

材料科学与工程系列

薄膜技术与薄膜材料

田民波 李正操 编著

清华大学出版社

薄膜技术与薄膜材料

田民波 李正操 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

薄膜及微细加工技术的应用范围极为广泛,从大规模集成电路、电子元器件、平板显示器、信息记录与存储、MEMS、传感器、白光 LED 固体照明、太阳能电池到材料的表面改性等,涉及高新技术产业的各个领域。本书内容包括真空技术基础、薄膜制备、微细加工、薄膜材料及应用等 4 大部分,涉及薄膜技术与薄膜材料的各个方面,知识全面,脉络清晰。全书共 17 章,文字通俗易懂,并配有大量图解,每章后面附有习题,有利于对基本概念和基础知识的理解、掌握与运用。本书可作为材料、机械、精密仪器、化工、能源、微电子、计算机、物理、化学、光学等学科本科生及研究生教材,对于从事相关行业的科技工作者与工程技术人员,也具有极为难得的参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

薄膜技术与薄膜材料 / 田民波,李正操编著. --北京:清华大学出版社,2011.12

(材料科学与工程系列)

ISBN 978-7-302-27483-4

I. ①薄… II. ①田… ②李… III. ①薄膜技术 ②薄膜—工程材料 IV. ①TB43
②TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 242225 号

责任编辑:宋成斌

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969,c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015,zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:34.25 字 数:832 千字

版 次:2011 年 12 月第 1 版 印 次:2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:49.00 元

产品编号:009051-01

前 言

在薄膜技术与薄膜材料领域,作者从事教学及科研工作已逾 30 年(包括在日本 3 年)。20 世纪 90 年代初与刘德令先生共同编译了《薄膜科学与技术手册》(上、下册),1996 年编写了《薄膜技术基础》讲义,2006 年出版了《薄膜技术与薄膜材料》(新材料及在高技术中的应用丛书)。

在长期的教学科研实践中,作者深深体会到,薄膜技术与薄膜材料之所以受到广泛关注,主要基于下面几个理由。

(1) 薄膜很薄(膜厚从微米到纳米量级,后者甚至薄到几个原子层),可以看成是物质的二维形态。薄膜技术是实现器件轻薄短小化和系统集成化的有效手段。

(2) 器件的微型化,不仅可以保持器件的原有功能并使之强化,而且,随着器件的尺寸减小乃至接近电子或其他粒子量子化运动的尺度,薄膜材料或其器件将显示出许多全新的物理现象。薄膜(以及目前正大力开发的量子线、量子点等)技术是制备这类新型功能器件的有效手段。

(3) 薄膜气相沉积涉及从气相到固相的超急冷过程,易于形成非稳态物质及非化学计量的化合物膜层。因此,薄膜技术是探索物质秘密,制备及分析特异成分、组织及晶体结构的物质的有力手段。

(4) 由于镀膜的气化方式很多(如电子束蒸发、溅射、气体源等),通过控制气氛还可以进行反应沉积,因此,可以得到各种材料的膜层;可以较方便地采用光、等离子体等激发手段,在一般条件下,即可获得在高温、高压、高能量密度下才能获得的物质。

(5) 通过基板、镀膜、反应气氛、沉积条件的选择,可以对界面结构、结晶状态、膜厚等进行控制,还可制取多层膜、复合膜及特殊界面结构的膜层等;由于膜层表面精细光洁,故便于通过光刻制取电路图形;由于在 LSI 工艺中薄膜沉积及光刻图形等已有成熟的经验,故易于在其他应用领域中推广。

(6) 易于在成膜过程中在线检测,监测动态过程并可按要求控制生长过程,便于实现自动化。

近 20 年来,薄膜技术与薄膜材料获得迅猛发展,其主要表现在下述几个方面。

首先,各类新型薄膜材料大量涌现。其中包括纳米薄膜、量子线、量子点等低维材料,高 k 值和低 k 值介质薄膜材料,大规模集成电路用 Cu 布线材料,巨磁电阻、庞磁电阻等磁致电阻薄膜材料,大禁带宽度的“硬电子学”半导体薄膜材料,发蓝光的光电半导体材料,高透明性低电阻率的透明导电材料,以金刚石薄膜为代表的各类超硬薄膜材料等。这些新型薄膜材料的出现,为探索材料在纳米尺度内的新现象、新规律,开发材料的新特性、新功能,提高超大规模集成电路的集成度,提高信息存储记录密度,扩大半导体材料的应用范围,提高电子元件的可靠性,提高材料的耐磨抗蚀性等,提供了物质基础。

再者,薄膜制作和微细加工工艺不断创新。其中包括用于产业化的 MBE 和 MOCVD 技术,脉冲激光熔射,零气压溅射,高密度离子束加工,气体离化团束(GCIB)加工,反应离子

束刻蚀,大规模集成电路用 Cu 布线的电镀,以 CMP 为代表的平坦化,原子、分子量级的人工组装等。这些为制备高质量外延膜,获得良好的成膜台阶覆盖度,制作特征线宽几十纳米的超大规模集成电路,实现 MEMS 和 NEMS 等,提供了可靠保证。

特别是,各种薄膜在高新技术中的应用更加普及。互联网中采集、处理信息及通信网络设备中,都需要数量巨大的元器件、电子回路、集成电路等,制造这些都要采用薄膜技术;在平板显示器产业中,为制作 TFT-LCD 的薄膜三极管及各种电极,为制作 PDP 中的汇流电极、选址电极及 MgO 保护膜,为制作有机 EL 中的电子注入层(EIL)、电子输运层(ETL)、空穴注入层(HIL)、发光层(EML)等,也需要采用薄膜技术;在机器人各种传感器,生物芯片,白光 LED 固体照明,非晶硅、CdTe、CIGS 太阳能电池中都离不开薄膜技术。可以说,薄膜技术和薄膜材料已成为构筑高新技术产业的基本要素。

本书正是基于上述背景和理由编写的。全书共分 4 部分。第 1 部分(第 1~5 章)为薄膜沉积基础,包括真空技术基础、真空泵和真空规、真空装置的实际问题、气体放电和低温等离子体、薄膜生长和薄膜结构;第 2 部分(第 6~9 章)为薄膜制备工艺,包括真空蒸镀、离子镀和离子束沉积、溅射镀膜、化学气相沉积(CVD);第 3 部分(第 10~11 章)为薄膜的微细加工,包括干法刻蚀、平坦化技术;第 4 部分(第 12~17 章)分别论述薄膜技术与薄膜材料在表面改性及超硬膜,能量及信号变换,半导体器件、记录与存储,平板显示器,太阳电池,白光 LED 固体照明等领域的应用。每章后都附有习题,供教学时选用。

本书内容广泛,取材新颖,叙述通俗易懂,紧密联系实际,特别是针对薄膜技术与薄膜材料的最新进展和前沿应用,结合大量实例进行论述。在内容组织上,尽量做到浅、宽、新,避免针对过窄的领域,进行过深、过细的探讨。在重点讨论有关薄膜技术与薄膜材料的基本原理、基本方法、基本工艺过程和基本应用的同时,既指出最新进展、发展方向,又指出问题所在、解决措施。通过本书的学习,有助于读者掌握薄膜制备及微细加工方法,认识与微观结构相关的各种特性,了解薄膜材料及微细加工技术的最新应用。

特推荐本书作为材料、机械、精密仪器、化工、能源、微电子、计算机、物理、化学、光学等相关学科本科高年级及研究生用教材,也可供科研和工程技术人员参考。

作者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2011 年 10 月

目 录

第 1 章 真空技术基础	1
1.1 真空的基本知识	1
1.1.1 真空定义.....	1
1.1.2 真空度量单位.....	2
1.1.3 真空区域划分.....	4
1.1.4 气体与蒸气.....	6
1.2 真空的表征	7
1.2.1 气体分子运动论.....	7
1.2.2 分子运动的平均自由程.....	9
1.2.3 气流与流导	12
1.3 气体分子与表面的相互作用.....	13
1.3.1 碰撞于表面的分子数	13
1.3.2 分子从表面的反射	14
1.3.3 蒸发速率	15
1.3.4 真空在薄膜制备中的作用	16
习题	17
第 2 章 真空泵与真空规	19
2.1 真空泵.....	19
2.1.1 油封机械泵	20
2.1.2 扩散泵	24
2.1.3 吸附泵	29
2.1.4 溅射离子泵	30
2.1.5 升华泵	32
2.1.6 低温冷凝泵	33
2.1.7 涡轮分子泵和复合涡轮泵	34
2.1.8 干式机械泵	36
2.2 真空测量仪器——总压强计.....	37
2.2.1 麦克劳真空规	39
2.2.2 热传导真空规	40
2.2.3 电离真空计——电离规	41
2.2.4 盖斯勒管	46
2.2.5 隔膜真空规	47

IV 薄膜技术与薄膜材料

2.2.6 真空规的安装方法	48
2.3 真空测量仪器——分压强计	48
2.3.1 磁偏转型质谱计	48
2.3.2 四极滤质器(四极质谱计)	49
习题	50
第3章 真空装置的实际问题	52
3.1 排气的基础知识	52
3.2 材料的放气	53
3.3 排气时间的估算	56
3.4 实用的排气系统	57
3.4.1 离子泵系统	57
3.4.2 扩散泵系统	57
3.4.3 低温冷凝泵-分子泵系统	57
3.4.4 残留气体	59
3.5 检漏	60
3.5.1 检漏方法	60
3.5.2 检漏的实际操作	62
3.6 大气温度与湿度对装置的影响	63
3.7 烘烤用的内部加热器	64
3.8 化学活性气体的排气	65
3.8.1 主要装置及存在的问题	66
3.8.2 排气系统及其部件	66
习题	68
第4章 气体放电和低温等离子体	69
4.1 带电粒子在电磁场中的运动	69
4.1.1 带电粒子在电场中的运动	69
4.1.2 带电粒子在磁场中的运动	70
4.1.3 带电粒子在电磁场中的运动	71
4.1.4 磁控管和电子回旋共振	73
4.2 气体原子的电离和激发	73
4.2.1 碰撞——能量传递过程	74
4.2.2 电离——正离子的形成	77
4.2.3 激发——亚稳原子的形成	80
4.2.4 回复——退激发光	82
4.2.5 解离——分解为单个原子或离子	84
4.2.6 附着——负离子的产生	85
4.2.7 复合——中性原子或原子团的形成	85

4.2.8	离子化学——活性粒子间的化学反应	87
4.3	气体放电发展过程	89
4.3.1	由非自持放电过渡到自持放电的条件	90
4.3.2	电离系数 α 和二次电子发射系数 γ	91
4.3.3	帕邢定律及点燃电压的确定	92
4.3.4	气体放电伏安特性曲线	93
4.4	低温等离子体概述	95
4.4.1	等离子体的定义	95
4.4.2	等离子体的温度	96
4.4.3	带电粒子的迁移运动和扩散运动	97
4.4.4	等离子体的导电性	99
4.4.5	等离子体的集体特性	100
4.4.6	等离子体电位	101
4.4.7	离子鞘层	102
4.5	辉光放电	103
4.6	弧光放电	105
4.6.1	弧光放电类型	105
4.6.2	弧光放电的基本特性	106
4.7	高频放电	107
4.7.1	高频功率的输入方法	107
4.7.2	离子捕集和电子捕集	108
4.7.3	自偏压	109
4.8	低压力、高密度等离子体放电	110
4.8.1	微波的传输及微波放电	111
4.8.2	微波 ECR 放电	111
4.8.3	螺旋波等离子体放电	113
4.8.4	感应耦合等离子体放电	114
	习题	115
第 5 章	薄膜生长与薄膜结构	117
5.1	薄膜生长概述	117
5.2	吸附、表面扩散与凝结	118
5.2.1	吸附	118
5.2.2	表面扩散	123
5.2.3	凝结	124
5.3	薄膜的形核与生长	126
5.3.1	形核与生长简介	126
5.3.2	毛吸理论(热力学界面能理论)	129
5.3.3	统计或原子聚集理论	134

5.4	连续薄膜的形成	137
5.4.1	奥斯瓦尔多(Ostwald)吞并过程	137
5.4.2	熔结过程	138
5.4.3	原子团的迁移	139
5.4.4	决定表面取向的 Wulff 理论	139
5.5	薄膜的生长过程与薄膜结构	140
5.5.1	薄膜生长的晶带模型	140
5.5.2	纤维状生长模型	142
5.5.3	薄膜的缺陷	144
5.5.4	薄膜形成过程的计算机模拟	145
5.6	非晶态薄膜	148
5.7	薄膜的基本性质	150
5.7.1	导电性	150
5.7.2	电阻温度系数(TCR)	151
5.7.3	薄膜的密度	151
5.7.4	经时变化	152
5.7.5	电介质膜	152
5.8	薄膜的粘附力和内应力	153
5.8.1	薄膜的粘附力	153
5.8.2	薄膜的内应力	154
5.8.3	提高粘附力的途径	155
5.9	电迁移	156
	习题	158
第 6 章	真空蒸镀	159
6.1	概述	159
6.2	镀料的蒸发	160
6.2.1	饱和蒸气压	160
6.2.2	蒸发粒子的速度和能量	164
6.2.3	蒸发速率和沉积速率	165
6.3	蒸发源	166
6.3.1	电阻加热蒸发源	166
6.3.2	电子束蒸发源	170
6.4	蒸发源的蒸气发射特性与基板配置	173
6.4.1	点蒸发源	173
6.4.2	小平面蒸发源	174
6.4.3	实际蒸发源的发射特性及基板配置	175
6.5	蒸镀装置及操作	178
6.6	合金膜的蒸镀	179

6.6.1	合金蒸发分馏现象	180
6.6.2	瞬时蒸发(闪烁蒸发)法	181
6.6.3	双源或多源蒸发法	181
6.7	化合物膜的蒸镀	181
6.7.1	透明导电膜(ITO)—— $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 系薄膜	181
6.7.2	反应蒸镀法	182
6.7.3	三温度法	183
6.7.4	热壁法	183
6.8	脉冲激光熔射(PLA)	184
6.8.1	脉冲激光熔射的原理	184
6.8.2	脉冲激光熔射设备	185
6.8.3	脉冲激光熔射制作氧化物超导膜	186
6.9	分子束外延技术	187
6.9.1	分子束外延的原理及特点	187
6.9.2	分子束外延设备	188
6.9.3	分子束外延技术的发展动向	190
6.9.4	分子束外延的应用	191
	习题	192
第7章	离子镀和离子束沉积	193
7.1	离子镀原理及方式	193
7.1.1	离子镀的原理	193
7.1.2	不同的离子镀方式	194
7.1.3	离子轰击在离子镀过程中的作用	198
7.1.4	离子镀过程中的离化率问题	202
7.1.5	离子镀的蒸发源	203
7.2	几种典型的离子镀方式	204
7.2.1	活性反应蒸镀(ARE)	204
7.2.2	空心阴极放电离子镀	206
7.2.3	多弧离子镀	208
7.3	离子束沉积	210
7.3.1	离子束沉积的原理	210
7.3.2	直接引出式和质量分离式	212
7.3.3	离化团束沉积	215
7.3.4	离子束辅助沉积	219
7.4	离子束混合	222
7.4.1	离子束混合原理	222
7.4.2	静态混合	223
7.4.3	动态混合	223
	习题	225

第 8 章 溅射镀膜	227
8.1 离子溅射	227
8.1.1 荷能粒子与表面的相互作用	227
8.1.2 溅射产额及其影响因素	229
8.1.3 溅射原子的能量分布和角分布	238
8.2 溅射镀膜方式	242
8.2.1 直流二极溅射	246
8.2.2 三极和四极溅射	247
8.2.3 射频溅射	249
8.2.4 磁控溅射——低温高速溅射	251
8.2.5 溅射气压接近零的零气压溅射	259
8.2.6 自溅射——深且超微细孔中的埋入	262
8.2.7 RF-DC 结合型偏压溅射	267
8.2.8 ECR 溅射	268
8.2.9 对向靶溅射	269
8.2.10 离子束溅射沉积	270
8.3 溅射镀膜的实例	273
8.3.1 Ta 及其化合物膜的溅射沉积	273
8.3.2 Al 及 Al 合金膜的溅射沉积	277
8.3.3 氧化物的溅射沉积:超导膜和 ITO 透明导电膜	278
习题	282
第 9 章 化学气相沉积(CVD)	284
9.1 化学气相沉积(CVD)概述	284
9.1.1 定义	284
9.1.2 CVD 薄膜沉积过程	285
9.1.3 主要的生成反应	286
9.1.4 CVD 的类型及装置	289
9.1.5 CVD 的应用	290
9.2 热 CVD	292
9.2.1 热 CVD 的原理及特征	292
9.2.2 热 CVD 装置和反应器	294
9.2.3 常压 CVD(NPCVD)	296
9.2.4 减压 CVD(LPCVD)	296
9.3 等离子体 CVD(PCVD)	298
9.3.1 PCVD 的特征及应用	298
9.3.2 PCVD 装置	301
9.3.3 高密度等离子体(HDP)CVD	305
9.4 光 CVD(photo CVD)	306
9.4.1 激光化学气相沉积	306
9.4.2 光化学气相沉积	307

9.5	有机金属 CVD(MOCVD)	309
9.6	金属 CVD	312
9.6.1	W-CVD	312
9.6.2	Al-CVD	313
9.6.3	Cu-CVD	315
9.6.4	阻挡层——TiN-CVD	316
9.7	半球形晶粒多晶 Si-CVD(HSG-CVD)	317
9.8	铁电体的 CVD	318
9.9	低介电常数薄膜的 CVD	321
	习题	321
第 10 章	干法刻蚀	323
10.1	干法刻蚀与湿法刻蚀	323
10.1.1	刻蚀技术简介	323
10.1.2	湿法刻蚀	326
10.1.3	干法刻蚀	328
10.2	等离子体刻蚀——激发反应气体刻蚀	333
10.2.1	原理	333
10.2.2	装置	334
10.3	反应离子刻蚀(RIE)	335
10.3.1	原理及特征	335
10.3.2	各种反应离子刻蚀方法	337
10.3.3	装置	343
10.3.4	软件	343
10.3.5	Cu 的刻蚀	347
10.4	反应离子束刻蚀(RIBE)	348
10.4.1	聚焦离子束(FIB)设备及刻蚀加工	349
10.4.2	束径 1 mm 左右的离子束设备及 RIBE	351
10.4.3	大束径离子束设备及 RIBE	352
10.5	气体离化团束(GCIB)加工技术	354
10.5.1	GCIB 加工原理	354
10.5.2	GCIB 设备	355
10.5.3	GCIB 加工的优点	356
10.5.4	GCIB 在微细加工中的应用	357
10.6	微机械加工	359
10.7	干法刻蚀用离子源的开发	361
	习题	362
第 11 章	平坦化技术	363
11.1	平坦化技术的必要性	363

11.2	平坦化技术概要	364
11.3	不发生凹凸的薄膜生长	366
11.3.1	选择生长	366
11.3.2	回流埋孔(溅射平坦化)	366
11.3.3	通过埋入氧化物实现平坦化	367
11.4	沉积同时进行加工防止凹凸发生的薄膜生长	368
11.4.1	偏压溅射	368
11.4.2	去除法(lift-off)	368
11.5	薄膜生长后经再加工实现平坦化	369
11.5.1	涂布平坦化	369
11.5.2	激光平坦化	369
11.5.3	回流平坦化	369
11.5.4	蚀刻平坦化	370
11.5.5	阳极氧化与离子注入	370
11.6	埋入技术实例	370
11.7	化学机械研磨(CMP)技术	372
11.8	气体离子团束(GCIB)加工平坦化	373
11.9	大马士革法(Damascene)布线及平坦化	374
11.10	平坦化技术与光刻制版术	376
11.11	IC 多层布线已进展到第四代	378
	习题	382
第 12 章	表面改性及超硬膜	383
12.1	表面改性	383
12.1.1	何谓表面改性	383
12.1.2	表面改性的手段	384
12.1.3	表面改性的应用	387
12.2	超硬膜用于切削刀具	388
12.2.1	超硬膜的获得及应用	388
12.2.2	如何选择镀层-基体系统	390
12.2.3	超硬镀层改善刀具切削性能的机理	393
	习题	396
第 13 章	能量及信号变换用薄膜与器件	397
13.1	能量变换薄膜与器件	397
13.1.1	光电变换薄膜材料	397
13.1.2	光热变换薄膜材料	401
13.1.3	热电变换薄膜材料	403
13.1.4	热电子发射薄膜材料	405

13.1.5	固体电解质薄膜材料	405
13.1.6	超导薄膜器件	407
13.2	传感器	409
13.2.1	传感器的种类及材料	409
13.2.2	薄膜传感器举例	412
13.3	金刚石薄膜的应用	415
13.3.1	金刚石薄膜的开发现状	416
13.3.2	三极管及二极管	417
13.3.3	传感器	418
13.3.4	声表面波器件	419
13.3.5	场发射平板显示器	419
	习题	422
第 14 章	半导体器件、记录 and 存储用薄膜技术与薄膜材料	424
14.1	半导体器件	424
14.1.1	半导体集成电路元件中所用薄膜的种类和形成方法	424
14.1.2	MOS 器件及晶圆的大型化	426
14.1.3	化合物半导体器件	430
14.2	记录与存储	431
14.2.1	光盘	432
14.2.2	磁盘	434
14.2.3	磁头	435
	习题	438
第 15 章	平板显示器中的薄膜技术与薄膜材料	442
15.1	平板显示器	442
15.2	液晶显示器	442
15.2.1	AM-LCD	442
15.2.2	采用 a-Si:H TFT 的 AM-LCD	448
15.2.3	TFT-LCD 性能的改进和提高	449
15.2.4	采用 poly-Si TFT 的 AM-LCD 以及低温 poly-Si TFT 制作技术	451
15.2.5	LCD 显示屏的封装技术	455
15.3	等离子体平板显示器	458
15.3.1	等离子体平板显示器的工作原理	458
15.3.2	PDP 的主要部件及材料	459
15.3.3	MgO 薄膜	461
15.3.4	放电胞及障壁结构	461
15.3.5	PDP 显示器的产业化进展	464
15.4	有机电致发光显示器(OLED)	465

15.4.1	有机 EL 显示的工作原理	465
15.4.2	有机 EL 显示器的特征	467
15.4.3	小分子系和高分子系有机 EL 显示器	468
15.4.4	有机 EL 显示器的结构及制作工艺	469
15.4.5	有机 EL 显示器的产业化进展	471
习题	472
第 16 章	太阳电池中的薄膜技术与薄膜材料	475
16.1	太阳电池的原理和薄膜太阳电池的优势	475
16.1.1	太阳电池原理	475
16.1.2	太阳电池的种类	477
16.1.3	薄膜太阳电池的优势	477
16.2	太阳电池和光伏发电的最新进展	478
16.2.1	开发现状	478
16.2.2	太阳电池开发路线图和促进开发、引入的对策	480
16.2.3	对今后材料及技术开发的展望	482
16.3	硅系薄膜太阳电池	484
16.3.1	薄膜 Si 的材料特性	484
16.3.2	薄膜 Si 太阳电池的制作工艺	485
16.3.3	薄膜 Si 太阳电池的高效率化技术	487
16.3.4	今后的课题	489
16.4	CdTe 太阳电池	489
16.4.1	CdTe 太阳电池的特征	489
16.4.2	CdTe 太阳电池的构造和制作方法	490
16.4.3	今后的展望	492
16.5	CIGS 太阳电池	492
16.5.1	CIGS 太阳电池的结构及特长	493
16.5.2	CIGS 光吸收层的制膜法	494
16.5.3	高效率化的措施	495
16.5.4	集成型组件工程	496
16.5.5	挠性 CIGS 太阳电池	497
16.5.6	今后的课题	499
16.6	超高效率多串结 III-V 族化合物半导体太阳电池	499
16.6.1	多串结太阳电池实现高转换效率的可能性	500
16.6.2	如何实现多串结太阳电池的高效率化	501
16.6.3	多串结太阳电池高效率化的进展历程	502
16.6.4	作为宇宙用太阳电池的实用化	502
16.6.5	以低价格化为目标的集光型太阳电池	503
16.6.6	多串结太阳电池的未来发展	504

16.7	有机薄膜型太阳电池	505
16.7.1	下一代太阳电池的希望	505
16.7.2	有机系太阳电池的特征	505
16.7.3	发电原理与元件结构	505
16.7.4	高分子有机薄膜太阳电池	506
16.7.5	小分子系有机薄膜太阳电池	508
16.7.6	有机薄膜太阳电池的未来发展	508
16.8	色素增感(染料敏化)太阳电池	509
16.8.1	何谓色素增感(染料敏化)太阳电池	509
16.8.2	电池构造及发电机制	510
16.8.3	电池制作方法	511
16.8.4	增感色素的结构	512
16.8.5	太阳电池特性	513
16.8.6	关于耐久性	514
16.8.7	新的研究开发要素	514
16.8.8	特长和可能的用途	515
16.8.9	面向实用化的课题和今后展望	515
	习题	516
第 17 章	白光 LED 固体照明与薄膜技术	518
17.1	半导体固体发光器件的基础——发光过程	518
17.2	发光二极管和蓝光 LED	519
17.2.1	Ⅲ-V 族化合物半导体 LED	519
17.2.2	蓝光 LED 芯片的结构及制作方法	522
17.3	白光 LED 固体照明器件	523
17.3.1	白光 LED 发光的几种实现方式	523
17.3.2	白光 LED 的结构和构成要素	525
17.3.3	白光 LED 的发光效率	526
17.4	激光二极管	526
	习题	527
	参考文献	529
	作者书系	532

第 1 章 真空技术基础

薄膜的气相沉积一般需要三个基本条件：热的气相源、冷的基板和真空环境。

在寒冷的冬天，窗玻璃上往往结霜；人们乍一进入温暖的房间，眼镜片上会结露。不妨将上述“霜”和“露”看作气相沉积的“膜”，则火炉上沸腾水壶中冒出的蒸汽则是“热的气相源”，冰冷的窗玻璃和眼镜片则是“冷的基板”。那么，为什么真空环境也是薄膜气相沉积的必要条件呢？

一般说来，工业上利用真空有下述几条理由：①化学非活性；②热导低；③与气体分子之间的碰撞少；④压力低。通过本章的学习，可以了解真空环境对于薄膜气相沉积的必要性，并为真空获得、真空测量及真空应用等建立必要的理论基础。

1.1 真空的基本知识

1.1.1 真空定义

真空泛指低于一个大气压的气体状态。与普通的大气状态相比，分子密度较为稀薄，从而气体分子与气体分子，气体分子与器壁之间的碰撞几率要低些。

关于真空的定义，曾有过种种不同的说法。其中一种说法认为：真空就是“真的空了”，就是“什么也不存在的空间”，直到 17 世纪前后还是这种观点。实际上，即便是目前所能获得的最高真空度 1×10^{-11} Pa (7.5×10^{-14} Torr)，在 1 cm^3 中也还残留着大约 3000 个气体分子，因此，这个定义无论如何也是不能使用的。“真的空了”的状态称为绝对真空，它除了供理论研究之外，并无多大实际意义。

另一种关于真空的定义认为：“就真空使用者的目的而论，只要该空间的气体可以忽略不计，就可以认为是真空了。”若按这种说法来定义真空会出现什么问题呢？试想，对于大炮的炮弹来说，在高于大气压的空间飞行是没有问题的，因此，甚至可以把高于大气压的空间看作是真空；再看我们每天都要看的彩电的显像管，为保证其中扫描电子的运动，只要有 10^{-2} Pa (7.5×10^{-5} Torr) 左右的真空就足够了；而对于表面研究而言， 10^{-8} Pa (7.5×10^{-11} Torr) 才称得上是真空。这样，究竟该从哪一压强开始来定义真空就变得无法确定了。比较以上这些定义可以看出，“真空是低于一个大气压的气体状态”这一定义尽管粗糙，但较为科学。

按照上述定义，为了获得真空，至少需要能降低压强的设备——真空泵，以及盛放特定空间的装置——真空容器。关于真空泵，第 3 章将要详细讨论，而真空容器的作用往往被人们所忽略。假如想要不用真空容器来制造真空将会出现什么情况呢？与此情况相近可举台风为例。尽管台风能量巨大，但其所能形成的气压，即使在台风中心也仅仅是 0.9 个大气压而已。由此可见，真空容器是何等的重要。

今天用普通方法所能获得的极限压强是 1×10^{-8} Pa (7.5×10^{-11} Torr)，如用多种方法