



现代应用物理学丛书

# 柔性电子材料与器件

李润伟 刘 钢 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代应用物理学丛书

# 柔性电子材料与器件

李润伟 刘 钢 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书简要介绍柔性电子器件出现的背景、应用领域、基本结构和核心硬件技术,系统阐述柔性电路、应力传感器、环境传感器、光探测器、磁场传感器和存储器、阻变存储器、发光器件、晶体管以及吸波器件的基本工作原理、器件结构、材料选择与制备方法以及在柔性化应用中所遇到的机遇和挑战等,详细介绍相关领域国内外的最新研究进展,并以电子皮肤为牵引探讨柔性电子材料与器件未来的发展趋势。

本书适合柔性电子材料与器件相关领域的研究人员、工程师及相关专业人员阅读,可以向读者提供广泛的知识交叉和技术交叉信息,启发和促进各自专业知识学习和技术研发;也可作为大专院校相关专业师生的自学和教学参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

柔性电子材料与器件/李润伟,刘钢编著. —北京:科学出版社,2019.1  
(现代应用物理学丛书)

ISBN 978-7-03-059939-1

I. ①柔… II. ①李… ②刘… III. ①电子器件 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 275059 号

责任编辑:钱俊/责任校对:杨然  
责任印制:张伟/封面设计:陈敬

**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>

**北京九州迅驰传媒文化有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:13 1/2 插页:2

字数:258 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《现代应用物理学丛书》编委会

主 编：沈保根

编 委：（按拼音排序）

曹俊诚	崔 田	崔铁军	杜江峰	高洪钧
顾长志	贾金峰	姜晓明	李发伸	柳卫平
陆 卫	罗先刚	梅良模	彭练矛	沈 健
王秋良	闻海虎	肖国青	杨德仁	张守著
张天才	张志东	赵 颖	朱 静	

## 本书作者

编 著：李润伟 刘 钢

参 编：（按章节顺序）

胡 超（第1章）

孙丹丹 李法利（第2章）

刘宜伟 周酉林（第3章）

伊晓辉 杨华礼 谢亚丽（第4章）

檀洪伟 方清明（第5章）

詹清峰 王保敏（第6章）

尚 杰（第7章）

陈 斌（第8章）

潘 亮 卢 颖（第9章）

满其奎 胡仁超（第10章）

巫远招（第11章）

# 前 言

柔性电子技术是一个相对较新的技术领域，是当今最有前景的信息技术之一，受到学术界和工业界的广泛关注。柔性电子技术需要在柔性衬底上实现从纳米特征、微观结构到宏观器件大面积集成等的跨尺度制造，其关键在于有机材料、金属材料、无机非金属材料以及纳米材料等机械、电学性能迥异的功能材料间界面的精确控制，涉及电子信息、材料、物理、化学甚至生物等多学科的交叉，亟待进一步研究和探索。本书从柔性电子器件的工作原理、材料选择、结构和电路设计、制备方法以及应用领域等方面进行系统阐述，力图全面展现柔性电子材料与器件的研究现状和最新进展。

本书共 11 章，其中第 1 章柔性电子器件概述由胡超撰写，第 2 章柔性导电材料与电路由孙丹丹和李法利撰写，第 3 章柔性应力敏感材料与应力传感器由刘宜伟和周西林撰写，第 4 章柔性环境传感材料与传感器由伊晓辉、杨华礼和谢亚丽撰写，第 5 章柔性光敏感材料与光探测器由檀洪伟和方清明撰写，第 6 章柔性磁传感和存储材料与器件由詹清峰和王保敏撰写，第 7 章柔性阻变材料与阻变存储器由尚杰撰写，第 8 章柔性发光材料与器件由陈斌撰写，第 9 章柔性半导体材料与晶体管由潘亮和卢颖撰写，第 10 章柔性吸波材料与吸波器件由满其奎和胡仁超撰写，第 11 章电子皮肤由巫远招撰写。全书由李润伟、刘钢统稿，应华根、夏羽青参与编稿。

感谢各级各类人才政策的支持：中组部“万人计划”、科技部“中青年科技创新领军人才计划”、中国科学院“百人计划”、浙江省“千人计划”、浙江省“151”人才工程、宁波市“3315 人才计划”等。感谢各级各类科研计划的支持：科技部重点研发计划，国家自然科学基金委员会国家杰出青年科学基金项目、优秀青年科学基金项目、面上项目和青年科学基金项目，浙江省杰出青年科学基金项目，宁波市国际合作项目等。

感谢国家科学技术学术著作出版基金的资助。

希望在中国科学院宁波材料技术与工程研究所颇具特色的科研环境和人文环境中结集出版的本书，对读者们能有所裨益。由于著者水平和经验有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

李润伟 刘 钢  
2018 年 5 月 30 日

# 目 录

## 前言

第 1 章 柔性电子器件概述	1
1.1 引言	1
1.2 柔性电子器件的基本结构	6
1.2.1 柔性衬底	8
1.2.2 柔性电极和互联导体	9
1.2.3 柔性功能材料和柔性电子元件	10
1.2.4 柔性封装层	11
1.3 柔性可穿戴电子设备中的核心硬件技术	11
1.3.1 电路技术	11
1.3.2 传感器技术	11
1.3.3 存储器技术	13
1.3.4 显示技术	13
1.4 柔性可穿戴电子设备未来发展趋势	14
参考文献	15
第 2 章 柔性导电材料与电路	19
2.1 柔性电路的定义及重要性	19
2.2 柔性电路的导电材料	19
2.2.1 金属薄膜	19
2.2.2 纳米晶墨水	21
2.2.3 液态金属	23
2.2.4 其他	25
2.3 柔性电路的制备方法	25
2.3.1 传统微电子加工技术	25
2.3.2 印刷技术	25
2.3.3 其他技术	30
2.4 柔性电路的应用	32
2.5 总结与展望	33
参考文献	34

<b>第 3 章 柔性应力敏感材料与应力传感器</b> .....	37
3.1 柔性应力传感器的应用背景 .....	37
3.2 柔性应力敏感材料与应力传感器 .....	37
3.2.1 电阻式柔性应力传感器 .....	38
3.2.2 电阻式可拉伸应力传感器 .....	41
3.2.3 电容式柔性应力传感器 .....	43
3.2.4 压电式柔性应力传感器 .....	46
3.2.5 基于其他原理的柔性应力传感器 .....	48
3.3 总结和展望 .....	49
参考文献 .....	50
<b>第 4 章 柔性环境传感材料与传感器</b> .....	53
4.1 湿度传感器 .....	53
4.1.1 湿度传感器的简介 .....	53
4.1.2 湿度传感器的工作原理 .....	53
4.1.3 柔性湿度传感器 .....	54
4.2 温度传感器 .....	57
4.2.1 温度传感器的简介 .....	57
4.2.2 温度传感器的工作原理 .....	57
4.2.3 柔性温度传感器 .....	58
4.3 气体传感器 .....	60
4.3.1 气体传感器的简介与工作原理 .....	60
4.3.2 柔性气体传感器 .....	61
4.4 总结与展望 .....	65
参考文献 .....	65
<b>第 5 章 柔性光敏感材料与光探测器</b> .....	69
5.1 引言 .....	69
5.2 光探测器基本原理、性能参数及主要器件结构 .....	69
5.2.1 光探测基本原理 .....	69
5.2.2 光探测性能参数 .....	70
5.2.3 光探测器件结构 .....	71
5.3 柔性光探测器的材料 .....	74
5.4 总结与展望 .....	83
参考文献 .....	84
<b>第 6 章 柔性磁传感和存储材料与器件</b> .....	87
6.1 引言 .....	87
6.2 可弯曲柔性磁传感器 .....	87
6.2.1 柔性巨磁电阻多层膜传感器 .....	87



6.2.2	柔性磁性隧道结传感器	92
6.2.3	其他柔性磁传感器	93
6.3	可拉伸柔性磁传感器	94
6.3.1	可拉伸巨磁电阻多层膜磁传感器	95
6.3.2	可拉伸巨磁电阻自旋阀传感器	99
6.4	柔性磁存储器件	102
6.4.1	磁阻随机存储器的发展	102
6.4.2	柔性磁阻随机存储器	103
6.5	总结与展望	105
	参考文献	105
<b>第 7 章</b>	<b>柔性阻变材料与阻变存储器</b>	<b>107</b>
7.1	引言	107
7.2	阻变存储器的基本工作原理	107
7.3	柔性阻变存储器的材料体系与发展现状	109
7.3.1	柔性阻变存储器的材料体系	109
7.3.2	柔性阻变存储器的发展现状	113
7.4	柔性阻变存储器的力学性能	116
7.5	总结与展望	120
	参考文献	121
<b>第 8 章</b>	<b>柔性发光材料与器件</b>	<b>127</b>
8.1	引言	127
8.2	柔性发光器件的概况	127
8.2.1	发光技术的基本原理与器件结构	127
8.2.2	发光器件的基本性能参数	129
8.2.3	柔性发光器件的发展历程	130
8.3	柔性发光材料与器件的研究现状	130
8.3.1	柔性衬底支撑材料	130
8.3.2	柔性透明电极材料	131
8.3.3	柔性发光材料	134
8.4	总结与展望	138
	参考文献	138
<b>第 9 章</b>	<b>柔性半导体材料与晶体管</b>	<b>142</b>
9.1	引言	142
9.2	柔性薄膜晶体管的器件结构与工作原理	143
9.3	柔性薄膜晶体管的重要性能参数	145
9.4	柔性薄膜晶体管的主要材料	148

9.4.1	柔性衬底材料	148
9.4.2	柔性栅绝缘层材料	149
9.4.3	柔性半导体有源层材料	153
9.4.4	柔性电极材料	157
9.5	总结与展望	157
	参考文献	158
<b>第 10 章</b>	<b>柔性吸波材料与吸波器件</b>	<b>161</b>
10.1	引言	161
10.1.1	电磁波的应用	161
10.1.2	电磁波的危害	162
10.2	柔性电磁波吸收材料的设计和制造	163
10.2.1	吸波材料设计原理	163
10.2.2	电磁波吸收剂	170
10.2.3	柔性吸波材料制造方法	176
10.3	柔性电磁波吸收材料的应用与展望	180
10.3.1	柔性吸波材料在军事领域的应用	180
10.3.2	柔性吸波材料在民用领域的应用	181
	参考文献	181
<b>第 11 章</b>	<b>电子皮肤</b>	<b>184</b>
11.1	人体皮肤概述	184
11.2	电子皮肤概述	185
11.3	电子皮肤材料	186
11.3.1	基底材料	187
11.3.2	敏感材料	188
11.4	电子皮肤的性能要求	192
11.4.1	生物兼容性	192
11.4.2	自我修复能力	192
11.4.3	自我供电能力	194
11.5	电子皮肤的应用	195
11.5.1	体温传感	195
11.5.2	体征监测	196
11.5.3	运动监测	197
11.5.4	表情识别	198
11.6	总结与展望	199
	参考文献	200
	索引	204
	彩图	

# 第 1 章 柔性电子器件概述

## 1.1 引言

20 世纪后半叶, 计算机技术、通信技术和网络技术三大技术的迅猛发展, 为网络传播的实现提供了必要的条件。互联网诞生至今, 发展极为迅速, 已然成为现代人类社会信息传播活动最重要的渠道和手段之一。从 1991 年开始, 互联网的发展逐步走向商业化, 在通信、检索和客户服务等方面吸引了越来越多的用户。进入 21 世纪以来, 在互联网基础上将用户端延伸和扩展到了任何物品和物品之间, 实现物物之间的信息交换和通信, 又产生了物物相连的互联网, 即物联网 (internet of things, 或 IoT) 技术。物联网技术通过智能感知技术、识别技术与普适计算, 广泛应用于互联网络的融合中, 可建成一个随时、随地、任何物体以及任何人均可连接的泛在网络社会, 从而实现物品与物品 (thing to thing, T2T)、人与物品 (human to thing, H2T) 以及人与人 (human to human, H2H) 之间的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理<sup>[1]</sup>。由于物联网具有实时性和交互性的特点, 因此在智能家居、零售物流、交通管理、医疗教育、能源电力、安防反恐、城市管理、电子政府等领域具有十分广泛的应用前景, 也被认为是继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮, 有望形成下一个万亿元规模的高科技市场。

互联网乃至物联网的发展, 在很大程度上依赖于各种电子信息器件和集成电路 (integrated circuit, IC) 技术的快速进步。集成电路是通过半导体工艺将一定数量的电子元件如电阻、电容、电感、晶体管以及布线集成在一起, 从而形成的具有某些特定功能的微型电子器件。由于集成电路中所有元件在结构上已形成一个整体, 因而电子元件朝向微型化、低功耗、智能化和高可靠化方面迈进了一大步。得益于半导体技术的飞速发展, 硅基晶元上所能制作的晶体管最小特征尺寸不断降低、器件密度不断提高, 集成电路技术在过去半个多世纪里获得了巨大的进步, 并一直遵循摩尔定律 (Moore's law) 的预测, 每 18~24 个月集成度提高 1 倍, 从而带来电路性能如运算速度和计算能力的不断提高以及单位成本的持续降低 (图 1.1)。但随着晶体管特征尺寸逐渐接近物理极限, 严重的漏电、发热和功耗问题极大地动摇了半导体元件的稳定性和可靠性; 同时, 二维微缩工艺难度越来越大, 微缩所带来的成本优势开始放缓, 半导体工业可能在不远的将来放弃对摩尔定律的追逐<sup>[2-7]</sup>。

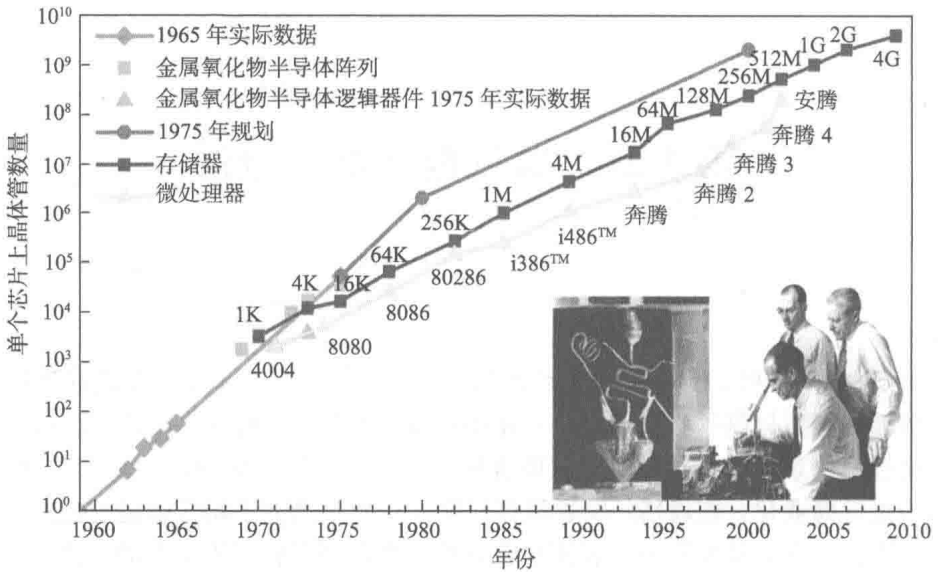


图 1.1 摩尔定律

为了进一步提高集成电路芯片的运算性能，工业界近年来从尺寸微缩的角度提出了延续摩尔（more Moore）定律的思路。例如，通过发展鳍式晶体管（FinFET）等新型器件结构进一步降低单元尺寸，来获得高速、高密度和低功耗的芯片，并且在 iPhone 7 所采用的 A10 处理器上得到了应用。另外，传统的半导体器件主要在刚性硅基衬底或平板玻璃上实现大规模集成，芯片形状固定并且坚硬耐用，有助于保护电子元器件在使用中不会轻易受到损坏。但刚性的衬底和电子元器件不可避免地制约了集成电路芯片的柔韧性、延展性乃至其功能的灵活性和应用范围。因而，从功能集成的角度，最近学术界又提出了超越摩尔（more than Moore）定律的思路，通过发展非硅电子器件、光电器件、磁电器件以及柔性电子（flexible electronics）器件技术<sup>[8]</sup>等方式实现半导体元件的功能化、多样化乃至个性化，以继续推进电子技术的快速发展（图 1.2）。其中，柔性可穿戴电子器件具有优异的形变能力、大面积制备的潜力以及在同一平面上实现多种信息功能集成的能力，可以进一步将集成电路的应用领域从信息处理拓展到生物传感和人机交互等方面，从而有望为人类生活带来革命性的变化。

一般来说，柔性电子也称印刷电子（printed electronics）、生物电子（bioelectronics）、有机电子（organic electronics）、塑料电子（plastic electronics）或纳米电子（nano electronic）等，是一类以塑料基板、金属薄板、玻璃薄板、橡胶基板等可弯曲或可延展的基板为衬底的新兴电子技术。通过将电子显示器、发光二极管（light emitting diode, LED）照明、射频识别（radio frequency identification, RFID）标签、薄膜太阳能电池板、可充电电池以及各类传感器和存储器等有源或无源的电子器件制作在柔性基板上。柔性电子不仅注重器件和电路芯片集成度和计算性能的

提高,还可以以其独特的柔性和延展性保证电子产品在弯曲、卷曲、折叠、压缩、拉伸以及其他不规则形变情况下正常运行,在信息、能源、医疗以及国防等领域具有广泛的应用前景。随着互联网与物联网技术的发展与普及,人们对于生理监测、影像感测、语音控制、眼球追踪、手势辨别、动作感测、环境感知等功能器件的便携性、易用性和舒适性要求越来越高,柔性、可穿戴电子设备的概念及相关产品逐渐成为产业界和学术界的研究热点。

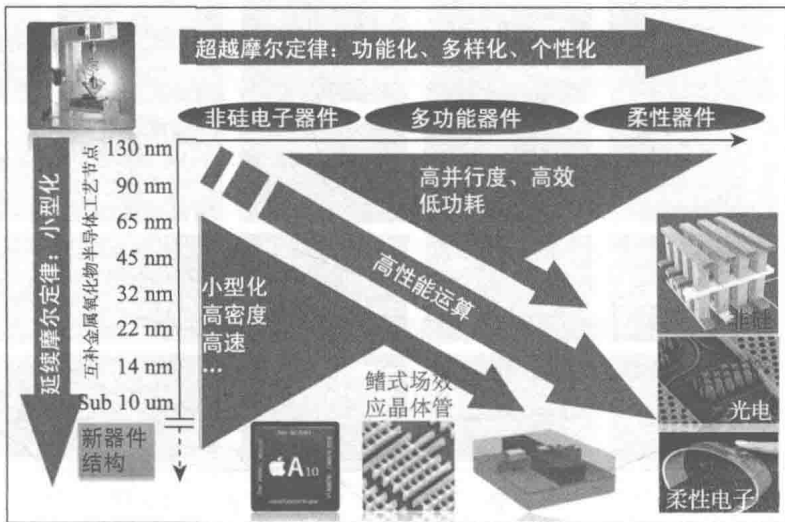


图 1.2 信息技术发展趋势

柔性电子是一个相对较新的技术领域。根据国际有机与印刷电子协会组织 (Organic and Printed Electronics Association, OE-A) 2015 年发布的第 6 版有机与印刷电子线路图,柔性电子主要包含了有机发光二极管 (organic light emitting diode, OLED) 照明、有机光伏、柔性 OLED 显示、柔性电子与零部件 (包括印刷内存、电池、有源器件与逻辑器件、无源器件) 以及集成智能系统 (包括智能物件、传感器与智能织物等) 等多种尚未完全成熟的技术 (图 1.3)。柔性电子器件普遍具有可弯折、易拉伸、共形性好、轻薄耐用、便携性高、可大面积制造等共性优点。由于大部分柔性电子技术均需要在柔性基板或衬底上实现从纳米特征、微观结构到宏观器件大面积集成等的跨尺度制造,因此有机材料、金属材料、无机非金属材料以及纳米材料等机械、电学性能迥异的功能材料间界面的精确控制已经成为制造柔性电子器件的关键,并涉及电子信息、材料、物理、化学甚至生物等多学科之间的交叉。

柔性电子的发展可追溯至 20 世纪 60 年代,主要以应用为驱动,并带动了柔性基板/衬底、功能材料、导电材料、封装材料等,以及转印 (transfer printing)、凸版印刷 (relief printing)、凹版印刷 (gravure printing)、丝网印刷 (screen printing)、

纳米压印 (nanoimprint)、喷墨打印 (inkjet printing) 和软刻蚀 (soft lithography) 等批次处理 (batch processing) 或卷到卷制造工艺 (roll-to-roll manufacture) 的快速进步。

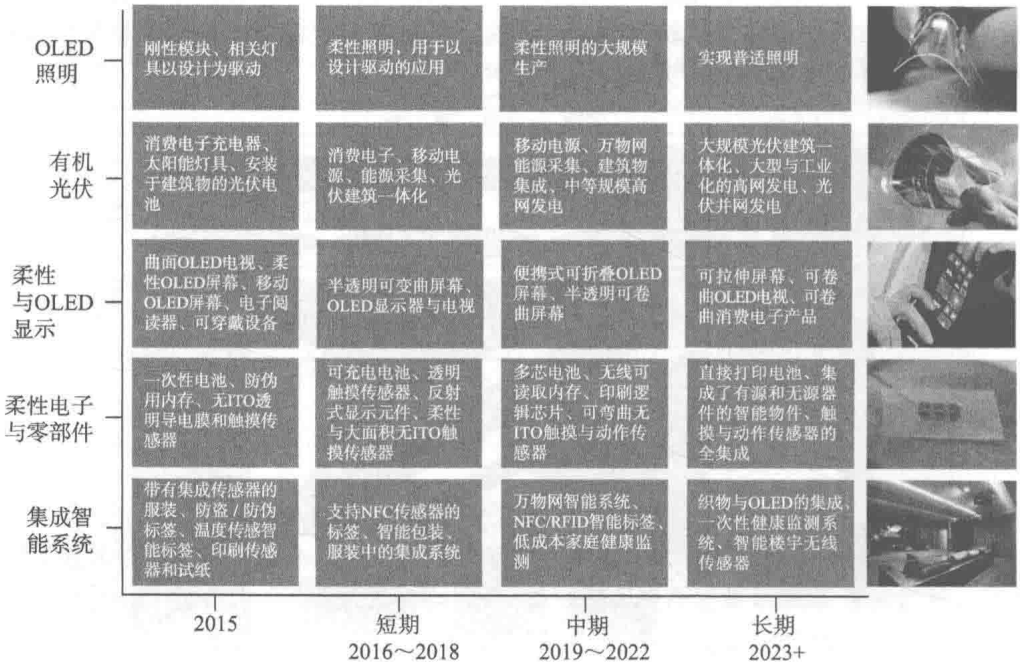


图 1.3 柔性电子技术的典型应用

任何薄质的物体均具有天然的柔性。1967 年, 英国皇家空军研究院的 Crabb 和 Treble 首次通过减薄单晶硅晶元的方式来提高太阳能电池的有效功率/重量比, 并将其组装在塑料衬底上获得了世界上第一块用于星际卫星的厚度约为  $100\mu\text{m}$  的柔性太阳能电池阵列<sup>[9,10]</sup>。这一开创性的工作不仅表明任何薄质的物体均具有天然的柔性, 更标志着柔性电子的出现。1973 年起, 全球范围内爆发了严重的能源危机, 进一步推动了薄膜太阳能电池的发展, 以有效降低光伏发电的成本。1976 年, RCA 实验室的 Wronski 等利用低温制备技术在不锈钢薄板上制备了基于氢化非晶硅 (hydrogenated amorphous silicon, 即  $\alpha\text{-Si:H}$ ) 的 Pt/ $\alpha\text{-Si:H}$  肖特基势垒太阳能电池<sup>[11]</sup>。到 20 世纪 80 年代早期, Nath 和 Okaniwa 等又分别利用卷到卷 (roll-to-roll) 制备技术在柔性钢薄片和有机聚合物塑料衬底上制备了基于  $\alpha\text{-Si:H}$  的柔性太阳能电池。同时, 基于 CdS/Cu<sub>2</sub>S 量子点、染料敏化、聚合物以及有机钙钛矿材料的柔性太阳能电池不断涌现, 迅速推动了该领域的发展和进步<sup>[12-15]</sup>。

另外, Brody 等在 1968 年建设性地提出在纸条上制备基于碲的薄膜晶体管 (thin-film transistor), 并将其集成在显示点阵电路电极的交叉点处, 以用于显示像

素的有效寻址与开关。此后, Brody 的研究小组在聚酯 (mylar)、聚乙烯 (polyethylene)、阳极氧化的铝箔等柔性衬底上制备了薄膜晶体管 (TFT) 器件, 并发现其可以在  $1/16\text{in}^{\text{①}}$  的弯折半径下保持工作<sup>[16,17]</sup>。到 1985 年左右, 日本产业界采用原本用于制备  $\alpha\text{-Si:H}$  太阳能电池的大面积等离子增强化学气相沉积技术来发展基于  $\alpha\text{-Si:H}$  TFT 背板的主动式液晶显示器 (active-matrix liquid-crystal display, AMLCD), 进一步促进了在新型柔性衬底上制备硅基薄膜电路的研究。1994 年, 爱荷华州立大学的 Constant 等首次展示了在柔性聚酰亚胺衬底上的  $\alpha\text{-Si:H}$  薄膜晶体管电路<sup>[18]</sup>; 1996 年, Theiss 等首次在不锈钢箔片上制备了可用于投影显示器或自发射显示器的高质量  $\alpha\text{-Si:H}$  薄膜晶体管<sup>[19]</sup>; 1997 年, Young 和 Smith 等又分别利用激光退火技术在塑料衬底上制备了基于多晶硅 (polycrystalline silicon) 的 TFT 器件<sup>[20,21]</sup>。自此之后, 柔性电子领域的研究迅速发展, 许多研究团队和公司陆续展示了基于柔性不锈钢和塑料衬底的电子器件。2007 年, 美国普渡大学的 Facchetti 等利用氧化锌和氧化铜纳米线制备了性能优于传统 TFT 的透明可卷曲的薄膜晶体管, 为下一代显示技术的发展提供了关键的基础<sup>[22]</sup>。

柔性 OLED 显示技术是有机薄膜电子器件的另一个重要代表。20 世纪 60 年代以后, 人们开始了对有机材料电学性能的研究; 70 年代以来, 导电聚合物、共轭半导体聚合物等的相继发现, 极大地促进了有机薄膜电子器件的快速发展。1965 年, Helfrich 和 Schneider 首次在单晶和薄膜蒽 (anthracene) 中观测到了电致发光效应。1987 年, 柯达公司的邓青云通过真空沉积双层有机结构在低驱动电压下观测到了更高的发光效率。1990 年, Burroughs 等第一次报道了局域共轭高分子材料聚对苯乙炔 (Poly (p-phenylene vinylene)) 的聚合物发光二极管。1992 年, 美国加利福尼亚大学的 Heeger 研究小组首次报道了采用旋涂法在柔性透明衬底聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 上制备的用于 OLED 发光器件的聚苯胺 (polyaniline, PAN) 或聚苯胺混合物透明阳极导电薄膜<sup>[23]</sup>。由于 OLEDs 具有发光效率高、视角宽、操作电压低、亮度高、色彩鲜艳、成本低、质量轻以及柔性好的特点, 因而引起了越来越多的研究人员的关注, 并得到了快速发展。2003 年, 飞利浦实验室发布了一款尺寸为 4.7in、包含 76800 个像素的柔性有源矩阵显示器。2005 年由英国剑桥大学卡文迪许实验室诞生的 Plastic Logic 公司展示了一款 10in、100ppi 分辨率、厚度仅为 0.4mm 且集成了压力传感器的有源矩阵 OLED 柔性触摸显示屏<sup>[24]</sup>。2009 年, 韩国三星展出一款透明 OLED 显示屏, 在关闭情况下其透光率可达 70%~85%。

近年来, OLED 显示器已经在移动显示领域成为大众市场产品, 并开始向电视市场渗透; 而随着有机半导体的载流子迁移率以及有机光伏材料的能量转化效率不断提高, 它们与多晶硅之间展开竞争的可能性正逐渐增加; 同时, 柔性电子的构图

①  $1\text{in}=2.54\text{cm}$ 。



工艺正在向更小尺寸、更精准的方向发展。受有机电子柔性化和轻量化的推动,柔性有机与印刷电子产业正式进入实际增长阶段,其市场营收已经较为显著,应用领域越来越广,移动电子产品正赢得越来越多的市场份额:消费类电子产品、白色家电、医药/保健护理、商品包装和汽车等行业已经接受有机电子并正在将相关产品推向市场,柔性显示器、柔性扫描仪、电子纸、柔性电池、柔性照明、柔性传感器和驱动器、电子皮肤、仿生电子眼以及人造生物假体等新应用层出不穷;印刷部件与硅基部件的集成也使得混合系统越来越受到人们的关注,并且这种解决方案正成为未来若干年中柔性有机与印刷电子进一步商业化的主要途径。

根据国际印刷电子市场调查公司 IDTechEx 的调研报告,2016 年全球印刷、柔性和有机电子市场营收约为 25.4 亿美元,2026 年市场营销预计增长至 690.3 亿美元。目前,印刷、柔性和有机电子市场的主要份额分别来自于 OLED 显示、传感器以及导电油墨,这三者占据了该领域 99% 的市场份额。相对而言,可拉伸电子器件和薄膜传感器等目前所占的市场份额非常小,但由于这些产品正处于从研发走向应用的阶段,故其拥有巨大的增长潜力。同时,柔性可穿戴电子的发展也面临很大的挑战,主要包括:①有机和纳米功能材料的设计、工程化制备与性能调控;②大规模溶液化加工工艺中的分辨率与精度问题;③柔性透明封装;④适当的柔性电子行业标准等。柔性电子技术目前仍处于起步阶段,尽管还没有明确的统一定义,但各国政府、跨国企业和研究机构都给予了大力的支持:2015 年美国国防部与苹果公司、波音公司、哈佛大学等一起加入柔性混合电子制造创新研究所(Flexible Hybrid Electronics Manufacturing Innovation Institute)主导的一项总投资高达 1.71 亿美元的研发军用柔性可穿戴式传感器的项目;2007~2013 年,欧盟在柔性电子领域的投资也超过了 1.5 亿欧元,资助了未来与新兴技术(FET)项目、欧盟第 7 框架计划(FP7)柔性电子(OLAE)、Flex-o-Fab 柔性 OLED 照明、有机光伏(OPV)、实验电子皮肤技术(CONTEST)、嵌入式有机存储(MOMA)、柔性导电互联(INTERFLEX)以及电子与织物集成(PASTA)等多个涉及材料科学、零部件、产业工艺和应用的项目;韩国在新型的柔性显示屏领域有着主要的优势,三星和 LG 均已将 OLED 显示板商业化,并在诸多柔性电子应用中扮演着重要的角色;我国在柔性电子领域起步较晚,但中国庞大的本土市场以及政府有针对性的投资和采购计划产生了与柔性电子密切相关的巨大产品需求,如由政府采购的 10 亿居民身份证、运输物流用 RFID 标签以及非接触式可重复使用票券等使我国早已成为世界上最大的 RFID 市场。

## 1.2 柔性电子器件的基本结构

一般来说,大面积电子器件由下至上主要由衬底、电子元件、电极和互联导体以及封装层 4 个部分组成<sup>[25]</sup>,如图 1.4 所示<sup>[26]</sup>。为了实现电子器件的柔性化,以上



所有部件均需具备在一定的形变情况下保持其特定功能的能力。对于不同的生产商和用户,柔性具有不同的定义,但主要可分为三种:①可弯折或可卷曲;②可永久成型;③弹性可拉伸。当一块厚度为  $d$  的机械均质薄板以圆柱形弯折至半径为  $r$  时,其上下表面沿垂直于弯折轴向的方向分别承受应变为  $\varepsilon = d/2r$  的张应力和压应力;当薄板为非均匀材质时,其表面所受应力与上述表达式略有不同,但仍可按该式参考估算。在实际应用中整个柔性系统所承受的应力应低于某一临界值,而减薄厚度则是在小弯折半径的情况下降低系统应力最直接的方式。另外,可以通过塑性变形的方式获得共形性好、连续不断裂的柔性电子器件<sup>[27,28]</sup>。但由于塑性形变程度极易超过无机半导体或金属薄膜 0.1%~1% 的张应变极限,因而通常需要将器件放置在刚性的微胞元岛上加以保护。如果制备柔性电子器件所使用的材料具有较大的塑性变形能力,则无须加以额外保护。此外,将安装在刚性微胞元岛上的器件分布到弹性衬底上并通过弹性可拉伸导线进行连接,则可以制备可拉伸的电子器件。

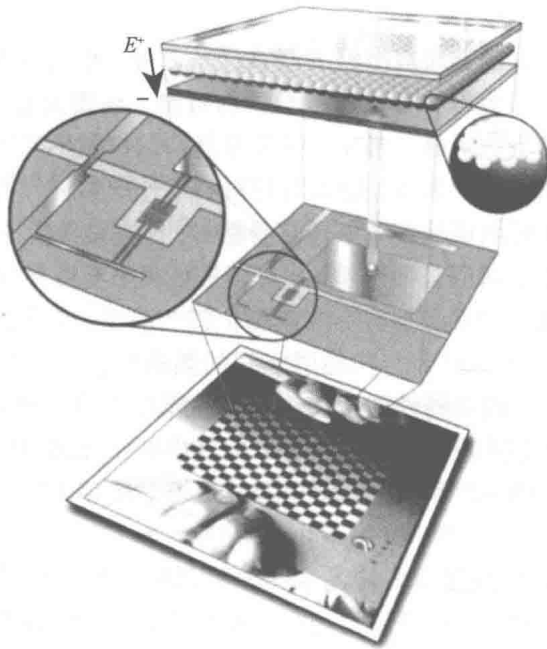


图 1.4 柔性电子器件的基本结构<sup>[26]</sup>

目前,发展柔性电子器件主要有两种基本方法:①通过转印工艺将制备好的器件或完整电路结构转移并固定到柔性衬底上;②在柔性衬底上直接制备电子器件和电路。在转移-固定技术中,首先需要在硅晶圆或玻璃板母衬底上制备整个电路结构,然后再将其转移<sup>[29-32]</sup>或通过流动自组装的方式<sup>[33]</sup>安装在柔性衬底上。利用这种方法也可以将硅基或者 GaAs 器件固定在预拉伸的弹性体上,从而在释放预拉伸以