

真空镀膜原理与技术

主 编 方应翠

副主编 沈 杰 解志强



科学出版社

014032037

TN305.8
04

真空镀膜原理与技术

主 编 方应翠

副主编 沈 杰 解志强



科学出版社

北 京



北航

C1720057

TN305.8
04

内 容 简 介

本书阐述了真空镀膜的应用,真空镀膜过程中薄膜在基体表面生长过程;探讨了薄膜生长的影响因素;具体地介绍了真空镀膜的各种方法,包括真空蒸发镀、真空溅射镀、真空离子镀以及化学气相沉积的原理、特点、装置及应用技术等。力求避开烦琐的数学公式,尽量用简单的语言阐述物理过程。通俗易懂、简单易学。

本书可作为高等学校相关专业的本科生教材,也可用作研究生教材或相关行业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

真空镀膜原理与技术/方应翠主编. —北京:科学出版社,2014.2

ISBN 978-7-03-039898-7

I. ①真… II. ①方… III. ①真空技术-镀膜 IV. ①TN305.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 037572 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:张小霞

责任印制:阎 磊/封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年2月第 一 版 开本:720×1000 B5

2014年2月第一次印刷 印张:14

字数:282 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当块体材料一个维度的尺寸减小到微米尺度时,我们称之为薄膜材料,同样材料的薄膜与块体,其特性差别很大。为了更好地利用薄膜材料为人类服务,科研人员一直不断地进行科学研究,工程技术人员不断地将科学转变成生产力,提高人们的生活水平。

真空镀膜是一种制备薄膜的方法,是真空状态下在固体表面沉积薄膜的一种技术。由于所制备的薄膜具有纯度高、致密度高、膜与基体或工件结合力强等特点,同时由于真空镀膜方法可以制备自然界不存在的结构,如量子点、量子阱或超晶格材料等纳米结构,所以随着科技的发展,真空镀膜技术在国民生活、工业、国防和科研领域发挥越来越重要的作用。超大规模集成电路、平板显示、薄膜太阳能电池、有机发光显示、高硬度耐磨损刀具、装饰膜、催化薄膜等都可以用真空镀膜方法制备,而且有些膜只能用真空镀膜方法制备。

改革开放以来,我国科技以史无前例的速度发展,本科生的教学体系也发生了很大变化,教学课程数增多,每门课的学时数减少,以让学生在大学期间能接触到更多知识。“真空镀膜原理与技术”这门课在20世纪80年代,课堂教学为64学时,后来改为48学时,最近又改成36学时。为了更好地适应教学,教材内容必须适当精简,同时必须融进新的技术和原理,以适应新形势对人才的要求。

本着促进学科与课程建设,推进高等教育高水平、高质量的教材建设的宗旨,作者及团队成员编写了《真空镀膜原理与技术》一书,作为本科生教材,力求用简洁的语言、图和表阐述深奥的物理过程,同时涵盖真空镀膜技术最新发展。

本书由方应翠统稿,各章编写人员如下:第一章由方应翠、沈杰编写,第二章由沈杰、方应翠编写,第三章由沈杰、吴春艳编写,第四章由方应翠、余羿、李喜峰编写,第五章由方应翠、施戈编写,第六章由解志强(Zhiqiang Xie)编写。

主编方应翠是复旦大学物理电子学专业博士毕业,是中国科技大学凝聚态物理专业博士后,一直从事真空镀膜和薄膜科学方面的研究,同时执教“真空镀膜技术”15年,在教学过程中不断思考,探索适应本科生教学的方式和内容。复旦大学副教授沈杰博士从事多年的薄膜物理研究,具有深厚的薄膜物理功底,尤其对蒸发镀不仅具有丰富的理论知识,而且具有较高的实验技能,负责薄膜物理和真空蒸发镀内容编写。解志强(Zhiqiang Xie)是美国内布拉斯加林肯大学(University of Nebraska-Lincoln)电子工程系博士毕业,一直致力于各种先进材料的制备、性能研究及应用,现任职于美国美光科技(Micron Technology)公司,专门研究电介质薄膜的生长及其在半导体芯片中的应用,理论和实践经验的结合使他用独到的

视角编写了化学气相沉积一章。中国科技大学副教授余羿是中国科技大学等离子体物理专业博士毕业，现在中国科技大学从事等离子体物理研究，负责编写等离子体物理相关内容。合肥工业大学副教授吴春艳是中国科技大学物理系博士毕业，一直从事脉冲激光沉积薄膜研究，负责脉冲激光沉积一节的编写。北京泰科诺公司施戈总工程师在工厂实地工作多年，熟悉多种溅射镀和离子镀设备。上海大学副教授李喜峰博士参与第四章编写。另外，中国科学院等离子体物理所吴斌博士提供了帮助。

本书编写过程中还走访了很多企业，拜访了业内知名人士。主编和中国真空学会薄膜专委会主任清华大学潘峰教授、长城钛金董事长王殿儒先生、北京联合大学王福贞教授、北京丹普表面技术公司总经理董琪先生、北京北仪创新真空公司舒波工程师、重庆金雅克公司薛海副总经理等深入探讨过相关问题，另外还得到企业家高健淋总经理的帮助。正因为他们无私的帮助，本书才能够顺利地编写，在此深表感谢。特别需要感谢的是三位资深审稿人，复旦大学章壮健教授、广东有色金属研究院袁镇海教授级高工和浙江大学王德苗教授，三位先生不辞辛苦，字斟句酌，以他们的智慧、深厚的知识底蕴和多年积累的经验，保证了本书的品质。研究生洪流、何金俊等同学完成了全书的插图工作。另外，本书引用了大量其他书籍、文献及网络中的知识，在此向具名及不具名的原作者们致敬，感谢他们的劳动，同时也希望他们能够理解我们对他们成果的引用。最后，对合肥工业大学各级领导给予的大力支持表示衷心感谢。我们相信本书能够为相关领域知识的传播和我国高级人才的培养做出一定的贡献。

由于真空镀膜涉及薄膜、物理、材料、真空、电子技术等专业知识，限于作者水平，书中不妥之处难免，很多问题可能阐述得还不太清楚，恳切广大读者指正和批评。

作者

2013年12月于合肥

目 录

前言

第一章 真空镀膜概述	1
1.1 固态薄膜简介	1
1.2 真空镀膜简介	2
1.2.1 真空镀膜物理过程	2
1.2.2 真空镀膜的分类	3
1.2.3 真空镀膜的特点	4
1.3 真空镀膜技术的应用和发展	4
1.4 真空镀膜系统	12
1.4.1 真空镀膜系统的基本概念	13
1.4.2 真空泵	14
1.4.3 真空计	18
参考文献	21
第二章 真空镀膜成膜过程	22
2.1 薄膜生长简介	22
2.2 固体表面	23
2.3 薄膜生长过程	24
2.3.1 吸附	25
2.3.2 扩散和脱附	26
2.3.3 成核	27
2.3.4 连续膜的形成	28
2.4 薄膜生长的三种模式	29
2.5 固态薄膜的结构和缺陷	30
2.6 固体薄膜的性质	32
2.7 固体薄膜应力	34
2.8 薄膜与基体的附着力	35
2.9 基体	35
第三章 真空蒸发镀膜	38
3.1 真空蒸发镀膜原理	38
3.2 电阻蒸发源	40
3.2.1 电阻蒸发源的原理	40

3.2.2	电阻蒸发源的结构	41
3.2.3	电阻加热源的主要特点	42
3.2.4	电阻加热真空蒸发镀的应用	43
3.3	电子束蒸发源	47
3.3.1	e 型电子枪的原理和结构	47
3.3.2	e 型电子枪蒸发源的特点	50
3.3.3	e 型电子枪真空蒸发镀的应用	50
3.4	感应加热蒸发源	52
3.4.1	感应加热蒸发源的原理	53
3.4.2	感应加热蒸发源的特点	53
3.5	脉冲激光沉积 (PLD)	54
3.5.1	PLD 系统	54
3.5.2	PLD 工作原理	56
3.5.3	PLD 技术特点	56
3.5.4	PLD 应用和发展	57
3.6	分子束外延	58
3.6.1	分子束外延原理	59
3.6.2	分子束外延装置	60
3.6.3	分子束外延特点	63
3.6.4	分子束外延技术应用及进展	63
3.7	真空蒸发镀膜中的重要参数	68
3.8	蒸发镀中基体上沉积的膜的厚度均匀性	72
3.8.1	单室蒸发镀薄膜均匀性计算	72
3.8.2	蒸发源与基片的相对位置对薄膜均匀性的影响	76
	参考文献	77
第四章	真空溅射镀膜	79
4.1	直流二极辉光放电	79
4.2	等离子体	84
4.3	溅射原理	88
4.4	直流溅射镀膜	93
4.4.1	直流二极溅射镀膜	94
4.4.2	直流二极偏压溅射镀膜	97
4.4.3	直流多极溅射镀膜	98
4.5	直流磁控溅射镀膜	99
4.5.1	磁控溅射镀膜原理及特点	100
4.5.2	柱状靶	102

4.5.3	平面靶	107
4.5.4	S 枪	113
4.5.5	磁控溅射镀膜一般特征	115
4.5.6	直流反应磁控溅射镀膜	118
4.6	射频溅射镀膜	121
4.6.1	射频辉光放电	121
4.6.2	射频溅射镀膜	122
4.7	中频磁控溅射镀膜	126
4.8	脉冲直流辉光放电镀膜	127
4.9	非平衡磁控溅射镀膜	130
4.10	真空蒸发和溅射镀膜参数与薄膜形貌关系	131
	参考文献	132
第五章	真空离子镀	134
5.1	等离子体离子镀概述	134
5.1.1	等离子体离子镀原理	135
5.1.2	等离子体离子镀特点	138
5.1.3	等离子体离子镀分类	139
5.2	等离子体蒸发离子镀	140
5.2.1	e 型电子枪蒸发离子镀	140
5.2.2	空心阴极放电离子镀	141
5.2.3	等离子体激活蒸发离子镀	145
5.2.4	等离子体激活高速离子镀	149
5.3	等离子体磁控溅射离子镀	154
5.3.1	磁控溅射离子镀	155
5.3.2	离化的磁控溅射离子镀	157
5.3.3	高能脉冲磁控溅射离子镀	158
5.3.4	自溅射	162
5.3.5	空心阴极辅助的高密度溅射离子镀	164
5.4	电弧离子镀	166
5.4.1	阴极电弧离子镀	167
5.4.2	脉冲偏压电弧离子镀	179
5.4.3	阳极电弧离子镀	181
5.5	束流离子镀	183
5.5.1	离子束沉积	184
5.5.2	团簇离子束沉积	184
5.5.3	离子束辅助沉积	187

参考文献.....	190
第六章 化学气相沉积.....	193
6.1 概述	193
6.2 化学气相沉积的动态过程	194
6.3 几种常见的化学气相沉积	197
6.3.1 热化学气相沉积	197
6.3.2 低压化学气相沉积	199
6.3.3 等离子体增强型化学气相沉积	202
6.3.4 原子层沉积	205
6.3.5 其他化学气相沉积简介	208
参考文献.....	212

第一章 真空镀膜概述

薄膜通常有液态和固态之分，液态薄膜如肥皂泡、油膜等，而本书将要讨论的是得到广泛应用的固态或固体薄膜，即呈固体状态的薄膜。固体薄膜种类很多，可以用物理或化学方法制备。一般认为用物理方法制备固体薄膜第一人是英国物理学家、全电池之父 William Robert Grove (图 1-1)^①。1852 年，他在气体放电实验中观察到薄膜的沉积，并且研究了沉积物的特性。



图 1-1 英国物理学家
William Robert Grove
(1811—1896)

1.1 固态薄膜简介

固态薄膜 (thin solid film) 通常指在一个维度上尺度小于 $1\mu\text{m}$ ，而在其他两个维度上不受限制的一种二维材料。设图 1-2 (a) 表示块体材料，其尺度在 X、Y、Z 三个方向上都不受限制；假设图 1-2 (b) 表示块体材料 Z 方向尺度降到 $1\mu\text{m}$ 以下，则如图 1-2 (b) 所示为薄膜。通常，固态薄膜是生长在固态基体上，形成的膜由基体承载，如图 1-3 所示。

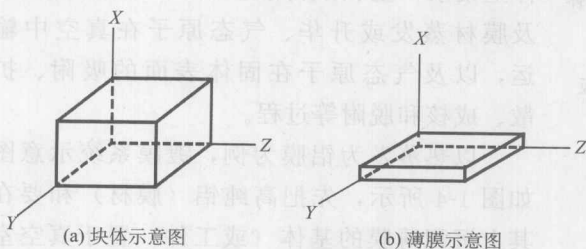


图 1-2 固态材料

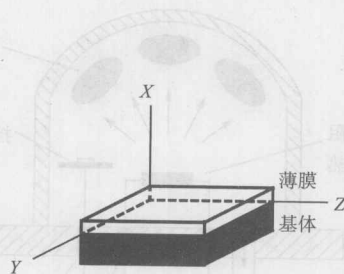


图 1-3 基体上承载薄膜示意图

块体材料的各种物理特性是指它单位体积所具有的性质，也即假定这些物理性质与体积无关，实际上只要所研究的物体的尺寸不太小，这样的假设就成立。但

^① William Robert Grove 是英国的一名法官和物理学家，预测了能量守恒定律，并且发明了燃料电池，1852 年利用辉光放电制备了薄膜，这是人类最早的真空镀膜。

是, 当有一个维度尺寸变得很小, 致使其表面积和体积之比很大时, 上述假设便不再成立。块体材料内部粒子各个方向受力均匀, 但是对于表面来说, 由于表面向外一侧原子排列中断, 表面原子受力不同于体内, 对于薄膜上下两个面距离很近, 两表面层原子间相互作用使薄膜呈现出有别于块体的新特性。可以利用薄膜的这些新特性为人类服务, 所以薄膜材料得到广泛的研究。薄膜的制备方法一直不断地发展, 主要有物理和化学方法, 常用的化学方法有电镀、化学镀、溶胶凝胶、LB (Langmuir-Blodgett) 技术^①等, 这些方法的共同特点是常压下通过湿化学反应获得薄膜, 而物理方法主要指真空镀膜方法, 是在真空室中通过物理或化学过程在固态基体表面沉积薄膜。

1.2 真空镀膜简介

真空镀膜是在真空环境中, 将膜材气化并沉积到固体基体上形成固态薄膜的方法。真空镀膜是生长薄膜的重要方法, 几乎所有类型的薄膜都可以用真空镀膜方法制备。

1.2.1 真空镀膜物理过程

真空镀膜基本可以分成“膜材气化”、“真空运输”和“薄膜生长”三个过程。在真空镀膜中, 如果膜材是固态, 那么首先需要采取措施使固态膜材气化或升华或经历一个类似“升华”的过程, 变成气态, 然后是气化的膜材粒子在真空中运输。运输过程中, 粒子可能不经历碰撞, 直接到达基体, 也有可能在空中发生碰撞, 经过散射, 再到达基体表面。最后是粒子在基体上凝聚, 生长成薄膜。所以, 镀膜过程涉及膜材蒸发或升华、气态原子在真空中运输, 以及气态原子在固体表面的吸附、扩散、成核和脱附等过程。

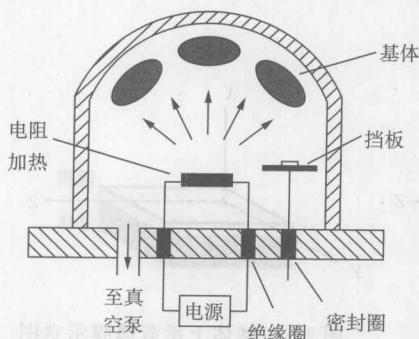


图 1-4 真空镀膜示意图

以热蒸发为铝膜为例, 镀膜系统示意图如图 1-4 所示, 先把高纯铝 (膜材) 和要在其上沉积薄膜的基体 (或工件) 置于真空室内, 将挡板转到膜材上方, 然后把真空室抽到压强约为 10^{-3} Pa, 再用电阻加热铝丝, 使其受热蒸发; 当蒸发稳定后, 将挡板旋转

① LB 技术: 利用分子活性在气液界面上形成凝结膜, 将该膜逐次叠加在基体上而形成膜的技术, 称为 LB 技术。该技术由 Katharine Blodgett 和 Irving Langmuir 于 1933 年发明, 所以称为 Langmuir-Blodgett (LB) 技术。应用这一技术可以生长高质量、有序单原子层或多原子层 LB 膜。

开, 让热蒸发出来的膜材原子穿过真空室, 到达基体上形成薄膜。所以, 真空镀膜有三个基本要素: 真空室、膜材和基体。

1.2.2 真空镀膜的分类

根据膜材从固态变成气态方式的不同, 以及膜材原子在真空中输运过程的不同, 真空镀膜基本上可以分成①真空蒸发镀、②真空溅射镀、③真空离子镀、④真空化学气相沉积镀四大类型。前三种方法称为物理气相沉积 (physical vapor deposition, PVD), 后一种称为化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD)。

真空蒸发镀是利用外界提供的热量使膜材受热液化后气化, 或直接气化成气态, 沉积到基体上形成薄膜的技术。根据热量来源不同, 分为电阻蒸发镀 (resistance heating evaporation) 电子束蒸发镀 (electron beam (EB)-coating)、脉冲激光蒸发镀 (pulsed laser deposition, PLD) 和感应加热蒸发镀 (Induction-heated evaporation) 等。

真空溅射镀是在真空条件下, 通过气体放电产生氩离子 (Ar^+), 利用带正电荷的氩离子轰击带负电位的靶材, 使靶材发生溅射, 溅射出来的原子沉积到基体表面形成薄膜的一种技术。真空溅射镀派生出很多种类, 如直流溅射二极、三极和多极溅射, 以及偏压溅射、射频二极溅射、平衡和非平衡磁控溅射镀膜等, 其中, 得到广泛应用的是磁控溅射镀膜, 包括直流平面磁控溅射镀、柱状靶磁控溅射镀、非平衡磁控溅射镀、脉冲直流磁控溅射镀、射频磁控溅射镀及中频磁控溅射镀等。磁控溅射镀膜在大面积平板玻璃镀膜行业发挥着重要作用。掠射角沉积 (glancing angle of incidence deposition, GLAD)^[1]是新近开发的一种新技术, 能够增加薄膜中的多孔度, 减小膜材密度, 在很多领域有独到的应用。

在真空离子镀中, 膜材由固态变成气态的方式如同蒸发镀或如同溅射镀, 但是气态膜材在随后输运过程中与工作气体一起参与辉光放电, 部分被离化成离子和电子, 离子和中性粒子沉积到带负电位的基体上形成薄膜。离子镀包括等离子体离子镀、电弧离子镀和束流离子镀。初学者能很好地分辨蒸发镀和溅射镀, 但是到离子镀一章时, 有时分不清离子镀、蒸发镀还是溅射镀。其实, 离子镀区别于蒸发镀和溅射镀的最典型特征是: ①在离子镀中, 气化的膜材原子经历一个离化过程; ②在离子镀中, 基体通常施加负偏压。满足这两个条件的镀膜基本上可以归类为离子镀, 所以文献上把高功率 (或高能) 脉冲磁控溅射 (high power impulse magnetron sputtering, HIPIMS), 活性蒸发镀 (activated reactive evaporation, ARE) 都归为离子镀。而等离子体激活的 (plasma-activated) 高速离子镀又很容易让人把它们归为蒸发镀。不过, 分类并不重要, 重要的是认识镀膜过程的本质, 合理地利用相应的技术制备出满足需要的优质薄膜。

还有一种镀膜方式称为真空化学气相沉积镀 (CVD), 所用的膜材多为气态, 通过给基体加热或者通过辉光放电, 使膜材分子或原子变成化学活性基团, 促使反

应物在基体表面上以较大的概率发生化学反应,形成所需薄膜。化学气相沉积镀有近常压 CVD、低压 CVD 和等离子体增强 CVD (plasma enhanced CVD, PECVD) 及光 CVD。还有新近得到广泛研究和应用的原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 技术,ALD 能够实现单原子层薄膜沉积。

现代镀膜技术不断发展,出现了由基本镀膜方法杂化而成的混合镀膜方式,如磁控溅射与电子束蒸发结合,磁控溅射与过滤的弧光放电镀膜结合,电子束与过滤的弧光放电镀膜结合,聚合物闪蒸与磁控溅射或蒸发镀结合等,这些杂化方式能镀出性能独特的多种薄膜。不过,不论是怎样复杂的混合镀膜系统,其基础都是 4 种基本真空镀膜方法,所以本书只介绍 4 种基础镀膜方法。

无机薄膜可用以上各种方法制备,但是有机物质由于熔点较低,最适合用真空蒸发镀和化学气相沉积镀,而不适合用真空溅射或真空离子镀,因为这些方法提供的能量太高,可能使有机分子裂解,同时离子轰击也可能会打断有机分子的键而破坏分子结构,所以基本不用。另外,还有在基体上沉积聚合物的真空镀膜方法,称为真空聚合物沉积 (vacuum polymer deposition, VPD) 等技术^[2]。

1.2.3 真空镀膜的特点

真空镀膜和其他镀膜方式相比较具有以下特点:

- (1) 真空镀膜可以在固态基体上镀制金属、合金、半导体薄膜及各种化合物薄膜,薄膜的成分可以在大范围内调控。
- (2) 真空镀膜可以镀制高纯度、高致密度、与基体结合力强的各种功能薄膜、电子薄膜、光学薄膜。特别是大规模集成电路、小分子有机显示器件、硅太阳能电池等很多器件所需的主体薄膜只能在真空条件下制备,其他制膜技术无法满足要求。
- (3) 真空镀膜对环境的污染小,特别是 PVD 方法,对环境基本没有污染。用化学方法制备薄膜时,一方面膜自身受到制膜所使用的溶剂污染,性能降低,另一方面反应废弃物对环境也会造成污染。
- (4) 真空镀膜的主要缺点是需要有真空设备,相对来说成本比较高。

1.3 真空镀膜技术的应用和发展^①

从人类开始制作陶瓷器皿的彩釉算起,薄膜的制备与应用已经有一千多年的发展历史。从制备技术、分析方法、形成机理等方面系统地研究薄膜材料则起始于 20 世纪 50 年代。直到 20 世纪 80 年代,薄膜科学才发展成为一门相对独立的学科。促使薄膜科学迅速发展的重要原因是薄膜材料强大的应用背景、低维凝聚态理论的

① 真空应用的很多例子都选自于网站,因为具有普遍性,所以没有一一标明出处。

不断发展和现代分析技术分析能力的不断提高。

真空镀膜是在真空状态下镀膜，膜与基体结合力强，膜的纯度高，所以真空镀膜可以镀制优质薄膜。真空镀膜不仅可以镀制与固体材料成分相同的薄膜，而且可以镀制自然界不存在的物质，如量子点^①、量子阱或超晶格材料^②等，所以真空镀膜在国民生活、工业、国防和科研领域起着重要作用。以下举例说明。

1. 装饰薄膜

装饰薄膜广泛应用于灯具、眼镜、玩具、钟表、工艺美术品、各种饰品、家用电器、汽车等物品上，是普通群众最为熟悉的一类薄膜，图 1-5 给出一些实例。



图 1-5 装饰膜应用举例

装饰镀中最常用的是塑料基体镀 Cr，使塑料金属化。Al 和 Ag 用于制镜行业。高熔点金属氮化物如 TiN、ZrN、TaN 等广泛应用于餐具、灯具及各种饰品表面。CrCN 和 TiCN、TiAlN 具有诱人的黑色，在各种个人数据产品如手机、计算机等外壳上有广泛应用。

2. 薄膜在集成电路方面的应用

可以说没有真空镀膜技术，就不可能有集成电路的飞速发展。图 1-6 是 Si 集成电路示意图，除 p 型硅基体（p-wafer）外，其上分布的各种元件很多在真空环境下制备。薄膜集成电路所有组成元件全部由真空镀膜方法制备，如金属 Ag 或 Au 电极、由金属 Ni、Cr 或 Re 等构成的薄膜电阻；由 Ta_2O_5 构成的电容，以及薄膜电感、薄膜三极管等。图 1-7 是薄膜晶体管（thin film transistor, TFT）结构图，基体为玻璃，源极、漏极和栅极都采用真空镀膜方法制备。薄膜集成电路与硅基集成电路相比还有以下一些优点：

（1）在硅基集成电路中，由于各元件之间的寄生耦合而产生了寄生损耗，这在薄膜集成电路中不会发生，因为薄膜集成电路中所用的基体是玻璃或陶瓷，具有良好的绝缘性能。

① 量子点（quantum dot），是准零维（quasi-zero-dimensional）纳米材料，由少量原子所构成。粗略地说，量子点是三个维度的尺寸都在 100 纳米（nm）以下，其内部电子在各方向上的运动都受到局限，从而表现出与宏观物体不同的性质。

② 超晶格（superlattice），是两种不同组元以几个纳米到几十个纳米的薄层交替生长并保持严格周期性的多层膜。

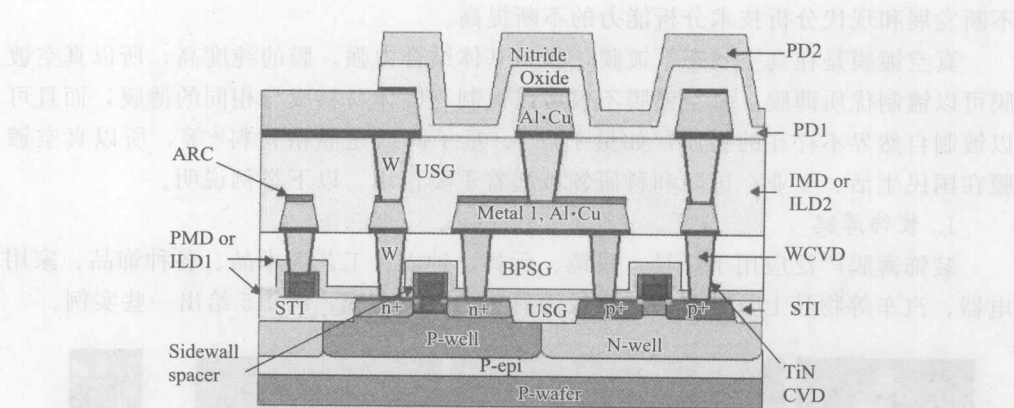


图 1-6 Si 基集成电路示意图

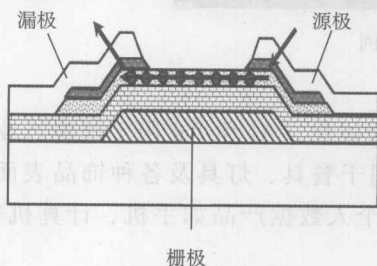


图 1-7 薄膜晶体管结构图

(2) 薄膜集成电路的制造只采用了单一的工艺过程，即真空镀膜，在膜沉积以后的退火、烘烤等工艺过程也是在相当低的温度下进行，一般只有 500°C ，而对硅集成电路来讲，其处理工艺所需的温度约为 1000°C ，在制造 Si 基集成电路过程中，需要反复的氧化、涂光刻胶、照相、显影、腐蚀、清洗和扩散，还需要真空镀膜来制造内部连线及接触点，而且上述每道工序都在不同的设备上完成，因此每一步都要

小心控制和清洗。对薄膜集成电路来说，操作非常简单，对基片的操作控制只有两次，一次是向真空镀膜生产线的真空系统中放入基片，另一次是从中取出基片。

(3) 薄膜集成电路的基体很便宜，就是普通的玻璃或陶瓷，而硅基集成电路的基体却是高纯无缺陷的单晶硅。

应用薄膜元件的电子线路得到广泛应用，如电子开关系统、医学电子设备，将数字量转换为模拟量的梯形网络，以及一些数字、模拟和微波电路中。

3. 薄膜在光电显示器件中的应用

1) 透明氧化物导电薄膜

电极通常由金属材料制成，但是金属导电却不透明，而各种平板显示器件和太阳能电池等均需要透明电极。研究表明，向金属氧化物中掺杂相关元素制成的透明导电薄膜能满足既透明又导电的要求，通常透明导电薄膜要求平均透过率大于 80% ，电阻率小于 $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ 。目前，得到最广泛应用的透明导电薄膜 (transparent conductive oxides, TCO) 是 ITO (Indium Tin Oxides, $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$) 薄膜和 FTO ($\text{SnO}_2:\text{F}$) 薄膜。近年来，氧化锌掺铝 ($\text{ZnO}:\text{Al}$)，简称 AZO 或 ZAO 薄膜，也在不断开发，在触摸屏等领域已经得到广泛应用。透明导电薄膜还广泛应用于汽

车、飞机挡风玻璃，以及建筑物幕墙玻璃、冷冻冰柜等，以实现节能。另外，过去十年，多元化合物如 Zn_2SnO_4 、 ZnSnO_3 和 MgIn_2O_4 等在 low-e 膜、电致变色窗等方面也有广泛的应用。大多数透明导电薄膜都是 n 型，研究人员最近开发出 p 型透明导电薄膜，如 CuFeO_2 、 AgCoO_2 、 ZnIr_2O_4 和 CuGaO_2 等，在 p-n 结二极管及太阳能电池上有潜在应用。

2) 平板显示器件

平板显示器件 (flat panel display devices) 由集成电路和平板显示器构成，包括平板电视、平板电脑、电子书及手机等的显示屏，图 1-8 给出一些示例，如今的生活已经离不开这些平板显示器件。

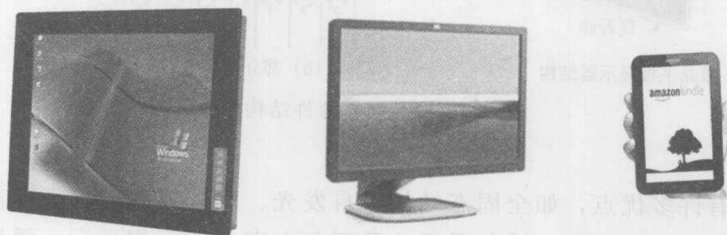


图 1-8 平板显示器件示例

平板显示器主要有等离子体平板显示器、液晶平板显示器、有机发光二极管等。目前应用最为广泛的是液晶平板显示器，有机发光二极管正在得到大力开发，已有部分产品上市。另外，碳纳米管显示器件也在不断发展，有望成为新型显示器件。下面简单介绍各种显示器结构。

(1) 液晶显示器件。

图 1-9 (a) 是液晶显示器件结构示意图。白光透过起偏器，变成偏振光，穿过电路板进入液晶。液晶的倾角由电信号控制，从而控制光的通量。透过的光经过不同的滤光片，变成不同的单色光，最后经过检偏器到达人眼。图 1-9 (b) 是平板显示器的薄膜电子元件电路图，主要由薄膜晶体管 (TFT)、薄膜电容器和透明 ITO 电极等薄膜元件组成。如果没有透明导电电极，图像就不可能显示在显示屏上，也就没有平板显示器。

(2) 有机电致发光二极管。

有机光发射二极管 (organic light emitting diode, OLED) 是一种将电能转换成光能的器件，也是一种全新的显示器件。有机发光二极管是多层薄膜结构，如图 1-10 所示。玻璃基体上依次沉积阳极 (ITO 薄膜)、空穴输运层 (TPP 分子)、发光层 (LiBq_4 分子)、电子输运层 (AlQ 分子) 和阴极 (Al 膜)。对于小分子构成的发光二极管，每种膜都必须在真空条件下制备，器件制备好后要立即封装，否则水汽和氧气进入器件内部会导致器件性能很快损坏。当器件阴极和阳极之间加上电压

后，电子-空穴对复合产生光发射，从玻璃侧射出，发射出光的颜色由发光层分子决定。

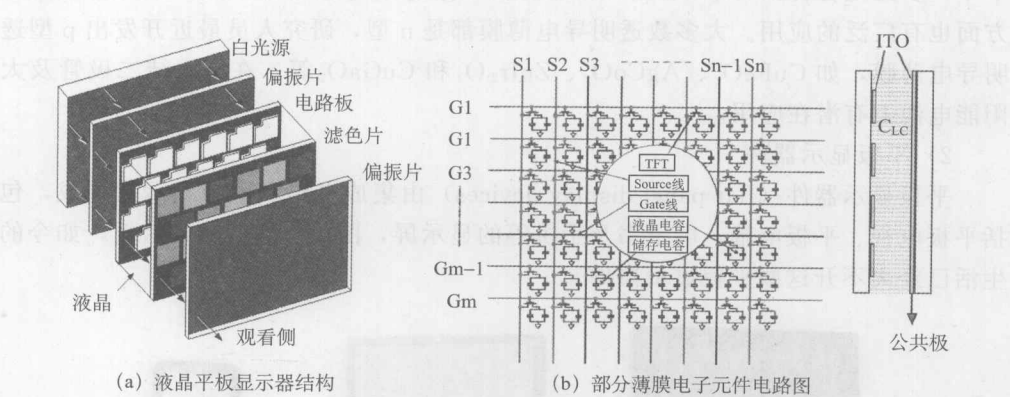


图 1-9 液晶显示器件结构图

OLED 有许多优点，如全固态结构、自发光、发光效率高、亮度高、分辨率高、视角宽、响应速度快、低电压驱动及颜色丰富、大面积显示、柔性和灵活性大、工作温度范围宽、低温特性好、薄型化、电容小、重量轻、便于携带、制造成本低等，所以 OLED 受到全球广泛关注，发展快速。OLED 已用于各种单色字符和数字、识别标签、彩色平板显示、数码相机、手机、个人数字电子助理（PDA）平板显示的背光源及移动通信等，并在全球卫星定位系统（GPS）和智能传输系统（ITS）中有应用前景。目前，已批量化应用的产品主要是单色显示板、表盘指示显示、多色手机显示屏等，图 1-11 是三星有机显示屏手机，有机显示比无机显示色泽度更好。

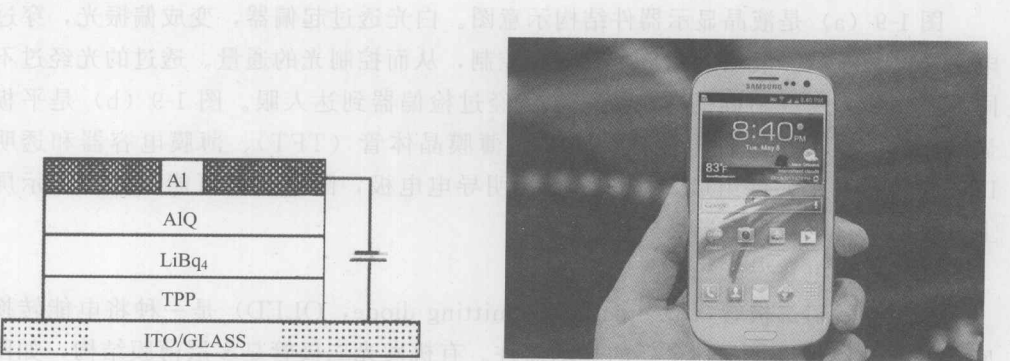


图 1-10 有机光发射二极管结构图

图 1-11 三星有机显示屏手机

3) 太阳能电池

能源和环境问题是近十几年来世界关注的焦点，为了实现能源和环境可持续发