



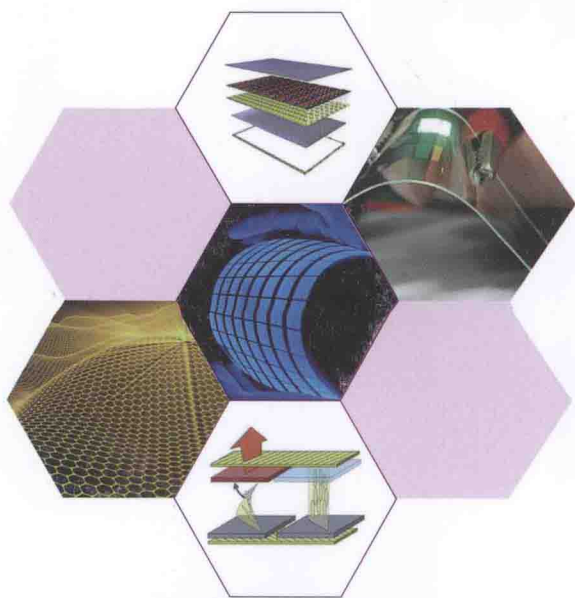
教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

**P** rinciples and Applications of Thin Film Transistors

# 薄膜晶体管 原理及应用

董承远 编著

Dong Chengyuan



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

---

Principles and Applications of Thin Film Transistors

# 薄膜晶体管 原理及应用

---

董承远 编著

Dong Chengyuan

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

作为薄膜晶体管(TFT)技术的入门教材,本书以非晶硅薄膜晶体管(a-Si TFT)和多晶硅薄膜晶体管(p-Si TFT)为例详细讲解了与 TFT 技术相关的材料物理、器件物理和制备工艺原理及其在平板显示中的应用原理等。

本书共分 7 章。第 1 章简单介绍了薄膜晶体管的发展简史;第 2 章详细阐述了 TFT 在平板显示有源矩阵驱动中的应用原理;第 3 章深入讲解了薄膜晶体管相关的半导体、绝缘体和电极材料物理;第 4 章详细阐述了非晶硅 TFT 和多晶硅 TFT 器件物理的相关基础知识;第 5 章系统介绍了 TFT 制备的单项工艺原理;第 6 章仔细讲解了非晶硅 TFT 阵列和多晶硅 TFT 阵列工艺整合原理;第 7 章简单总结全书并展望了以 a-IGZO TFT 为代表的非晶氧化物薄膜晶体管技术的发展趋势。每章后附有习题,可供课堂练习或课后作业使用。本书适合于作为大学本科生和研究生相关课程的教材,也适合针对从事 TFT 技术相关工作的工程技术人员作为技术培训和在职进修的教材或参考书籍。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

薄膜晶体管原理及应用/董承远编著.--北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-43000-1

I. ①薄… II. ①董… III. ①薄膜晶体管—高等学校—教材 IV. ①TN321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 026254 号

责任编辑:梁 颖 柴文强

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>; <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.5 字 数:353 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:39.00 元

产品编号:065521-01

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 一

### 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

## 一

### 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学			
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学	
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学	
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学	
	刘向东	浙江大学			
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学	
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学	
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学	
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学	
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学	
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学	
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学	
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学	
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学	
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学	
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学	
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学	
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学	
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学	
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学	
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学	
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学	
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学	
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所	
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团	
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院	
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学	
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学	
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学	
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学	
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学	
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学	
	苑立波	哈尔滨工程大学			
	丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

# 序

## FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 前言

## PREFACE

本书缘起于 2008 年年底,是时本书作者刚离开奋斗了五年的平板显示产业界并加入到上海交通大学电子工程系。在着手开展氧化物 TFT 相关科研工作的同时,我也决心在上海交通大学开设与薄膜晶体管技术相关的本科和研究生课程。事实上,当时国内的大学几乎没有类似课程的设置。作者之所以产生这样想法的主要依据是自己在平板显示产业界多年实际工作的亲身体会。众所周知,我国的 TFT-LCD 产业大约起步于 2003 年,以上广电和京东方几乎同时投建第 5 代液晶生产线为主要标志。作为上海光电 NEC 液晶显示器有限公司最早的工程师之一,本人也曾赴日学习过 TFT 工艺技术,后来又参与了国内第一条 TFT-LCD 第五代生产线的启动工作。2006 年离开 SVA-NEC 后我又先后在昆山龙腾光电有限公司和上海天马微电子有限公司从事过 TFT-LCD 产品设计和新技术开发的工作。值得一提的是,在上述这些平板显示公司工作时,本人也不时负责一些针对年轻工程师的技术培训工作,虽然尽心尽力去做,但培训效果总是难以令人满意。经过思考,我认为这主要源于学员 TFT 基础知识的严重不足。事实上,当时在国内的大学基本上没有专门开设与薄膜晶体管相关的课程,这导致几乎所有在产业界从事 TFT 技术相关工作的工程师都要从零开始学起。我们都知道,产业界针对员工的技术培训通常都非常注重时效性,所以对基础知识的讲解多有忽略。这样导致的后果便是国内大多数从事 TFT 技术相关工作的工程师在薄膜晶体管原理方面的掌握都不够扎实,而这势必会对产业相关技术水平的提升造成非常不利的影响。究其根源,可能还是在于国内大学本科生和研究生教育中缺乏设置这方面课程的缘故。如果国内大学中开设了与薄膜晶体管技术相关的课程,一方面部分产业界新晋工程师可能已经具备了这方面知识基础,另一方面其他未修过这些课程的新晋工程师也能以此为依据通过自修(或在职进修)而夯实自身的相关理论基础。上述设想如能实现无疑将对我国平板显示这一特大产业的可持续发展多有助益。这正是本人当初计划开课的初衷所在。

从 2009 年至今,作者先后在上海交通大学电子工程系开设了“显示电子学”(研究生选修课)、“薄膜晶体管原理及应用”(本科生必修课)和“薄膜晶体管技术”(工程硕士必修课)等几门与 TFT 技术相关的课程。开课伊始,我们便碰到了一个非常严重的问题:没有合适的教材!事实上,随着国内平板显示产业的蓬勃发展,产业界人士(如作者原来的同事谷至华、申智源和马群刚等)也陆续出版了几本与 TFT 技术相关的书籍,但都偏于实际生产相关知识的总结和介绍,对基础和原理的讲解颇有不足,因此这些书比较适合已有相当经验的在职工程师群体,并不太适合大专院校的学生或毫无经验的新晋工程师。另一方面,国外大学教授(如 Yue Kuo 和 Cherie R. Kagan 等)也曾组织专家学者编辑出版过数本专门讲述 TFT 技术的书籍,但这些由多领域专家合写的专著比较侧重于各自研究成果的发表,基础性和原

理性方面的阐述也多有欠缺,所以也不太适合直接用来作为课程教材。迫于无奈之下,本人一边自编讲义上课,一边多方积累资料准备亲自撰写一本与薄膜晶体管技术相关的教材。这便是本书的由来。

综上所述,本书的内容定位是讲解和阐述与薄膜晶体管技术相关的最基础原理,包括材料物理、器件物理、工艺原理和实际应用原理等。本书的读者定位是大专院校的本科生和研究生以及平板显示产业界无相关基础的工程师等;实际上,只要对电子电路和半导体器件方面具有一定基础的人员都能够学习并掌握本书的主要内容。本书可以作为大学本科或研究生课程的教材,也可以供企业培训或工程师自学使用。基于上述定位,本书主要阐述和讲解在知识体系上相对比较成熟的非晶硅 TFT 和多晶硅 TFT 技术相关原理。当然,其中一些总体性原理对其他 TFT 技术也应适用。另外,结合本人近年来针对 TFT 技术的教学实际经验,本书在内容讲解顺序上另辟蹊径,即按照从应用原理到器件物理再到工艺原理的顺序阐述。大家都知道,TFT 技术与平板显示产业密不可分,而这也正是 TFT 技术的重要性之所在。因此本书从薄膜晶体管在平板显示的有源矩阵中的应用原理讲起,并由此引出实际应用对 TFT 器件特性的基本要求,为后续 TFT 器件物理的讲解打下基础。接着便详细阐述了薄膜晶体管相关的材料物理和器件物理,其中非晶硅/多晶硅禁带缺陷态的产生机理和分布特点以及 TFT 器件的理论模型和特性参数提取方法等内容为着重阐述之处。在此基础上,我们又重点讲解了薄膜晶体管阵列的单项工艺原理和工艺整合原理,其中非晶硅 TFT 的 5MASK 工艺流程和多晶硅 TFT 的 6MASK 工艺流程正是当前产业界的首选技术。虽然本书把比较成熟的非晶硅 TFT 和多晶硅 TFT 技术作为主要的阐述和讲解对象,在本书的结尾处作者也结合自身的研究经验对当前比较热门的以 a-IGZO TFT 为代表的非晶氧化物薄膜晶体管(AOS TFT)技术发展作了简单的现状总结和趋势展望。在本人看来,AOS TFT 极有可能在不远的将来取代非晶硅 TFT 而成为平板显示有源矩阵驱动电子器件的主流。作者也希望将来能有机会将该部分内容扩充为另外一本书。

本书每章后都附有习题,这些习题可供教师在讲课时作为例题和课堂练习题使用,也可以作为学生(员)的课后作业。另外,作为教材,本书的资料来源众多,作者在每章后都尽力列出了主要参考文献,有些图片的来源也在其下方一一写明。如有遗漏之处敬请谅解。

三人行,必有吾师焉。仅以本书献给所有在专业技术领域对我有所教益的老师、同学、同事、同行和学生们。

作者

2015年9月

于上海交通大学电子系



# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 薄膜晶体管发展简史 .....	1
1.2 薄膜晶体管的技术分类及比较 .....	4
1.3 薄膜晶体管的应用简介 .....	4
1.4 本书的主要内容及架构 .....	5
习题 .....	5
参考文献 .....	5
<b>第 2 章 平板显示的有源矩阵驱动</b> .....	7
2.1 平板显示简介 .....	7
2.1.1 显示技术的分类及特性指标 .....	7
2.1.2 平板显示的定义和分类 .....	12
2.1.3 液晶显示器件的基本原理 .....	12
2.1.4 有机发光二极管显示的基本原理 .....	15
2.2 液晶显示的有源矩阵驱动 .....	17
2.2.1 液晶显示的静态驱动和无源矩阵驱动简介 .....	19
2.2.2 AMLCD 像素电路的充放电原理 .....	21
2.2.3 AMLCD 像素阵列的相关原理 .....	30
2.2.4 液晶显示有源矩阵驱动的特殊方法 .....	36
2.2.5 液晶显示有源矩阵驱动的技术要求 .....	41
2.3 有机发光二极管显示的有源矩阵驱动 .....	42
2.3.1 有机发光二极管显示的无源矩阵驱动简介 .....	43
2.3.2 有机发光二极管显示的有源矩阵驱动基本原理 .....	44
2.3.3 有机发光二极管有源矩阵驱动的技术要求 .....	46
2.4 本章小结 .....	47
习题 .....	47
参考文献 .....	48
<b>第 3 章 薄膜晶体管材料物理</b> .....	49
3.1 非晶硅材料物理 .....	49
3.1.1 非晶体简介 .....	49
3.1.2 非晶硅材料结构 .....	52
3.1.3 非晶硅电学特性 .....	58
3.2 多晶硅材料物理 .....	61
3.2.1 多晶体简介 .....	61
3.2.2 多晶硅材料结构 .....	63

3.2.3	多晶硅电学特性 .....	66
3.3	薄膜晶体管绝缘层材料 .....	70
3.3.1	绝缘层介电特性 .....	70
3.3.2	绝缘层漏电特性 .....	72
3.3.3	氮化硅薄膜 .....	73
3.3.4	氧化硅薄膜 .....	73
3.4	薄膜晶体管电极材料 .....	74
3.4.1	导电材料简介 .....	74
3.4.2	TFT用铝合金薄膜 .....	75
3.4.3	ITO .....	76
3.5	平板显示用玻璃基板简介 .....	77
3.6	本章小结 .....	78
	习题 .....	78
	参考文献 .....	79
<b>第4章</b>	<b>薄膜晶体管器件物理</b> .....	<b>81</b>
4.1	薄膜晶体管的器件结构 .....	81
4.1.1	薄膜晶体管的器件结构分类 .....	81
4.1.2	非晶硅薄膜晶体管器件结构的选择 .....	82
4.1.3	多晶硅薄膜晶体管器件结构的选择 .....	83
4.2	薄膜晶体管器件的操作特性及理论模型 .....	84
4.2.1	薄膜晶体管的操作特性 .....	84
4.2.2	薄膜晶体的简单物理模型 .....	91
4.2.3	薄膜晶体的精确物理模型 .....	95
4.2.4	薄膜晶体的特性参数及提取方法 .....	100
4.2.5	薄膜晶体管操作特性的影响因素分析 .....	107
4.3	薄膜晶体的稳定特性 .....	109
4.3.1	非晶硅薄膜晶体管的电压偏置稳定特性 .....	109
4.3.2	多晶硅薄膜晶体管的电压偏置稳定特性 .....	111
4.3.3	薄膜晶体的环境效应 .....	113
4.4	本章小结 .....	114
	习题 .....	114
	参考文献 .....	116
<b>第5章</b>	<b>薄膜晶体管单项制备工艺</b> .....	<b>117</b>
5.1	成膜工艺 .....	118
5.1.1	磁控溅射 .....	119
5.1.2	等离子体化学气相沉积 .....	123
5.2	薄膜改性技术 .....	128
5.2.1	激光结晶化退火 .....	128
5.2.2	离子注入 .....	134
5.3	光刻工艺 .....	139
5.3.1	曝光工艺 .....	140
5.3.2	光刻胶涂覆与显影工艺 .....	144
5.4	刻蚀工艺 .....	148
5.4.1	湿法刻蚀 .....	149

5.4.2	干法刻蚀	153
5.5	其他工艺	157
5.5.1	洗净	157
5.5.2	光刻胶剥离	159
5.5.3	器件退火	160
5.6	工艺检查	161
5.6.1	自动光学检查	162
5.6.2	断/短路检查	163
5.6.3	阵列测试	164
5.6.4	TEG 测试	164
5.7	本章小结	165
	习题	165
	参考文献	166
<b>第 6 章</b>	<b>薄膜晶体管阵列制备工艺整合</b>	<b>168</b>
6.1	AMLCD 制备工艺概述	169
6.1.1	阵列工程	170
6.1.2	彩膜工程	170
6.1.3	成盒工程	172
6.1.4	模组工程	173
6.2	非晶硅薄膜晶体管阵列基板制备工艺流程	174
6.2.1	5MASK a-Si TFT 工艺流程	176
6.2.2	4MASK a-Si TFT 工艺流程	189
6.3	AMOLED 制备工艺概述	193
6.3.1	阵列工程	194
6.3.2	OLED 工程	195
6.3.3	成盒工程/模组工程	196
6.4	多晶硅薄膜晶体管阵列基板制备工艺流程	197
6.4.1	6MASK p-Si TFT 工艺流程	197
6.4.2	10MASK p-Si TFT 工艺流程	202
6.5	阵列检查与修补	203
6.6	本章小结	205
	习题	206
	参考文献	207
<b>第 7 章</b>	<b>总结与展望</b>	<b>208</b>
7.1	全书内容总结	208
7.2	薄膜晶体管技术发展展望	209
	参考文献	211
<b>附录 A</b>	<b>物理常数表</b>	<b>213</b>
<b>附录 B</b>	<b>单位前缀一览表</b>	<b>214</b>
<b>附录 C</b>	<b>单晶硅材料特性参数一览表</b>	<b>215</b>
<b>附录 D</b>	<b>氮化硅与氧化硅材料特性参数一览表</b>	<b>216</b>
<b>附录 E</b>	<b>10MASK p-Si TFT 制备工艺流程一览</b>	<b>217</b>

薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)属于场效应晶体管家族中的一员,这个家族除了 TFT 之外还包括金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)等其他半导体器件。MOSFET 在集成电路(Integrated Circuit, IC)技术领域得到了非常广泛的应用,而 TFT 则在平板显示(Flat Panel Display, FPD)这一特大型产业中大显身手。事实上,上述两种半导体器件从诞生到发展均存在密不可分的相互关系。下面我们先简单介绍一下场效应晶体管特别是 TFT 的发展简史,然后简单总结 TFT 技术分类和实际应用情况,最后介绍本书的主要内容和基本框架结构。

## 1.1 薄膜晶体管发展简史

场效应晶体管的发明最早可以追溯到 1934 年 Lilienfeld 提出的发明专利。如图 1.1(a)所示,该发明提出的电子器件结构与底栅错排(Inverted Staggered)型薄膜晶体管的结构非常相似,即由最下层电极加载电压控制电子器件的电流大小,电流在最上层两个电极之间流动。令人遗憾的是,Lilienfeld 在该器件的工作原理的描述上并不完全准确,他没有理解有源层(Active Layer)必须由半导体材料来制作的技术关键。Heil 在 1935 年提出的发明专利(如图 1.1(b)所示)则很好地解决了这一问题。该专利明确地指出必须采用半导体材料作为场效应晶体管的有源层。尽管如此,20 世纪 30 年代的电子制造工艺水平尚未达到这种固体器件制作的要求,所以上述场效应晶体管的发明尚只停留在原理构思的阶段。

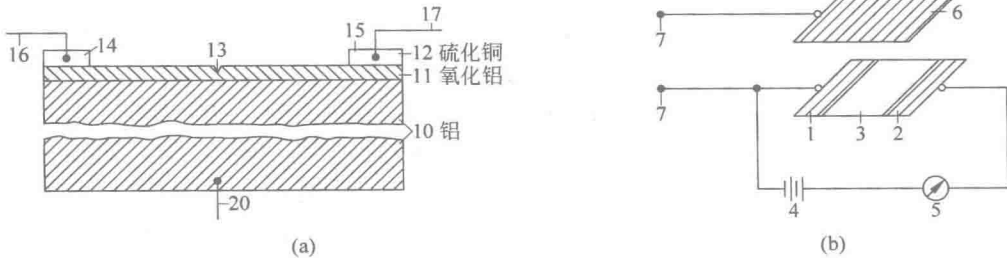


图 1.1 最早的场效应晶体管发明专利:(a) Lilienfeld 在 1934 年提出的电子器件发明构想;  
(b) Heil 在 1935 年提出的半导体器件发明构想

事实上,最先被真正实现的场效应晶体管是 1952 年由 Shockley 提出并于 1954 年被 Dacey 等人实际制作出来的结型场效应晶体管(Junction FET, JFET)。更为重要的发明是 Hofstein 等人在 1963 年提出的 MOSFET。如图 1.2 所示,当时提出的 MOSFET 基本结构一直沿用至今,这种器件结构称为平面型(Coplanar)结构。MOSFET 以单晶硅硅片作为基底和器件有源层,以其上面通过热氧化形成的氧化硅( $\text{SiO}_2$ )薄膜作为栅绝缘层(Gate Insulator, GI);源(Source)和漏(Drain)电极在器件下层并分立于有源层的两侧;栅(Gate)电极则位于器件的最上部。以 N 型 MOSFET(简称 NMOS)为例,当栅电极加载足够大的正电压时,在有源层中将形成电子导电沟道;如果在漏电极同时加载正电压时,电子将由源极流向漏极,即形成从漏极到源极的电流。

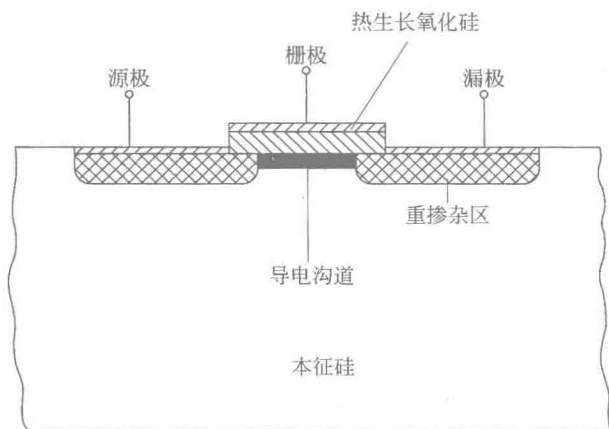


图 1.2 S. R. Hofstein 等人在 1963 年提出的 MOSFET 器件结构示意图

几乎与 MOSFET 发明的同时,TFT 也被发明并实际制造出来。如图 1.3 所示,当时提出的是一种典型的错排型(Staggered)结构,有源层则采用当时非常流行的半导体材料 CdS。我们比较图 1.2 和图 1.3 所示的两种器件结构后会发现,它们非常类似,即都包括栅电极、栅绝缘层、有源层和源漏电极等基本部件,而且各部件的位置也大体一致。当然两者之间在基底材料的选择、栅绝缘层的制备方法、有源层的选择以及电极层与有源层之间的相互位置关系等方面也存在着重要的区别。这些区别决定了 TFT 与 MOSFET 虽然在器件功能上非常类似,但前者的器件电学特性要远逊于后者。当然,TFT 在制作成本上具有明显优势。

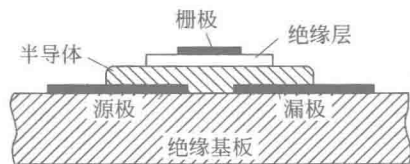


图 1.3 P. K. Weimer 等人在 1962 年提出的 TFT 基本结构示意图

因为在器件结构、功能和工作原理上的相似性,TFT 从其诞生之日起便与 MOSFET 在实际应用上展开了激烈的竞争。20 世纪 60 年代正是集成电路起步的阶段,面对这一崭新的应用领域,TFT 和 MOSFET 都有望成为集成电路的基本构成器件。一方面,TFT 具有

成本上的优势；另一方面，MOSFET 在器件特性上更胜一筹。因此，开始时两者的竞争不相上下，但随着时间的推移，MOSFET 性价比的提升越来越快，从而逐渐胜出。到 20 世纪 60 年代末，TFT 技术因在集成电路领域中无法与 MOSFET 相抗衡而导致相关研发陷入停滞状态。

新的机会出现在 20 世纪 70 年代初。当时液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)技术正处于快速发展阶段，急需一种能在大面积玻璃上制备的半导体器件作为有源矩阵驱动的开光。只有 TFT 能够恰好满足这种要求。图 1.4 是 1973 年展出的由 CdS TFT 阵列(120×120)驱动的液晶显示样机。由此起步并发展至今，逐步形成了庞大的薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)产业。



图 1.4 T. P. Brody 等人制备的 6"×6"的有源矩阵驱动液晶显示器(Active Matrix Liquid Crystal Display, AMLCD)样机(1973 年)

随着 TFT-LCD 产业的迅猛发展，CdSe TFT 的电学特性越来越无法满足液晶有源矩阵驱动技术对开关器件的需求。从实际应用的角度讲，CdSe TFT 存在的最大问题是其电学特性对环境非常敏感，这对其实际应用产生了非常不利的影晌；此外，Cd 元素的使用对环境也会造成不好的影晌。为此，科研人员开始尝试开发新的薄膜晶体管器件，如 PbS TFT 等，但结果均不十分理想。直到 1979 年，LeComber 等人研究并开发出了非晶硅(amorphous silicon, a-Si) TFT 才使这一难题得到彻底解决。事实上，未经处理的 a-Si 材料的电学特性并不理想，但是通过掺氢的方法而获得的掺氢非晶硅(a-Si:H)的特性则完全可满足 TFT 有源层的技术要求。因此，从 1979 年至今，a-Si:H TFT 一直是液晶显示有源矩阵驱动电子器件的主流。

尽管 a-Si TFT 能够基本满足 AMLCD 的技术要求，但较低的场效应迁移率( $<1\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )使其无法驱动高分辨率的液晶显示；此外，有源矩阵发光二极管(Active Matrix Organic Light Emitting Diode, AMOLED)等新型平板显示技术也对 TFT 的电学特性提出了更高的要求，这也是 a-Si TFT 所无法达到的。1980 年由美国 IBM 公司的 Depp 等人发明的多晶硅(polycrystalline silicon, p-Si)薄膜晶体管技术则很好地填补了这一技术空白。通过准分子激光退火(Excimer Laser Annealing, ELA)获得的低温多晶硅(Low Temperature Polycrystalline Silicon, LTPS)的迁移率可以达到非晶硅的数十倍乃至数百倍以上。尽管如此，p-Si TFT 因为具有生产成本高和制备均一性差等缺点而一直未在 FPD 领域得到广泛的应用。

另一方面，柔性显示技术的发展要求 TFT 不仅能在玻璃基板上制备还应该可以在塑料等柔性衬底上形成并在弯曲等状态下仍能正常工作。硅基薄膜晶体管很难满足上述要

求。为此,研究人员将视线转到有机半导体材料并在 1983 年首次开发出了以聚乙炔/聚硅氧烷为有源层的有机薄膜晶体管(Organic Thin Film Transistor, OTFT)。与 a-Si TFT 不同,OTFT 通常是以空穴导电为主的 P 型半导体器件,其迁移率也较前者为低。遗憾的是,因为有机材料所固有的不稳定性导致 OTFT 至今尚未大规模投入实际生产。

进入 21 世纪以来,薄膜晶体管技术随着平板显示产业的快速发展也取得了长足的进步。比较突出的表现是氧化物薄膜晶体管(Oxide Thin Film Transistor, Oxide TFT)的发明并投入实际应用。最开始人们研究的氧化物有源层材料是具有多晶体结构的 ZnO 等,后来研究人员逐渐将关注点转移到非晶氧化物半导体(Amorphous Oxide Semiconductor, AOS),特别是非晶铟镓锌氧(amorphous InGaZnO, a-IGZO)薄膜上来。值得一提的是,a-IGZO TFT 是由日本东京理工大学的 Hosono 研究小组于 2004 年发明的。因为具有高场效应迁移率、好的制备均一性和可低温制备等优点,a-IGZO TFT 目前已经在实际生产中得到了应用。

## 1.2 薄膜晶体管的技术分类及比较

根据所采用有源层材料的不同,当前正在使用或研究的薄膜晶体管技术可以分为 a-Si TFT, p-Si TFT, OTFT 和 Oxide TFT 四大类。下面将上述四种 TFT 技术的特点加以简单比较:

(1) a-Si TFT 具有制备均一性好和生产合格率高优点,但其稳定性不太理想且场效应迁移率很低。a-Si TFT 是当前 AMLCD 有源矩阵驱动电子器件的主流。

(2) p-Si TFT 具有非常高的场效应迁移率和相对较好的器件稳定性,但是其制备均一性较差且生产合格率较低。p-Si TFT 目前在小尺寸的 AMLCD 和 AMOLED 中具有一定应用。

(3) OTFT 具有制备均一性好、柔性强和生产成本低的优点,但是其稳定性极差且器件场效应迁移率非常低。OTFT 目前基本上处于研究和开发阶段,还没有投入实际生产。

(4) Oxide TFT 具有高的场效应迁移率、好的制备均一性、较好的电学稳定性和光学透明等技术优势,但是其特性比较容易受到环境因素的影响。目前 Oxide TFT 已经在平板显示中得到了初步应用,预期在不远的将来这种新技术将得到更广泛的实际应用。

## 1.3 薄膜晶体管的应用简介

薄膜晶体管当前最主要的应用领域就是平板显示。事实上,从 1 英寸的手机显示屏到 110 英寸的液晶电视,几乎均采用 TFT 作为其有源矩阵驱动的电子器件。当前 TFT-LCD 已经成为仅次于 IC 的第二大电子工业,其在国民生产和生活中所占据的地位越来越重要;高分辨率和大尺寸是 TFT-LCD 技术发展的基本趋势。另一方面,AMOLED 等新型的显示器件也正处在快速发展中,并可望在不远的将来形成巨大的市场和产业。上述技术的发展都需要更先进的 TFT 技术予以支撑。

除了平板显示以外,薄膜晶体管还在 X 射线图像传感器领域中得到了重要应用。传统的 X 射线传感器采用 CMOS 阵列完成光学信息的采集和处理,如果采用 TFT 技术,则可以

实现 1:1 的图像采集,并且生产成本也可显著降低。

此外,随着 p-Si TFT 和 Oxide TFT 等高迁移率器件的出现和发展,科研人员也尝试重新将 TFT 技术应用到低成本集成电路领域中去。尽管目前投入实际生产的实例仍较少,但随着物联网技术的发展,TFT 在这方面的应用可能具有越来越广阔的空间。

## 1.4 本书的主要内容及架构

本书主要以目前比较成熟的 a-Si TFT 和 p-Si TFT 技术为例重点讲解薄膜晶体管技术涉及的材料、器件和工艺原理,以及在平板显示中应用的基本原理和方法等。具体包括如下基本内容:

- (1) 绪论: TFT 发展简史; TFT 技术分类及比较; TFT 技术的应用简介等。
- (2) 平板显示的有源驱动: 平板显示简介; 液晶的有源矩阵驱动; 有机发光二极管显示的有源矩阵驱动等。
- (3) 薄膜晶体管材料物理: 非晶硅材料物理; 多晶硅材料物理; 薄膜晶体管绝缘层材料; 薄膜晶体管电极材料; 平板显示用玻璃基板等。
- (4) 薄膜晶体管器件物理: TFT 器件结构; TFT 器件的操作特性及理论模型; TFT 特性参数提取方法; TFT 器件稳定性等。
- (5) 薄膜晶体管制备单项工艺: 成膜工艺; 薄膜改性工艺; 光刻工艺; 刻蚀工艺; 其他工艺等。
- (6) 薄膜晶体管工艺整合: AMLCD 制备工艺概述; 非晶硅薄膜晶体管制备工艺流程; AMOLED 制备工艺概述; 多晶硅制备工艺流程; 阵列检查与修补等。
- (7) 总结与展望: 本书内容的总结; 薄膜晶体管技术发展展望等。

## 习题

1. TFT 与 MOSFET 在结构和功能上有何异同?
2. 薄膜晶体管技术包括哪几类? 试比较不同种类 TFT 的优缺点。
3. TFT 技术的主要应用领域包括哪些?

## 参考文献

- [1] Cherie R. Kagan and Paul Andry. Thin-Film Transistors. ARCEL DEKKER, INC, 2003.
- [2] Yue Kuo. Thin Film Transistors: Materials and Process, Vol. 1: Amorphous Silicon Thin Film Transistors. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] Yue Kuo. Thin Film Transistors: Materials and Process, Volume 2: Polycrystalline Silicon Thin Film Transistors. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [4] Reza Chaji and Arokia Nathan. Thin Film Transistor Circuits and System. Cambridge University Press, 2013.
- [5] 戴亚翔. TFT LCD 面板的驱动与设计. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [6] 谷至华. 薄膜晶体管(TFT)阵列制造技术. 上海: 复旦大学出版社, 2007.



- [7] 申智源. TFT-LCD 技术: 结构、原理及制造技术. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [8] J. E. Lilienfeld. Device for Controlling Electric Current. US Pat. 1,900,018 (1933).
- [9] O. Heil. Improvements in or Relating to Electrical Amplifiers and Other Control Arrangements and Devices. Brit. Pat. BP439,457 (1935).
- [10] W. Shockley. A Unipolar "Field-Effect" Transistor. Proc. IEEE, 1952, 40: 1365.
- [11] G. C. Dacey and I. M. Ross. The Field-Effect Transistor. Bell Syst. Tech. J., 1955, 34: 1149.
- [12] S. R. Hofstein and F. P. Heiman. The Silicon Insulated-Gate Field-Effect Transistor. Proc. IEEE, 1963, 51: 1190.
- [13] P. K. Weimer. The TFT—A New Thin-Film Transistor. Proc. IEEE, 1962, 50: 1462.
- [14] P. G. LeComber, W. E. Spear, and A. Ghaith. Amorphous Silicon Field-Effect Device and Possible Application. Electron. Lett. 1979, 15: 179.
- [15] S. W. Depp, A. Juliana, and B. G. Huth. Polysilicon FET Devices for Large Area Input/Output Applications. Proc. 1980 Int. Electro Device Mtg. (IEEE, New York, 1980), p. 703.
- [16] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. Nature, 2004, 432: 488-492.