



功能薄膜及其沉积 制备技术

Functional Thin Films and Deposition Technology

戴达煌 代明江 侯惠君 等编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

功能薄膜及其沉积制备技术

戴达煌 代明江 侯惠君 编著
林松盛 宋进兵 王 翔

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2013

内 容 提 要

本书结合功能薄膜的特点和工程应用与发展实际,概要地讲述了薄膜的含义、特征和分类及功能薄膜设计的原则;重点讲述了气相沉积、三束材料表面改性、复合处理等先进功能薄膜沉积制备方法、原理、工艺特点及适用的领域;在装饰与机械功能薄膜中,讲述了主要膜系、膜系的设计原则,并分别列举了装饰与机械功能膜的典型应用及发展趋势;在物理和特殊功能薄膜中,讲述了微电子、电磁、光学、光电子、集成光学等功能薄膜以及几种特殊的功能薄膜的特点及其典型的应用;最后扼要地介绍了微细加工技术、微机电系统加工的特点、典型器件与系统的新应用等内容。全书内容系统,深入浅出地介绍了一些新构思、新材料、新器件所实现的工程应用。

本书可供从事材料表面技术与工程、薄膜材料工艺与应用研究、设计、制造、管理的科技人员参考,也可供高等院校材料专业和相近专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

功能薄膜及其沉积制备技术/戴达煌等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-5024-6026-6

I. ①功… II. ①戴… III. ①功能材料—薄膜技术
IV. ①TB43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 205223 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 刘 倩 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6026-6

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版, 2013 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 33.25 印张; 805 千字; 516 页

99.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

现代材料表面科学与技术是在现代物理、化学、材料学、电子学、机械学等多种学科最新知识集成基础上发展起来的一门新兴的、综合性强、应用面广的先进科学技术，同时又是极具发展前景的多学科交叉的边缘学科。

通过表面状态的改变，不仅可以提高部件材料的耐磨损、耐腐蚀、抗高温氧化和抗疲劳性能，从而提高部件的可靠性、安全性，延长使用寿命，同时还可以通过表面技术赋予材料或部件特殊的声、光、电、磁、热等性能，使人们可以产生新的构思，创造新的材料、新的器件，以满足国民经济和国防建设的需要。

现代表面技术在国民经济中是实现可持续发展、节约资源、节约能源、保护环境的重要手段，其中的薄膜技术更是实现器件小型化和多功能化最重要的技术之一。

功能薄膜是现代表面科学与技术中的重要组成部分，它已广泛地应用在微电子行业（超大规模集成电路、微电子器件、大容量高存储密度的芯片元件）、精密机械制造、生物医学材料、新能源（太阳能薄膜电池、燃料电池）、半导体照明（MOCVD技术的应用）、航空航天等国民经济的重要领域。功能薄膜在实现材料发展的复合化、多功能化、轻量化、智能化方面显示出了独特的优势，已成为材料科学研究和应用的热点领域。

本书的编著者，25年来一直从事薄膜材料的研究，是这方面工作在一线的专家，取得了许多高水平的研究与应用成果，获得过近20项国家级、省部级科技进步奖，在这一领域做出了卓有成效的业绩。他们对目前国内外相对成熟的功能薄膜的性能、沉积制备技术、应用和一些新的功能进行了论述，把多年积累的知识和经验，以自身和他人的科学研究和实践为基础，对国内外的成果做了比较系统的整理，总结形成了较为系统的、新颖的、全面的《功能薄膜及其沉积制备技术》一书，献给读者。我认为这是很有意义的工作，它有益于推动发展我国现代材料表面技术科学领域的进步和应用，该书对从事薄膜性能与工艺研究及推广应用的科技人员、薄膜设计的工程技术人员是一本有价值的参考资料，对相关材料专业的学生也是一本实用的专业教科书和参考书。

中国工程院院士



2012年3月

前 言

20 多年来，作为特殊形态的薄膜及其沉积制备技术获得了迅速发展。在 20 世纪 60 ~ 80 年代期间，电子、真空、冶金、物理、化学、机械等学科的最新知识和电子束、激光束、离子束、等离子体、微波、超声速等离子体的最新成果被逐步引用到薄膜材料与工程应用后，各种装饰、机械、物理和特殊的功能薄膜已把材料表面性能改造成人们期望的各种功能，特别是一些新型的功能薄膜，已成为当代微电子、光电子、磁电子、刀具超硬化、太阳能利用、传感器、电子物理器件、计算机、通信、微机电系统、光学、电学、磁学、声学等新兴交叉学科和高新产品的材料基础，并广泛渗透到当代众多科学技术的各个领域，成为材料科学研究与应用的热点。令人瞩目的成果，有力地证明了功能薄膜材料的快速发展。

随着材料表面功能的不断改善，各种新的成膜方法不断涌现，特别是现代材料表面功能薄膜沉积制备新技术、新方法的开发，已从过去单一的蒸发镀膜发展到包括蒸发镀、离子镀、溅射镀、化学气相沉积、等离子辅助化学气相沉积、有机化学气相沉积、分子束外延、离子注入、微波电子回旋等众多先进的沉积功能薄膜的技术及离子刻蚀、反应离子刻蚀、离子束混合和多种技术相复合的复合技术、微细加工技术。由于这些技术的不断创新，为新型功能薄膜的大量涌现提供了技术保证，诸如纳米薄膜、量子线、量子点等低维材料、大规模集成电路用 Cu 布线材料，巨磁电阻薄膜、大禁宽度的电子学半导体材料、发蓝光的光电子材料、透明导电氧化物薄膜以及包括金刚石薄膜在内的超硬薄膜等。这些新型功能薄膜的出现，为探索薄膜功能在纳米尺度内的新现象、新规律，开发材料新

特性、新功能，提高集成电路集成度，提高信息存储记录密度，扩大半导体材料的新应用和电子元器件的高可靠性，改善材料的耐磨、耐蚀、抗高温氧化性能等起到了不可低估的作用。当今它的应用已渗透到国民经济、国防建设和人民生活各个领域，并对一大批高新技术产业的发展起着支撑和先导作用，同时也推动着传统机械、冶金、石化、轻工、能源、建材、电子等传统工业的产品结构调整和升级换代。加上薄膜技术本身就是一门高新技术，它也是探索物质秘密，制备及分析特异成分、组织和晶体结构的有力手段，从理论到实际应用，都为材料表面保护、新型功能薄膜材料的揭示、展现乃至应用提供坚实的基础。在新世纪里，功能薄膜及其沉积制备技术的潜在应用前景将会吸引更多的跨学科的科技工作者的投入，我们相信，功能薄膜及其沉积制备技术是一门正在蓬勃发展的先进的新兴技术，特别在解决材料发展的复合化、轻量化、多功能化、智能化方面尤为突出。各种性能优异、功能独特的薄膜新材料在工业技术进步的高新技术应用发展中，必将发挥独特的优势和促进作用。

本书以功能薄膜和现代表面沉积技术为重点，结合薄膜的特点与工程应用的发展实际，概要地讲述了薄膜的含义、特征和分类及功能薄膜的选择设计原则和发展趋势；在薄膜沉积技术中，重点讲了化学和物理气相沉积、三束材料表面改性、复合处理等先进功能薄膜沉积制备的方法、原理、工艺特点及适用的技术领域；在装饰功能薄膜中，讲述了装饰膜的主要膜系，膜系设计的主要原则，重点列举了仿金与彩色、幕墙玻璃、塑料金属化、彩虹薄膜与镀铝纸等装饰薄膜的应用；在机械功能薄膜中，讲述了机械功能膜的主要膜系与设计膜系的基本原则，重点讲了氮化物、碳化物、硼化物、硅化物、金属、金属合金及超硬膜的性能、特点及其在工业上的典型应用与发展；在物理功能薄膜中，重点讲述了微电子功能、电磁功能、光学功能、光电子功能、集成光学功能薄膜的性能、特点和

适宜的应用，重点列举了典型工业应用实例；在特殊功能膜中，扼要地介绍了几种特殊的功能膜的性能特点及其应用；最后简明介绍了微细加工及微机电系统加工技术的特点、典型器件与系统的新应用等内容。全书内容新颖、系统齐全、涉及面广，有些内容和技术研究属于前沿资料，其中有部分是我们 25 年来的研究成果，并着力贯穿一些新的构思、新的材料和新器件所实现的工程应用，力求做到深入浅出，通俗易懂。

全书总体思路由戴达煌、代明江提出。第 1 章由戴达煌编写，第 2 章由代明江编写，第 3、4 章由侯惠君、林松盛编写，第 5、6 章由宋进兵编写，第 7 章由戴达煌、王翔编写。代明江、戴达煌、宋进兵审阅并统稿了全书。宋进兵、胡芳负责了全书校对、绘图等工作。书中引用了一些国内外学者的著作、论文的观点和论述的成果，在此表达我们深深的谢意。

衷心感谢中国工程院院士、我国材料表面技术与工程专家周克崧先生为本书作序。同时在编写过程中，也得到了广州有色金属研究院领导的支持和材料表面工程研究所同事们的帮助，在此表示我们衷心的感谢。

衷心感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的经费资助。

功能薄膜及其沉积制备技术发展迅速，涉及的内容与应用新颖、宽广，加上编写时间有限，编者水平所限，书中不足之处恳请读者批评指正。

广东省工业技术研究院（广州有色金属研究院）
新材料研究所

戴达煌 代明江

2012 年 10 月于广州

目 录

1 绪论	1
1.1 薄膜的含义及特征	1
1.1.1 薄膜的含义	1
1.1.2 薄膜学的主要研究内容	2
1.1.3 功能薄膜的分类	2
1.1.4 薄膜材料的特殊性	4
1.1.5 薄膜材料的结构与缺陷	8
1.1.6 薄膜材料的性质与应用	9
1.2 功能薄膜材料的选择与设计	10
1.2.1 装饰功能薄膜	10
1.2.2 机械功能薄膜	12
1.2.3 物理功能薄膜	17
1.2.4 特殊功能薄膜	19
1.2.5 微电子机械系统制备技术与所用的功能薄膜	20
1.3 功能薄膜材料的发展趋势	20
1.3.1 功能薄膜材料小型化、多功能化和高度集成化	21
1.3.2 各类功能薄膜材料的发展	22
1.3.3 功能薄膜沉积制备技术的发展	24
1.3.4 功能薄膜表征技术的发展	25
参考文献	26
2 功能薄膜的沉积制备方法	27
2.1 概述	27
2.1.1 装饰功能薄膜的沉积制备方法	27
2.1.2 机械功能薄膜的沉积制备方法	28
2.1.3 物理功能薄膜的沉积制备方法	28
2.1.4 特殊功能薄膜的沉积制备方法	29
2.2 化学气相沉积技术	30
2.2.1 化学气相沉积的原理	30
2.2.2 热激发化学气相沉积	32
2.2.3 常压和低压化学气相沉积	32
2.2.4 等离子体增强化学气相沉积	33

2.2.5	激光化学气相沉积	42
2.2.6	微波等离子体化学气相沉积	46
2.2.7	金属有机化学气相沉积	48
2.3	分子束外延技术	55
2.3.1	分子束外延的特点	55
2.3.2	分子束外延的原理	55
2.3.3	分子束外延装置与分类	56
2.3.4	分子束外延的生长工艺	58
2.3.5	分子束外延的应用	58
2.4	现代材料表面改性技术	58
2.4.1	电子束与材料表面改性技术	59
2.4.2	激光束与材料表面改性技术	67
2.4.3	离子注入与材料表面改性技术	90
2.4.4	离子团束沉积技术	111
2.5	物理气相沉积技术	116
2.5.1	真空蒸发镀膜技术	118
2.5.2	溅射镀膜技术	127
2.5.3	离子镀膜技术	141
2.6	新型镀制功能薄膜的复合镀膜技术	167
2.6.1	磁控溅射与阴极多弧离子镀膜技术的复合	167
2.6.2	金属离子源与离子镀技术的复合	168
2.6.3	离子束辅助沉积技术	169
2.6.4	多种表面技术沉积制备多层复合膜层	171
	参考文献	172
3	装饰功能薄膜	176
3.1	概述	176
3.2	装饰功能膜的主要膜系	176
3.3	装饰功能膜系设计的主要原则	177
3.3.1	颜色	177
3.3.2	明度	177
3.3.3	耐腐蚀性	178
3.3.4	耐磨性	178
3.4	彩色装饰膜	178
3.4.1	颜色	179
3.4.2	光亮度	182
3.4.3	耐腐蚀性	182
3.4.4	耐磨性	183
3.4.5	典型的镀制工艺	183

3.5 玻璃装饰功能膜	186
3.5.1 幕墙玻璃装饰膜的基本功能	186
3.5.2 玻璃镀膜的材料与颜色	188
3.5.3 镀膜玻璃的硬度和耐磨性	190
3.5.4 智能窗玻璃	191
3.5.5 防雾防露和自清洁镀膜玻璃	194
3.6 塑料金属化装饰膜和七彩膜	194
3.6.1 塑料金属化装饰膜	194
3.6.2 七彩装饰膜	196
3.7 包装装潢用装饰膜	196
3.7.1 仿金属装潢的包装膜	196
3.7.2 服饰用金银线	196
3.7.3 电化铝箔	197
3.7.4 高档食品用真空镀铝复合包装材料	197
3.7.5 SiO_x 和 Al_2O_3 透明阻隔膜	198
3.8 彩虹薄膜与镀铝纸	198
3.8.1 彩虹薄膜	198
3.8.2 镀铝纸	199
3.9 大面积装饰镀膜生产中应注意的技术	201
参考文献	201
4 机械功能薄膜	203
4.1 概述	203
4.2 机械功能薄膜的主要膜系与设计膜层的原则	204
4.2.1 主要膜系	204
4.2.2 设计选择膜层的基本原则	205
4.3 氮化物系	207
4.3.1 TiN	208
4.3.2 ZrN	212
4.3.3 CrN	213
4.3.4 (Ti, Al)N	214
4.3.5 (Cr, Ti, Al)N	218
4.4 碳化物系	226
4.4.1 TiC	226
4.4.2 Cr-C	227
4.4.3 W-C	228
4.5 硼化物与硅化物系	229
4.5.1 硼化物 (TiB_2 、 ZrB_2) 系	229
4.5.2 硅化物 (WSi_2 、 MoSi_2 、 TaSi_2 、 TiSi_2) 系	231

4.6 金属与合金系	232
4.6.1 金属与合金薄膜	232
4.6.2 金属与合金膜用靶材	235
4.6.3 金属元素用作注入离子来提高材料表层的性能	235
4.6.4 金属与合金作薄膜材料的中间过渡层	237
4.6.5 其他作用	238
4.7 超硬薄膜	238
4.7.1 金刚石膜	239
4.7.2 类金刚石膜	257
4.7.3 β - C_3N_4 超硬膜	270
4.7.4 纳米晶 Ti-Si-N 薄膜	274
4.7.5 纳米多层膜	276
4.7.6 多层 Ti/TiN/Zr/ZrN 耐磨抗冲刷膜	282
4.8 机械功能薄膜的主要工业应用	286
4.8.1 机械功能薄膜的超硬耐磨性的主要工业应用	286
4.8.2 机械功能薄膜(涂层)的防护性能主要工业应用	297
4.8.3 在酸和熔融态金属及盐中的工业应用	299
4.8.4 机械功能膜在特殊环境中的应用	300
4.9 机械功能薄膜的发展	302
4.9.1 新型的金属陶瓷薄膜涂层	302
4.9.2 多元复合薄膜	303
4.9.3 多层复合薄膜	304
4.9.4 纳米薄膜	306
4.9.5 纳米晶-非晶复合薄膜	306
4.9.6 非金属超硬薄膜	306
参考文献	307
5 物理功能薄膜	310
5.1 概述	310
5.2 微电子功能薄膜	310
5.2.1 半导体薄膜	311
5.2.2 介质薄膜	316
5.2.3 导电薄膜	321
5.2.4 电阻薄膜	330
5.3 电磁功能薄膜	333
5.3.1 高温超导薄膜	333
5.3.2 压电薄膜	339
5.3.3 铁电薄膜	343
5.3.4 磁性薄膜	347

5.4 光学功能薄膜	356
5.4.1 基本光学薄膜	356
5.4.2 控光薄膜	361
5.4.3 光学薄膜材料	367
5.5 光电子功能薄膜	372
5.5.1 薄膜光电探测器	373
5.5.2 光电池薄膜	377
5.5.3 光敏电阻薄膜	379
5.5.4 光电导摄像靶薄膜	381
5.5.5 透明导电氧化物薄膜	384
5.6 集成光学功能薄膜	389
5.6.1 光波导薄膜	389
5.6.2 光开关薄膜	392
5.6.3 光调制(光偏转)薄膜	393
5.7 物理功能薄膜的应用	395
5.7.1 物理功能薄膜在微电子器件和集成电路中的应用	395
5.7.2 物理功能薄膜在光学器件上的应用	400
5.7.3 物理功能薄膜在光电子器件上的应用	408
5.7.4 物理功能薄膜在太阳能电池上的应用	422
5.7.5 物理功能薄膜在传感器上的应用	426
参考文献	431
6 特殊功能薄膜	434
6.1 导弹雷达整流罩用的高温耐磨与透光功能薄膜	434
6.2 超高真空中的润滑用的功能薄膜	435
6.3 超固体润滑功能薄膜	436
6.4 航空航天用关键材料表面改性的特殊功效功能薄膜	438
6.5 多功能用途的金刚石膜和类金刚石膜	439
6.6 耐高压天然气冲蚀的密封面材料	441
6.6.1 天然气田工况对部件的性能要求和国外设计采用的基材和密封面材质	441
6.6.2 钛合金表面生成 $10\mu\text{m}$ 的化合物 TiN 层作高压天然气的冲蚀与密封材料	441
6.6.3 离子氮化后钛合金(材)表面生成的扩散层与 TiN 化合物层的性能与应用	441
6.7 热沉材料	444
6.8 高温条件下的耐磨功能薄膜	446
6.9 射线环境下的润滑与耐磨和核反应堆相关重要部件的涂层	446
6.10 超晶格特殊功能薄膜	447
参考文献	448

7 材料表面微细加工技术及其在微机电系统中的应用	449
7.1 概述	449
7.2 表面微细加工技术	449
7.2.1 光刻加工	449
7.2.2 电子束微细加工	453
7.2.3 离子束微细加工	455
7.2.4 激光束微细加工	459
7.2.5 超声微细加工	460
7.2.6 电火花微细加工	462
7.2.7 电解微细加工	463
7.2.8 微电铸加工	464
7.2.9 LIGA 技术加工	465
7.2.10 准 LIGA 技术加工	472
7.2.11 扫描探针显微镜纳米精密加工	472
7.3 微细加工技术在微电子先进新技术中的应用	475
7.3.1 微电子微细加工技术	475
7.3.2 微电子微细加工技术的应用	478
7.4 微细加工在微机械器件、微机电系统部件制造加工中的应用	478
7.4.1 大规模成熟制造集成电路技术的引用	479
7.4.2 薄膜沉积制备技术	481
7.4.3 光刻工艺技术	482
7.4.4 LIGA 制造技术	483
7.4.5 牺牲层技术	483
7.4.6 基板键合技术	485
7.5 微机电系统的加工与典型器件	488
7.5.1 微机电系统加工技术特点	488
7.5.2 微机电系统加工的典型器件与系统	489
7.5.3 微机械与微机电系统常用材料	511
7.5.4 微机电系统加工的多样化与标准化	512
7.6 微机电系统研究开发概况与产业化前景	513
7.6.1 国外微机电系统研究开发概况及产业化前景	513
7.6.2 我国微机电系统研究开发概况和今后的发展方向	514
参考文献	515

1 绪 论

1.1 薄膜的含义及特征

1.1.1 薄膜的含义

薄膜是一种特殊的物质形态。它在应用中涉及的材料十分广泛，可用单质或化合物，也可用无机材料或有机材料来制作，还可用固体、液体或气体物质来合成。薄膜与块体物质一样，可以是非晶态、多晶态、单晶态、微晶、纳米晶、多层膜或超晶格。20世纪60~80年代，等离子体、电子束、离子束、激光束、微波、超高真空学科等的技术成果被逐步引入到材料表面薄膜科学与工程中；各种装饰、机械、物理（声、光、磁、绝缘、半导体等）、特殊功能（防辐射、自润滑、隐身、吸收、红外、催化、抗老化等）薄膜已把材料表面改造成具有人们期望的各种功能。它的应用遍及机械、石化、冶金、交通、能源、环保、核能、航空航天等工业及微电子、光电子、计算机、通信、光学、电学、声学、磁学等领域。特别是薄膜材料以最经济、最有效的方法改善材料表面及近表面区的形态、化学成分、组织结构、应力状态，赋予材料表面新的复合性能后，使许多新构思、新材料、新器件实现了新的工程应用，成为材料表面改性和提高某些先进工艺水平的重要手段。经过30余年的发展，逐步形成了一门独立学科——薄膜学。它是一门新兴的、跨学科的、综合性强的先进基础与工程技术，成为支撑当今技术革新和技术革命发展的重要因素。它既是应用广泛的工程技术，又是各学科交叉的边缘学科，已成为材料科学与工程领域发展的一个重要分支。

什么叫薄膜（thin film）？薄膜的定义是什么，有多“薄”才算薄膜？真实“薄膜”是随科学的发展而自然形成的。它和“涂层”、“箔”既有类似的含义，但又有差别。以厚度来对薄膜加以描述，通常是把膜层在无基片而独立形成的厚度作为薄膜厚度的一个大体标准，规定厚度约为 $1\mu\text{m}$ 。随着科学与工程应用领域的不断扩大和发展的深入，薄膜领域也在不断扩展；不同的应用，对薄膜的厚度有着不同的要求。曾有学者为与“涂层”的厚度区别，提出 $20\sim 25\mu\text{m}$ 厚度以上称为涂层， $1\sim 25\mu\text{m}$ 称为薄膜；也有人把几十微米的膜层称为薄膜。本书所指的薄膜是固体薄膜。从表面界面科学的角度上看，从微观研究的范围上看，它涉及的是材料表面几个至几十个原子层，因为在这一范围内的原子和电子结构与块体材料内部有明显的不同。若涉及原子层数量更大一些，且表面和界面特性仍起着重要的作用，通常厚度为几个纳米到几十个微米，这正是薄膜物理所研究的范围。

基于微电子器件发展的需要，加上对电子器件的集成度要求越来越高，20世纪80年代的超大规模集成电路中的器件是微米量级，90年代就要求亚微米量级，到2000年的分子电子器件是纳米量级。因此，就要求在发展上要研究亚微米和纳米薄膜的沉积制备技术

和亚微米、纳米结构的薄膜制造的各种功能器件。这类薄膜有单晶薄膜、微晶薄膜、小晶粒的多晶薄膜、非晶薄膜、纳米薄膜和有机分子膜。可见，随着科学技术，特别是微电子器件、光电子器件的发展，薄膜的含义包括厚度在内也在不断地发展延伸。

1.1.2 薄膜学的主要研究内容

薄膜在沉积制备过程中，采用的是特殊的沉积制备方法，大都是物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）等方法。这些方法是在真空条件下沉积的，是属于原子量级的熔铸工艺，是将单个原子一个一个沉积凝结在衬底表面，经过形核与生长过程，形成薄膜。其原子结构类似于块体材料形式，但又有很大的变化，不仅存在多晶、表面界面缺陷态及结构的无序性，更与衬底表面有黏附性或者说有结合强度等问题。

薄膜材料与块体材料在表面结构特性上有很大的不同。块体材料的固体理论，是按原子周期性为依据，电子在晶体内的运动服从布洛赫定理，电子迁移率很大。但从薄膜的结构特性上看，其结构中的原子排列都存在一定的无序性和一定的缺陷态，电子在晶体中受到晶格原子的散射，使迁移率变小，因而使薄膜材料在电学、光学、力学等诸多性能上受到影响，这是与块体材料性能上的重要区别。从薄膜材料科学与应用的开拓研究看，其主要研究内容有：

(1) 薄膜的沉积制备工艺技术。同一薄膜，采用不同的沉积制备方法，其性能差别很大，为此须研究不同的沉积制备工艺与薄膜性能的关系。

(2) 研究薄膜所具有的特性，特别是新的特性，包括超硬特性、光、热、电、磁等特性以及这些特性的物理本质。

(3) 根据研究的特性，有针对性地应用于工业的各个领域，特别是高新技术领域。

因此，功能薄膜，特别是新型功能薄膜，在当代高新技术中起着重要的作用。这些功能材料在电子学、微电子学、集成光学、光子学、微机械学、微机电学等领域有着广阔的用途。可以认为，当代的信息技术、微电子学技术、计算机科学技术、激光技术、航空航天技术、遥感遥测学技术的发展，都取决于功能薄膜的科学技术研究中所取得的成果，它们的发展都与功能薄膜科学技术研究与开发密不可分。

1.1.3 功能薄膜的分类

戴达煌，刘敏等人在薄膜功能的分类上提出了自己的看法，如图 1-1 所示。他们指出，就薄膜的功能用途，可大体分为装饰功能薄膜、机械功能薄膜、物理功能薄膜和特殊功能薄膜四大类。这种大致的分类涵盖的内容已十分广泛。就薄膜的功能及其应用看，也难以归类得完全科学、合理，因为无论怎么分类，它总会出现部分的重叠现象；而且它又处在一个高速发展之中，难以找到一个绝对完善的薄膜功能分类。为了便于功能薄膜的论述，本书就以装饰、机械、物理及特殊四类功能薄膜来论述。

(1) 装饰功能薄膜。主要应用薄膜的色彩效应和功能效应。包括各种色调的彩色膜、幕墙玻璃用装饰膜、塑料金属化装饰膜、包装用装潢及装饰膜、镀铝纸等。

(2) 机械功能薄膜。主要应用薄膜的力学性能和防护性能的功能效应，包括有高强度、高硬度、耐磨损，耐腐蚀、耐冲刷、抗高温氧化，防潮、防热、润滑与自润滑，成型加工等机械防护效应。这类薄膜主要包括氮化物系（TiN、ZrN、CrN、HfN、TiAlN、Mo₂N

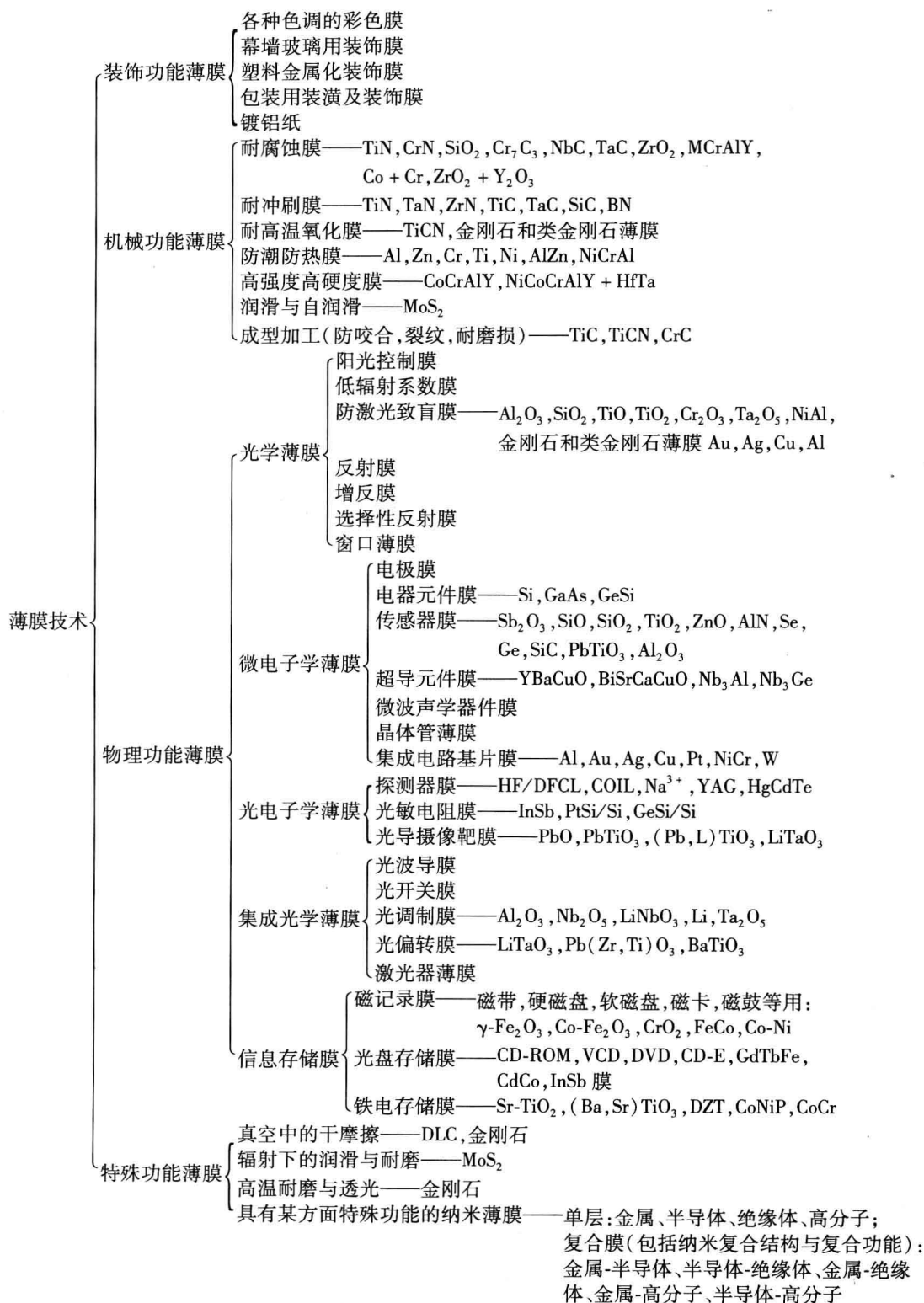


图 1-1 薄膜功能分类