	碳纳米管及其薄膜	(203)
3.5.4	光子与声子晶体	(206)
	参考文献	(207)
第4章	微细图形技术	(210)
4.1	前言	(210)
4.2	光学光刻	(212)
4.2.1	接触式和接近式曝光光刻	(212)
4.2.2	投射式光刻	(214)
4.2.3	先进光学光刻技术和其他改进分辨率的方法	(224)
4.3	抗蚀胶	(239)
4.3.1	抗蚀胶曝光与显影的原理及类型	(239)

4.3.2	(曝光) 对比度曲线	(243)
4.3.3	涂敷和显影工艺	(244)
4.3.4	抗蚀胶的化学放大和对比度增强技术	(245)
4.4	X 射线光刻技术	(246)
4.4.1	概述	(246)
4.4.2	接近式 X 射线光刻系统及 X 射线光刻掩模板	(247)
4.4.3	投射式 X 射线光刻	(250)
4.5	极紫外线光刻	(252)
4.6	电子束光刻系统	(254)
4.6.1	概述	(254)
4.6.2	扫描电子束曝光系统	(255)
4.6.3	投射式电子束曝光光刻系统	(266)
4.6.4	电子束光刻的抗蚀胶	(269)
4.7	离子束光刻系统	(270)
4.8	纳米压印技术	(273)
4.9	LIGA 制造技术	(274)
	参考文献	(276)
第 5 章	蚀刻技术	(280)
5.1	引言	(280)
5.2	湿法(化学)蚀刻	(282)
5.3	等离子体溅射蚀刻	(287)
5.4	离子束蚀刻和离子铣	(292)
5.5	基于化学作用的等离子体蚀刻	(294)
5.6	光刻—蚀刻后的去胶	(302)
5.7	激光蚀刻	(304)
	参考文献	(310)
第 6 章	淀积	(312)
6.1	蒸发淀积	(312)
6.1.1	蒸发、升华和凝结	(312)
6.1.2	真空蒸发淀积及蒸发淀积装置	(315)
6.1.3	多组分薄膜的淀积	(318)
6.2	溅射淀积	(319)
6.2.1	阴极溅射	(319)
6.2.2	溅射淀积过程和淀积速率	(319)
6.2.3	溅射淀积设备	(321)
6.2.4	离子束溅射淀积	(324)
6.2.5	离子束直接淀积	(326)
6.2.6	离子镀	(327)
6.2.7	反应(离子束)溅射淀积	(328)

6.2.8 剥离法	(329)
6.3 化学气相淀积	(330)
6.3.1 概述	(330)
6.3.2 化学气相淀积的原理	(330)
6.3.3 化学气相淀积装置	(332)
6.4 等离子体、光和电子束增强化学气相淀积	(333)
6.4.1 等离子体增强化学气相淀积	(333)
6.4.2 光(增强)化学气相淀积	(335)
6.4.3 电子束感应化学气相淀积	(335)
6.5 其他薄膜成膜技术	(336)
6.5.1 电化学淀积	(336)
6.5.2 脉冲激光淀积法	(337)
6.5.3 溶胶-凝胶法	(339)
6.5.4 自组合法	(352)
6.6 薄膜厚度的测量方法	(359)
6.6.1 薄膜厚度的光学测量方法	(359)
6.6.2 薄膜厚度的电学测量方法	(363)
6.6.3 薄膜厚度的机械测量方法	(364)
参考文献	(367)
第7章 外延生长	(369)
7.1 概述	(369)
7.1.1 外延生长	(369)
7.1.2 外延生长的过程	(371)
7.1.3 外延生长层的结构形式	(376)
7.1.4 液相外延生长	(379)
7.2 分子束外延	(380)
7.2.1 概述	(380)
7.2.2 分子束外延生长的薄膜	(381)
7.2.3 分子束外延设备	(383)
7.2.4 离化团粒束外延生长	(389)
7.3 金属有机化合物气相外延生长	(391)
7.3.1 概述	(391)
7.3.2 选择式金属有机化合物气相外延晶体生长技术	(393)
7.4 激光化学气相外延生长	(396)
参考文献	(397)
第8章 微纳加工中的特殊工艺过程	(399)
8.1 氧化	(399)
8.1.1 概述	(399)
8.1.2 硅的热氧化过程及氧化层的性质	(400)

8.1.3	热氧化设备	(404)
8.1.4	等离子体氧化	(405)
8.2	扩散	(406)
8.2.1	概述	(406)
8.2.2	扩散方程	(407)
8.2.3	固相扩散的物理模型	(408)
8.2.4	扩散方程的解析解	(409)
8.2.5	场增强扩散	(411)
8.2.6	扩散设备	(412)
8.2.7	杂质的密度和分布的分析	(413)
8.2.8	离子交换与质子交换	(416)
8.3	离子注入掺杂	(418)
8.3.1	概述	(418)
8.3.2	离子注入设备	(419)
8.3.3	离子注入过程	(421)
8.3.4	离子注入的沟道效应	(424)
8.3.5	离子注入的辐射损伤	(426)
8.3.6	退火	(428)
8.3.7	激光束与电子束退火	(429)
8.4	化学机械研磨平坦化技术	(430)
	参考文献	(433)
第 9 章	微细结构的微分析和表征	(434)
9.1	光学及激光方法	(434)
9.1.1	光学显微镜	(434)
9.1.2	激光扫描共焦显微镜	(436)
9.1.3	基于干涉计量的激光测量仪器	(438)
9.1.4	激光扫描故障检测系统	(440)
9.2	电子显微镜和微分析方法	(443)
9.2.1	概述	(443)
9.2.2	透射电子显微镜	(444)
9.2.3	扫描电子显微镜	(463)
9.2.4	表面电子束点阵结构分析方法	(479)
9.3	声学方法	(482)
9.3.1	概述	(482)
9.3.2	扫描声学显微镜	(482)
9.3.3	扫描电子声学显微镜	(483)
9.4	扫描探针显微镜	(484)
9.4.1	扫描隧道显微镜	(485)
9.4.2	原子力显微镜	(494)

9.4.3 扫描近场光学显微镜	(498)
9.4.4 扫描弹道电子发射显微镜	(501)
参考文献	(504)
附录	(506)
附录 A 缩略语表	(506)
附录 B 部分专业术语中英文对照表	(508)
附录 C 基本物理常数	(510)
附录 D 几种常用单位的换算	(510)
附录 E 主要符号表	(511)
附录 F 金属元素的蒸气压和蒸发速率	(512)
附录 G 化合物的蒸气压、熔点和蒸气成分	(515)
附录 H 32 种点群的平衡态性质矩阵	(521)

第1章 绪 论

1.1 微纳加工技术的意义

几何尺度达到以微米和纳米计量的微细加工（或称微纳加工），对于现代科学技术有重大的意义。本书论述微米与纳米尺度加工所涉及的基本科学原理，并对其主要技术手段及仪器设备进行简要的论述。

为了对微米与纳米加工的尺度及其加工精度形成一个直观的概念，我们来考察一下目前自然界及工程技术中有关“微细”的尺度，可以从表 1.1 中得到一个相关数量级的概念。

表 1.1 一些微细物质及其尺度

肉眼可分辨的最小尺度	0.1~0.2 mm（游标尺分辨到 0.05 mm）
细菌	1 μm （光学显微镜极限分辨率为 0.2~0.5 μm ）
可见光波波长	400~760 nm
病毒	20~400 nm
原子、晶体中原子间距	零点几纳米（处于软 X 射线的波长范围）

微纳电子技术与微纳光子技术加工所涉及的尺度，经历了从传统的微细加工尺寸（如钟表元件的加工尺度），到大规模集成电路的复杂系统，其特征尺寸存在一个 3 μm —1 μm —0.3 μm —130 nm—90 nm—65 nm—45 nm—32 nm 的快速发展过程，目前已涉及 22 nm 以下的结构。考虑到单个原子的尺度为零点几纳米，固体中原子之间的间距也只有零点几纳米，所以，现代微纳加工已进入到物理学的微观与介观领域，在有的微纳结构的尺度范围内只包含了有限的几十至几百个原子，这种有限原子体系作为材料的性质常常显示出尺度或者量子效应，其机械、热学、电学和光学等方面的性质都与宏观的体材料有显著的区别。

现代微电子与光子技术涉及的不仅有微米及纳米尺度的个别微纳结构，而且涉及非常复杂、庞大的系统。实现这种系统，通常还要经历互相关联的多次微纳加工及其他处理过程，所以对微纳结构的几何形状的精密度、微纳结构边缘的均匀和光滑程度以及微纳结构不同层次的对准精度都有很高的要求。例如对于微电子集成电路，上述加工的几何量值精度及其对准（套刻）精度，要求达到集成电路线宽的几分之一；光波导与集成光路要求某些结构边沿高度平整，其边沿平整的精确度则要求高出特征线宽多个数量级。

微纳结构的其他应用，如微传感器、微机械、微光电机机械、微系统、显示量子效应

的电子与光子器件等,虽然其复杂程度与加工的微细程度各不相同,但是通常都具有多种材料及结构功能,对微纳结构加工也提出了多种技术要求,它们的发展也推动了微纳加工技术的发展。

微纳加工技术的基本手段包括微纳加工方法与材料科学方法两种。本书以论述微纳加工方法为主,涉及材料科学的某些方法,对于定向晶体生长和各向异性蚀刻、纳米结构的自组织生长等作简要的介绍。

虽然微纳加工技术与微电子工艺技术有密切的关系,但是鉴于现代微电子工艺技术的复杂性和本书的论述范围,本书以有关微纳结构的微纳加工方法的科学原理为主,不对各种集成电路及其材料制备和器件工艺进行具体的讨论。

微纳加工是形成不久的新学科,也是涉及多种自然科学和工程技术的“边缘”交叉学科。因此,为了充分理解微纳加工的科学原理,本书将对多方面的基础科学知识作简要的介绍,其中包括:

(1) 固体理论与材料科学^[1]: 晶体结构,晶体的物理性质与晶体结构的关系,晶体的生长。

(2) 光学^[2]: 几何光学——聚焦与成像,波动光学——光的干涉、衍射、波动光学聚焦成像理论,成像分辨率的衍射限制,紫外射线与 X 射线的发生和控制,光源与激光器。

(3) 真空科学技术与电子物理学^[3-7]:

- 真空技术: 气体分子运动论与气流输运,固相材料及其表面与气相原子分子的作用——气体的吸附与吸收,气流中原子分子的输运,物质的蒸发与凝结,真空的获得与计量;
- 电子物理: 电子发射、电子运动与电子光学,气体放电与等离子体物理及化学,离子源,高能运动自由电子的电磁辐射;
- 薄膜技术: 薄膜的淀积形成与晶体生长;
- 原子物理: 光子、电子、离子与固态物质的相互作用。

(4) 现代光学、电子显微与微分析技术^[8, 9]。

(5) 某些化学与电化学问题^[10-12]。

1.2 微电子和光电子工程与微纳加工技术的关系

微电子技术的发展进程,经历了以下技术发展阶段。

1. 锗技术

锗是最早使用的半导体材料,1947 年诞生的首个点接触二极管便是由多晶锗制作的。半导体技术的早期研究开发涉及晶体半导体材料的净化、单晶制备、可控掺杂、生长结与合金结等技术,在此基础上双极型晶体管研发成功,并在 20 世纪 50 年代实现商品化。

2. 硅平面工艺技术

作为半导体材料，硅的表面容易形成致密非晶态氧化层（ SiO_2 ），此薄膜可兼用做绝缘和表面保护层；而且，由于硅半导体器件的掺杂元素在 SiO_2 中的扩散速率比在硅中的扩散速率低得多，所以 SiO_2 层可以屏蔽掉器件中的杂质扩散。这些优越性能和后来硅芯片的硅平面工艺技术的发明，使得硅平面工艺技术发展成为微电子工艺的主流技术。由于该技术结合了以一个衬底上的多层薄膜结构为特征的微细结构加工手段和光刻工艺，因此硅平面技术也成为现代微纳加工的一种主流技术。这些技术已经逐步扩展到微电子以外的其他技术领域^[13-17]。

3. 化合物半导体（砷化镓等）技术

随着对高速半导体器件、微波器件和光电子器件需求的提高，要求使用具有高电子迁移率和直接带隙的半导体材料。进而，一些化合物半导体材料受到了重视，且以其为基础，人们发展了具有特殊层结构的超晶格和量子阱，以及量子点与量子线等低维半导体结构。这些化合物半导体材料和特殊微细结构，在微波、光电子器件、集成光学方面起到了重大作用，也推进了微纳结构及其加工的研究和技术进展。

4. SiC, C 等技术

SiC, C 等技术涉及了近年来应用于高温和特殊应用的半导体器件和系统的新型半导体材料及相关的工艺技术。现代微电子技术发展非常迅速，还有多个其他技术发展领域，包括绝缘衬底上的硅系统，以碳纳米管为基础的半导体微器件和系统，等等。这些领域的研究与发展也反过来对微纳加工技术的发展提出了新的要求，促进了其发展。

5. 集成光电子技术

光子与电子同样是现代信息技术中信息的主要物理载体。随着对信息高速度以及大容量信息存储、传输和处理的需求，光电子技术的重要性越来越突出。为了将光电子或者光子信息器件集成化，除了使用上述化合物半导体做器件基础材料以外，在无源与混合型集成光路中还使用功能介质材料，如 LiNbO_3 衬底、蓝宝石衬底等。同时，也发展了相应的微纳结构及其加工技术^[18]。

为了对硅平面工艺技术及相应的微纳加工方法形成初步的认识，我们来考察硅器件与集成电路的主要构成元素——双极半导体晶体管与金属氧化物半导体器件（MOS）涉及的微纳结构。

1) 双极晶体管（bipolar junction transistor, BJT）

双极晶体管是由两个相互耦合的 PN 结形成的，构成在一个单块的半导体材料衬底上，它是具有阻抗变换性能并具有信号增益的半导体器件。双极晶体管有两种不同类型，即 PNP 型晶体管和 NPN 型晶体管，其电极分别称为基极、发射极和集电极。双极晶体管的基本结构如图 1.1 所示。

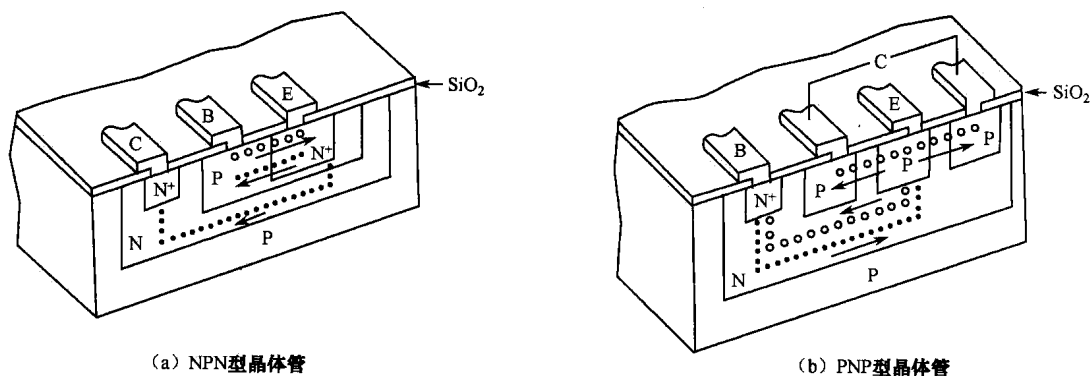


图 1.1 双极晶体管的基本结构

2) MOS 器件和互补 MOS 器件

从 20 世纪 70 年代后期开始, 能源消耗成为所有工程技术关注的重要问题, 因此低能耗的场效应晶体管 (field effect transistor, FET) 得到重大的发展。场效应晶体管 (FET) 的物理作用与真空电子管有某种相似, 它是电压放大型的, 具有低功耗与低电压的优势, 而且它的三个电极 (源、栅和漏) 都是直接在单晶衬底上制作的。所以其集成工艺相对简单, 非常适合用来构成超大规模集成电路。FET 通过栅极电压控制电流通路区——沟道内电流的流通, 它又分为结型 (junction FET, JFET) 和金属氧化物型 (metal-oxide semiconductor FET, MOSFET)。其中 MOSFET 应用更为广泛, 其栅极由一层二氧化硅薄膜将它与其他两个电极及电流通路区隔离开来。MOSFET 又分为两类: NMOS (N 型半导体作为沟道材料) 和 PMOS (P 型半导体作为沟道材料)。MOS 器件的基本结构原理图如图 1.2 所示。

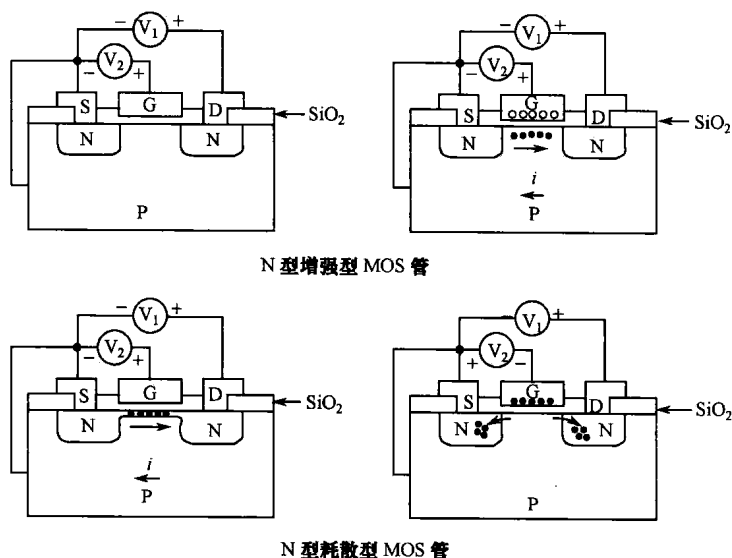


图 1.2 MOS 器件基本结构原理图

互补金属氧化物器件 (complement MOS, CMOS) 是 NMOS 与 PMOS FET 器件串接

构成的电路单元形式。从 20 世纪 80 年代起, 功耗、设计等比缩放技术和集成制造技术等方面的研究进展, 使 CMOS 成了最普遍的大规模集成电路的基本器件构成形式。

与双极晶体管相比, MOS 不需要一些绝缘隔离层, 可以具有更高的集成密度; 其次, 所需的工艺步骤也较少。所以, 它是现代大规模集成电路的主要器件构成形式。

3) 集成电路与微系统

集成电路及微系统, 需要在一个芯片(衬底)上制作大量无源和有源元器件, 构成具有完整功能的电子电路, 以及整套的电子和光电子系统, 其中含有互连和多层结构(如 7 层结构), 最后还必须封装。典型的集成电路产品的例子, 比如计算机里配置的微处理器(micro processor unit, MPU)、只读存储器(read only memory, ROM)和随机存储器(random access memory, RAM)、通信界面芯片、视频控制芯片和磁盘驱动芯片, 以及各种数码产品与计算机配合使用的快闪存储器和各种信息控制技术里的运算放大器、专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)、可编程逻辑器件(programmable logic device, PLD)、可编程阵列逻辑(programmable array logic, PAL)集成电路、可编程逻辑阵列(programmable logic array, PLA)、掩模可编程门阵列(mask programmable gate array, MPGA)芯片和现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)等。图 1.3 是一个实际集成电路的部分剖面显微照片图^[19], 从中可看出它复杂的分层微细结构。

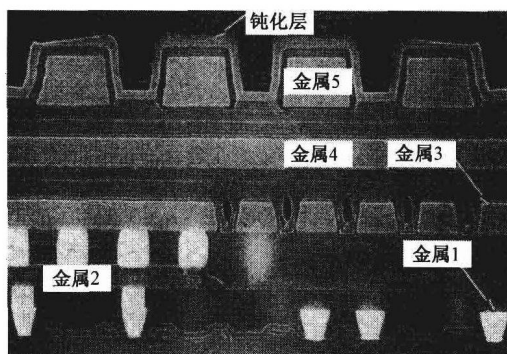


图 1.3 一个实际集成电路的部分剖面显微照片

微电子技术的上述发展进程, 是电子元器件从宏观单体元器件发展到细节结构尺度达到几十纳米的、包含极大量元器件的电子信息系统的过程。它使人类步入了信息化的社会, 同时也推动了微加工(微米加工、纳米加工)技术学科的形成和发展。目前, 微纳加工的应用领域已远远超出微电子技术的范围, 并有不断扩大的趋势。微电子技术范围以外的微纳加工研究也丰富和发展了微加工技术, 使其成为一门具有丰富内涵和广阔应用领域的新兴技术科学学科。

1.3 平面工艺

平面工艺用于在一个衬底(如硅)上制备具有微细图样的多层层状(薄膜)微细结构; 它可以一层套一层, 各层由具有不同电性质的不同材料组成, 层间具有对应的位置

关系和电连接。这些多层结构可以形成不同电路元件——二极管、晶体管、电容器、互连导线等的结构，这些结构再通过掺杂、氧化等器件处理工艺加以改性，最终形成集成电路。

一个典型的制备 PN 结的平面工艺过程包括：硅晶片（圆片）制备—氧化（形成约 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 薄膜）—涂覆光抗蚀胶（约 $1\ \mu\text{m}$ 厚度）—在不透明掩模下曝光（负胶曝光部位抗蚀胶硬化）—显影、去除掩模下部抗蚀胶—蚀刻、去除掩模下的 SiO_2 （使用 $\text{NH}_4\text{F}+\text{HF}$ 溶液做腐蚀剂）—去胶（ H_2SO_4 去除曝光部位的抗蚀胶）—掺杂（通过掺入杂质原子生成 P 型硅并形成 PN 结）。

典型的制备 PN 结的平面工艺过程如图 1.4 所示，本书的微纳加工技术部分都将涉及这些工艺步骤。

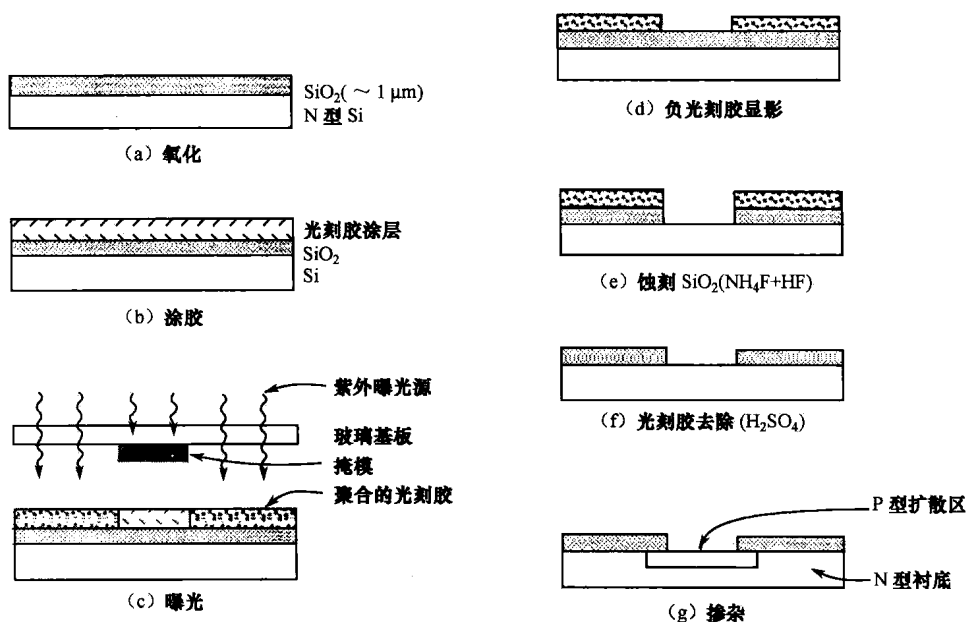


图 1.4 典型的制备 PN 结的平面工艺过程

1.4 本书内容

本书围绕微纳加工的科学原理及其主要材料、工艺和设备进行论述，包含以下内容。

1. 微纳加工的基础知识

- 光波与光子：电磁波谱，衍射，光学相干性，波动光学聚焦成像理论，产生和控制短波长（高能量）极紫外线和 X 射线光子的方法；
- 电子与电子束：电子发射，电子枪，电子束的聚焦、成像和偏转；
- 气体放电与等离子体：气体放电，等离子体，等离子体的化学性质；
- 离子与离子束：离子源，聚焦离子束系统；
- 光子、电子和离子与固体物质的相互作用；

- 真空科学基本知识，包括真空的获得与测量。

2. 主要的衬底材料

- 半导体材料；
- 其他材料。

3. 主要的加工技术

(1) 微纳图形的掩模 (mask) 制备：

- 手工制备原图 (artwork) 和多次缩版 (如 500 倍，实际的芯片图形只有毫米尺度)，采用放大的原图便于操作，减少误差；
- 电子束曝光制版：高分辨率、计算机辅助图形制作。

(2) 微纳图形形成——曝光光刻 (exposure lithography)：

- 接近式曝光；
- 近贴式曝光 (接触曝光)；
- 投射式光学曝光：1:1 投射方式，步进 (step-and-repeat) 缩倍投射系统；
- 先进的光学光刻和掩模技术；
- 紫外线曝光——准分子激光光源；
- X 射线与极紫外线曝光；
- 投射式电子束与离子束曝光；
- 微纳 (机械) 印制技术 (imprint lithography)；

(3) 微纳图形在转移中的曝光、显影和去胶过程：

- 光抗蚀胶 (resist)、电子抗蚀胶和 X 射线抗蚀胶；
- 曝光过程；
- 正胶和负胶。

(4) 薄膜淀积 (film deposition)：

- 真空蒸发镀膜；
- 阴极溅射镀膜；
- 等离子体和离子镀膜；
- 化学气相淀积；
- 电化学淀积；
- 脉冲激光淀积；
- 溶胶—凝胶方法；
- 自组装方法。

(5) 蚀刻 (etching) 技术——选择性去除材料层：

- 湿法——化学和电化学腐蚀，通常利用化学反应与电化学反应，使用多种蚀刻溶液，例如： $\text{SiO}_2\text{-HF}$ ， $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-H}_3\text{PO}_4$ ， $\text{Al-H}_3\text{PO}_4/\text{HNO}_3/\text{CH}_2\text{H}_3\text{O}_2$ ， $\text{Si-HNO}_3/\text{HF}$ ；
- 干法——溅射蚀刻，离子束蚀刻，反应离子蚀刻，激光蚀刻；
- 各向异性蚀刻和牺牲层技术；