“十四五”国家重点出版物出版规划项目

先进芯片材料与后摩尔芯片技术丛书

可穿戴智能光电传感技术

Wearable Intelligent
Optoelectronic Sensing Technology

沈国震　王卓然　编著

清華大學出版社
北京

内 容 简 介

本书紧扣物联网与人工智能深度融合背景下下一代传感器向柔性化、微型化、智能化发展的迫切需求，聚焦可穿戴智能光电传感技术这一前沿方向，系统阐述其传感原理、敏感材料、仿生设计及感知应用等核心内容。全书共 9 章，依次为：技术概述（涵盖材料、器件、机制及应用简介）、柔性器件制造、柔性光敏材料与三维集成、极端带隙光电探测技术、偏振探测与成像、曲面传感与仿生视觉、人机交互与多模态感知、眼动追踪与视网膜假体，以及生物体集成中的应用。在内容编排上，既兼顾基础理论的系统梳理，又融入该领域的前沿研究进展，力求深入浅出。

本书可作为电子科学与技术、集成电路科学与工程、材料科学与工程及相关交叉学科本科生和研究生的专业课教材，也可供从事光电传感与可穿戴电子领域研究或技术开发的科技工作者参考使用。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目（CIP）数据

可穿戴智能光电传感技术 / 沈国震，王卓然编著. -- 北京 ：清华大学出版社，2026. 10. --（先进芯片材料与后摩尔芯片技术丛书）. -- ISBN 978-7-302-72803-0

Ⅰ. TP212.6

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026Q7T668 号

责任编辑：鲁永芳
封面设计：意匠文化 · 丁奔亮
责任校对：欧　洋
责任印制：沈　露

出版发行：清华大学出版社
网　　址：https://www.tup.com.cn，https://www.wqxuetang.com
地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-83470000　　**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：环球东方（北京）印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：170mm×230mm　　**印　张**：20.75　　**字　　数**：420 千字
版　　次：2026 年 10 月第 1 版　　**印　　次**：2026 年 10 月第1 次印刷
定　　价：169.00 元

产品编号：111584-01

丛书编委会

（按姓氏笔画排序）

名誉顾问：

干　勇　中国工程院院士，钢铁研究总院

陈良惠　中国工程院院士，中国科学院半导体研究所

顾问：

刘　明　中国科学院院士，复旦大学

刘　胜　中国科学院院士，武汉大学

刘忠范　中国科学院院士，北京大学

刘益春　中国科学院院士，东北师范大学

江风益　中国科学院院士，南昌大学

孙世刚　中国科学院院士，厦门大学

李树深　中国科学院院士，中国科学院半导体研究所

杨德仁　中国科学院院士，浙江大学

吴汉明　中国工程院院士，浙江大学

张锁江　中国科学院院士，河南大学

陈小龙　中国科学院院士，中国科学院物理研究所

罗　毅　中国工程院院士，清华大学

郑婉华　中国科学院院士，中国科学院半导体研究所

郝　跃　中国科学院院士，西安电子科技大学

祝世宁　中国科学院院士，南京大学

黄小卫　中国工程院院士，中国有研科技集团

屠海令　中国工程院院士，中国有研科技集团

彭　寿　中国工程院院士，中国建材集团

彭练矛　中国科学院院士，北京大学

总主编：

周　济　中国工程院院士，清华大学

副总主编：

张　跃　中国科学院院士，北京科技大学

执行主编：

王　琛　清华大学

编委：

卜伟海　北方集成电路技术创新中心
于大全　厦门大学
于洪宇　南方科技大学
万　烨　洛阳中硅高科技有限公司
王　坚　盛美半导体设备(上海)股份有限公司
王　振　东方晶源微电子科技有限公司
王开友　中国科学院半导体研究所
王业亮　北京理工大学
王传声　中国电子科技集团第四十三研究所
王守祥　中国电子科技集团芯片技术研究院
王欣然　南京大学
王润声　北京大学
王新强　北京大学
牛新平　拓荆科技股份有限公司
文永正　清华大学
龙世兵　中国科学技术大学
史小平　北方华创科技集团股份有限公司
白　鹏　华虹半导体有限公司
边国栋　北方华创科技集团股份有限公司
邢　巍　中国科学院长春应用化学研究所
吕俊鹏　东南大学
朱　健　中国电子科技集团第五十五研究所
朱嘉琦　哈尔滨工业大学
任文才　中国科学院金属研究所
刘　琦　复旦大学
刘　雷　安徽大学
刘春俊　北京天科合达半导体股份有限公司
刘峰奇　中国科学院半导体研究所
许俊豪　华为技术有限公司
孙东明　中国科学院金属研究所
孙伟峰　东南大学
孙竞博　清华大学
麦立强　武汉理工大学

杜祖亮　河南大学
李　炜　沪硅产业集团
李　泠　中国科学院微电子研究所
李　晨　中国电子科技集团
李　璟　浙江大学
杨　超　中国科学院过程工程研究所
杨娟玉　中国有研科技集团
肖湘衡　武汉大学
吴华强　清华大学
吴洪江　中国电子科技集团产业基础研究院
何　军　武汉大学
狄增峰　中国科学院上海微系统与信息技术研究所
冷雨欣　中国科学院上海光学精密机械研究所
汪　玉　清华大学
汪　莱　清华大学
沈国震　北京理工大学
张　卫　复旦大学
张　兵　江苏艾森半导体材料有限公司
张　凯　中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所
张　铮　北京科技大学
张立军　吉林大学
张进成　西安电子科技大学
张雪囡　中环领先半导体科技股份有限公司
周　鹏　复旦大学
单崇新　郑州大学
宗艳民　山东天岳先进科技股份有限公司
孟国文　中国科学院合肥物质科学研究院
封　伟　天津大学
赵　超　北京超弦存储器研究院
倪振华　东南大学
黄庆安　东南大学
曹　靖　兰州大学
曹立强　中国科学院微电子研究所
梁君飞　中北大学

彭登峰　深圳大学
葛广路　中国科学院国家纳米科学中心
韩根全　西安电子科技大学
焦斌斌　西安交通大学
曾　超　中国工程物理研究院电子工程研究所
谢晓明　中国科学院上海微系统与信息技术研究所
蔡　坚　清华大学
蔡一茂　北京大学
蔡树军　中国电子科技集团公司第五十八研究所
廖　蕾　湖南大学
廖庆亮　北京科技大学
谭平恒　中国科学院半导体研究所
翟天佑　华中科技大学
缪向水　华中科技大学
黎大兵　中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
霍宗亮　长江存储科技有限责任公司

丛书序

芯片行业支撑起的电子信息产业是当今信息时代和当前人工智能时代的产业基石，电子信息产业的发达与否在一定程度上决定了国家的综合竞争力和未来社会发展潜力。特别是，随着芯片技术在过去 60 余年的指数级发展，产业被不断涌现的新一代材料、器件、集成、制造等技术协同推动，并引发了源源不绝的新兴应用创新，从底层技术上推动人类文明至新的高度。2024 年全球半导体产值达 4 万亿元，2035 年预期达到 10 万亿元，2049 年有望突破 60 万亿元。与此同时，芯片行业从材料到制造的技术壁垒也越来越高，核心技术被少数半导体公司所掌控。目前我国相关技术与国外先进水平还有较大差距，而且面临核心材料受制于人、核心技术很难突破、专利壁垒高、半导体工艺整合难度大、整体差距很难短期缩小的局面。因此，在后摩尔时代，如何通过底层芯片新材料的创新推动下一代高性能芯片的高端制造，是未来 20～30 年最有挑战性的全局性问题之一。

与此同时，整个芯片领域已经持续在学界和业界布局下一代半导体材料、新型半导体器件、新一代半导体工艺和制造技术的研究，以求在后摩尔时代能够占得技术引领和产业升级的先机。工业级半导体器件的应用往往起源于对半导体材料和半导体器件的基础研究和前瞻性应用，如 1947 年贝尔实验室发明的晶体管通过芯片制造工艺和架构的持续迭代引领了摩尔时代超过半个世纪的高速发展，1999 年英伟达公司引领的图形处理单元在先进制造的基础上通过架构创新和生态搭建推动了当前爆发式人工智能时代的来临。回到当下，我国在后摩尔芯片基础研究和前沿应用探索方面已有众多成果，进一步强化基础研究深度，并适时推动应用研究和产业化推广是保持该领域优势的战略关键所在。但是由于芯片行业的长产业链和长期技术迭代形成的封闭特性，很大一部分科研界关注的芯片新材料、新器件和新工艺的研究立足于最终取代硅基半导体，而产业界对于新技术的引入又极为谨慎，造成较为严重的产学研脱节现象。在硅基半导体仍然具有 10～20 年技术升级空间的背景下，当前基础芯片新材料和新器件研究对直接推动芯片行业的实质性发展尚有一定难度。为此，我国如何依托现有半导体材料和制造产业基础，有中生优，通过跨代升级发展基础原材料和先进节点技术承接下游产业需求，重点融会贯通以半导体材料和先进工艺装备为代表的电子信息材料上中游产业链；更进一

步，如何瞄准全球电子信息产业发展的高线，“无中生有”，战略布局前沿电子信息材料和制造技术研究，融会贯通产学研的力量，打通从 Lab 到 Fab 的通路，提前 25 年为我国电子信息产业的发展谋篇蓄力，是本丛书编撰的主要动因。

经过与国内众多高等院校、中国科学院众多相关研究所、信息领域国家重点企业和行业龙头企业等的走访交流，更是坚定了编委会推动本丛书的编撰与出版的信心。本丛书的立意也得到了清华大学相关单位的大力支持，经过清华大学出版社推荐，国家新闻出版署审定，本丛书入选了“十四五”国家重点出版物出版规划。本丛书主编团队也凝聚了 10 余位行业各领域知名院士专家学者作为顾问，凝练丛书立意，优选丛书方向，汇聚行业专家，精心筛选内容，把关细节版式，力争把本丛书作为推动我国后摩尔芯片产学研深度链条融合、技术开放创新、人才培育拔高的代表性出版物。在主编团队的不懈努力和通力协作下，通过凝聚顶尖高校、知名院所、龙头企业等 80 余位知名专家作为编委的集体智慧，囊括基础新材料、新型器件、新制造工艺和装备、检测分析技术、特种芯片应用、前沿芯片探索等领域，在清华大学出版社的支持下共同推出本丛书！丛书将力图较为系统地梳理下一代芯片中的新材料—新器件—新工艺—新集成—新制造的核心研究成效和关键技术进展，为学界和业界的科研人员、青年学生和学者、技术管理人员和政策制定人员等提供系统的行业发展全景读物，并力图从底层技术脉络出发，重新梳理行业中的重点、难点和趋势，期冀丛书能在一定程度上推动我国芯片研究人才和产业人才的培育，并带动我国芯片行业高质量可持续发展，为 21 世纪中叶我国全面建成社会主义现代化强国贡献芯片创新力量。

清华大学教授　中国工程院院士　周　济

2024 年 10 月于清华园

前言

当前，物联网（IoT）与人工智能（AI）的深度融合，正推动传感器技术全面迈向4.0时代。传统的刚性、分立式传感器已难以满足现代社会对轻量化、共形化以及人机交互深度融合的需求。作为获取外界信息的核心窗口，光电传感技术正以前所未有的速度向柔性化、微型化、智能化迈进。在这一背景下，柔性可穿戴光电传感技术应运而生，并迅速成为全球学术界和产业界关注的焦点。

可穿戴智能光电传感技术是一个涉及材料学、物理学、微电子、神经科学及医学等多学科深度交叉的技术领域。如何将高性能的光电探测能力与柔性可拉伸的力学特性相结合，并赋予其智能化的数据处理能力，是当前面临的重大挑战。本书立足于这一前沿领域，旨在系统阐述从基础材料、微纳制造到智能系统集成的完整技术链条。从材料与结构出发，书中探讨了有机、无机及卤化铅钙钛矿等光电材料的特性，以及如何通过微纳结构设计解决柔性与拉伸的力学难题；在更具挑战性的智能化领域，初步探讨了仿生视觉、类脑光电传感器以及面向边缘计算的架构设计；最后，书中还专门涉及了植入式器件与生物可降解技术在智慧医疗中的应用前景。

本书体现了可穿戴智能光电传感技术领域较先进、较前沿的技术和成果，介绍了较新的技术信息，希望能为微电子、光电子、材料科学及生物医学工程等领域的科研人员与工程技术人员提供有价值的参考，推动我国可穿戴智能光电传感技术的创新与发展。

本书共9章，各章编著分工如下：第1章由北京理工大学王卓然、况丹、沈国震编著；第2章由北京理工大学史迎利编著；第3章由济南大学王鹏、孟凡鹏，山东大学李阳编著；第4章由湖南大学孟优、辛淑文，香港城市大学何颂贤编著；第5章由北京理工大学李营、杨雅茜，北京工业大学陈彦成编著；第6章由复旦大学张千鹏、胡盈、莫晓亮，上海交通大学顾磊磊，香港科技大学范智勇编著；第7章由北京理工大学袁祖庆编著；第8章由北京理工大学王卓然、孙凡、李书坤、况丹编著；第9章由北京航空航天大学王柳、还梦婷，北京理工大学孙

瑀阳、丁贺编著。全书由沈国震、王卓然统稿定稿。团队中诸多博士、硕士研究生参与了本书的撰写工作，在此一并致以诚挚的谢意。

本书力求逻辑严密、数据翔实，但受限于编著者的能力与时间问题，书中难免存在疏漏与错误之处，恳请各位专家、同仁及广大读者批评指正。

本书彩图请扫描二维码观看。



编著者

2026 年 1 月

目录

第 1 章　面向传感器 4.0 时代的可穿戴光电传感技术 …… 1

1.1　柔性可穿戴传感技术简介 …… 2
1.1.1　传感器 4.0 时代与柔性电子技术 …… 2
1.1.2　柔性可穿戴电子材料 …… 4
1.1.3　可穿戴电子器件结构设计 …… 9
1.1.4　可穿戴传感器应用与展望 …… 14
1.2　柔性光电探测与传感器 …… 17
1.2.1　柔性有机光电探测器 …… 18
1.2.2　基于无机半导体的柔性光电探测器 …… 20
1.2.3　卤化铅钙钛矿柔性光电探测器 …… 26
1.2.4　纤维与编织柔性光电器件 …… 28
1.2.5　类脑光电传感器件 …… 30
1.3　可穿戴光电传感技术 …… 32
1.3.1　柔性与曲面图像传感 …… 32
1.3.2　仿生视觉 …… 35
1.3.3　人机交互界面 …… 38
1.3.4　视网膜假体 …… 41
1.3.5　智慧医疗与健康监测 …… 43
1.3.6　面向边缘智能传感的架构设计与功耗优化 …… 45
1.4　总结语 …… 48
参考文献 …… 49

第 2 章　柔性可拉伸制造与光电传感技术 …… 61

2.1　柔性光电器件的力学基础与光电协同效应 …… 62
2.1.1　柔性光电探测器的基本特性 …… 62
2.1.2　柔性光电器件中的力学-光电耦合机制与协同效应 …… 65

2.2 柔性光电器件的设计与制造技术 …… 68
2.2.1 柔性光电材料的力学特性与选型 …… 68
2.2.2 柔性光电探测器的制备工艺 …… 75
2.3 可靠性分析与应用 …… 79
2.3.1 柔性光电传感器的失效机制与改善方案 …… 80
2.3.2 可靠性的提升方案 …… 82
2.3.3 柔性光电器件的多模集成与应用 …… 84
参考文献 …… 86

第 3 章 柔性光敏材料与三维集成 …… 89

3.1 柔性光敏材料基础 …… 89
3.1.1 光敏材料的基本特性 …… 90
3.1.2 柔性材料的独特优势 …… 95
3.1.3 柔性光敏材料的制备方法 …… 103
3.2 三维集成技术核心 …… 109
3.2.1 三维集成的架构与原理 …… 109
3.2.2 关键工艺步骤解析 …… 110
3.2.3 热管理与信号传输挑战 …… 111
3.3 柔性光敏材料在三维集成中的应用 …… 113
3.3.1 光电器件集成创新 …… 113
3.3.2 生物医学领域的突破 …… 114
3.3.3 智能穿戴与物联网应用 …… 116
参考文献 …… 117

第 4 章 极端带隙光电探测技术 …… 122

4.1 紫外光电探测技术 …… 123
4.1.1 氧化镓 …… 125
4.1.2 氮化铝镓 …… 126
4.1.3 金刚石 …… 127
4.1.4 紫外光电探测机制 …… 128
4.1.5 紫外光电探测应用 …… 129
4.2 红外光电探测技术 …… 131
4.2.1 Ⅲ-Ⅴ族材料 …… 133
4.2.2 二维材料 …… 134
4.2.3 胶体量子点 …… 135

4.2.4 红外光电探测机制 …… 136
4.2.5 红外光电探测应用 …… 137
4.3 太赫兹探测技术 …… 138
4.3.1 拓扑绝缘体 …… 140
4.3.2 石墨烯 …… 141
4.3.3 超导材料 …… 141
4.3.4 太赫兹探测机制 …… 142
4.3.5 太赫兹探测应用 …… 143
参考文献 …… 145

第 5 章 偏振探测与成像 …… 151

5.1 引言 …… 151
5.2 光的偏振特性 …… 152
5.2.1 光的偏振基本概念 …… 152
5.2.2 偏振态的分类与数学描述 …… 153
5.2.3 偏振光的产生机制 …… 156
5.3 偏振光电探测技术 …… 156
5.3.1 基于光学元件的偏振光探测技术 …… 157
5.3.2 基于材料各向异性的直接偏振光电探测技术 …… 160
5.3.3 基于外部形貌各向异性的偏振光电探测技术 …… 167
5.4 偏振成像应用 …… 169
5.4.1 工业表面缺陷检测与质量监控 …… 171
5.4.2 生物医学辅助诊断 …… 173
5.4.3 远程感知与军事识别 …… 174
5.4.4 智能交通中的偏振视觉增强 …… 175
5.5 偏振光电探测与成像的挑战与展望 …… 177
5.5.1 偏振光电探测与成像的挑战 …… 177
5.5.2 未来发展展望 …… 178
5.6 结论 …… 179
5.6.1 偏振光电探测与成像的系统回顾 …… 179
5.6.2 技术的重要意义与应用价值 …… 180
参考文献 …… 180

第 6 章 曲面光电传感器与仿生视觉 …… 184

6.1 曲面光电传感器 …… 184

6.2 半球形曲面传感器设计策略 …… 186
6.2.1 折纸法 …… 186
6.2.2 网状互连 …… 187
6.2.3 曲面转印 …… 188
6.2.4 原位生长 …… 189
6.3 仿生视觉及特性 …… 191
6.3.1 单眼与复眼结构 …… 191
6.3.2 仿生视觉特性 …… 192
6.4 仿生电子眼 …… 194
6.4.1 仿生复眼 …… 194
6.4.2 仿水生动物 …… 195
6.4.3 仿陆生动物 …… 196
6.4.4 仿生人眼 …… 197
6.5 仿生视觉的潜在应用与挑战 …… 200
6.6 面向未来的仿生视觉 …… 202
参考文献 …… 203

第 7 章 可穿戴光电人机交互与多模态感知 …… 209

7.1 可穿戴光电传感系统 …… 209
7.1.1 可穿戴光电传感系统用于躯体和环境感知 …… 210
7.1.2 可穿戴光电器件用于人机交互原理 …… 212
7.1.3 基于光电转换的自供能系统集成 …… 217
7.2 可穿戴光电系统组成 …… 219
7.3 可穿戴光电系统的环境感知 …… 220
7.3.1 光-气体传感器：高特异性分子检测 …… 220
7.3.2 光-温、湿度传感器 …… 221
7.3.3 环境光传感器 …… 225
7.4 可穿戴光电系统的人机交互 …… 226
7.4.1 微动作识别 …… 226
7.4.2 肢体动作捕捉 …… 229
7.5 自供能系统集成 …… 231
参考文献 …… 232

第 8 章 眼动追踪与视网膜假体 …… 239

8.1 眼部可穿戴传感技术 …… 239

8.2 眼动追踪技术简介 …… 240
8.2.1 眼动追踪基本原理 …… 240
8.2.2 眼动追踪应用与发展 …… 246
8.3 基于光电传感的眼动追踪技术 …… 249
8.3.1 基于图像传感技术的眼动追踪 …… 249
8.3.2 基于分布式光电探测的眼动追踪 …… 252
8.3.3 光学设计 …… 254
8.3.4 柔性化与透明化 …… 256
8.4 视网膜假体基本原理 …… 258
8.5 光电视网膜假体技术 …… 261
8.5.1 光电器件假体 …… 261
8.5.2 光敏材料与界面假体 …… 263
8.5.3 神经信号传导与模拟 …… 265
8.6 总结语 …… 268
参考文献 …… 268

第 9 章 光电材料与器件在生物体集成中的应用 …… 275

9.1 引言 …… 275
9.1.1 智能光电传感技术在生物医学与健康监测中的重要性 …… 275
9.1.2 与生物体集成的光电器件技术挑战与应用前景 …… 276
9.2 光电刺激器件在组织修复与功能恢复中的应用 …… 278
9.2.1 光电刺激在组织修复与功能恢复中的核心作用 …… 278
9.2.2 光电刺激器件的创新设计与生物适配性特性 …… 279
9.2.3 光电刺激器件的未来研究方向 …… 286
9.3 光电界面在生物体神经调控中的应用 …… 290
9.3.1 光电界面的技术现状与挑战 …… 291
9.3.2 光电界面材料与生物体集成设计创新 …… 292
9.3.3 神经功能恢复与调控的未来发展方向 …… 297
9.4 结论与展望 …… 301
9.4.1 智能光电传感技术与生物体集成的未来发展挑战 …… 301
9.4.2 光电传感器件在健康监测与精准治疗中的创新机遇 …… 302
参考文献 …… 303

第1章

面向传感器4.0时代的可穿戴光电传感技术

王卓然[1,2]，况丹[1]，沈国震[1,2]
[1]北京理工大学，集成电路与电子学院
[2]北京理工大学珠海校区，大湾区创新研究院

可穿戴光电传感技术（wearable optoelectric sensing technology）是一种基于光学与电子学原理，通过柔性或微型化设计而实现人体或环境信息实时监测的传感技术。其核心是将光电探测器件（如光敏二极管、光电晶体管、有机光电探测器等）集成到可穿戴设备（如智能手表、电子皮肤、智能织物等）中，利用光与物质的相互作用（如吸收、反射、散射等）来检测生理或环境参数。光电传感技术由于其非侵入、低延时等特性，正成为智能感知的核心载体。同时，柔性电子技术通过突破传统传感器芯片的刚/脆物理特性限制，采用溶液加工、卷对卷印刷等规模化制造工艺，能够具有皮肤共形贴合、动态变形适应、透气排汗等优势特性，是可穿戴与共形电子器件的核心，也是本章介绍与讨论的重点。这种技术变革大幅提升了生理信号监测、人机交互和环境感知的连续性与可靠性，推动了移动医疗、智能物联网、数字健康等领域的创新发展。可穿戴光电传感以柔性光电子器件为基础，通过光电协同机制实现多模态信息的原位采集与动态感知。本章系统论述其核心柔性光电探测器，以及可穿戴光电传感系统的关键技术与发展前沿（图 1-1），重点包括：①可穿戴传感器件的材料体系与结构设计；②柔性光电传感器的光-电-力耦合机制；③低功耗系统集成与智能感知融合。通过剖析典型应用案例，如连续血氧监测、运动姿态识别、虚拟现实交互等，深入探讨技术挑战与发展趋势，旨在为新一代智能医疗、数字健康、具身智能等领域提供技术支撑，促进跨学科研究合作与产业转化。

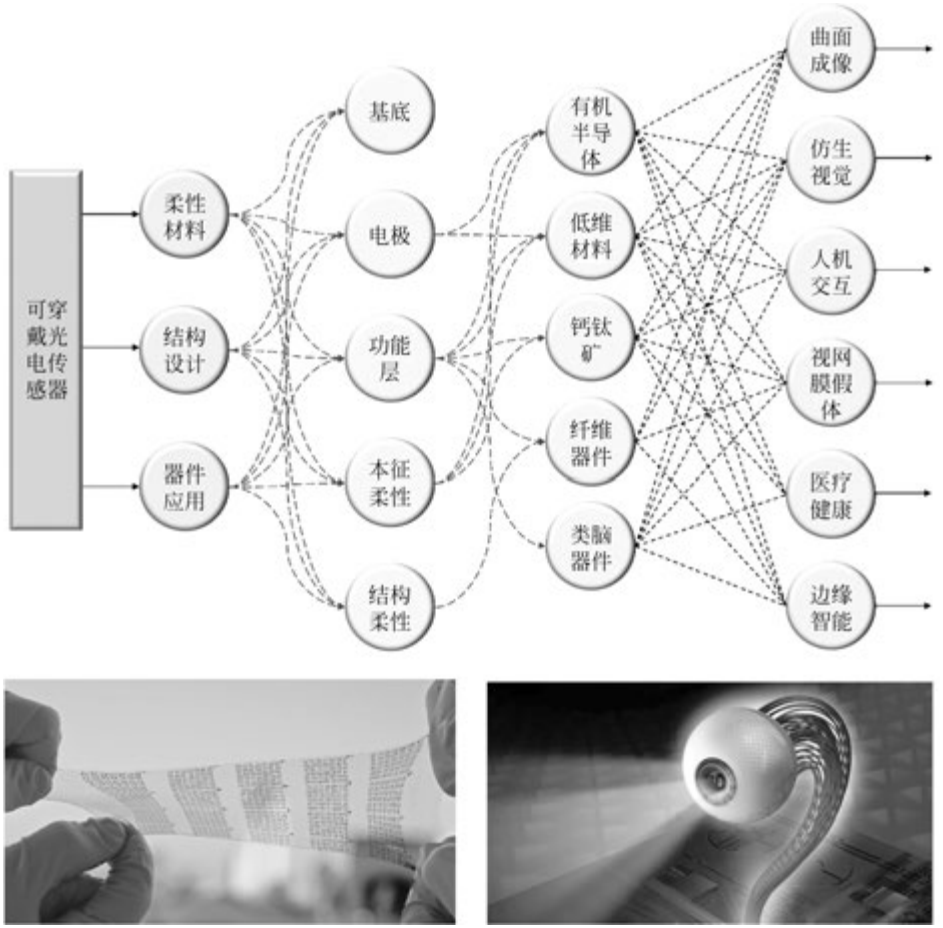


图 1-1 可穿戴光电传感技术发展与发展前沿[1-2]

1.1 柔性可穿戴传感技术简介

1.1.1 传感器 4.0 时代与柔性电子技术

生物通过视觉、听觉、嗅觉系统来实现对光、声、气体等多物理量的感知。而人造传感器通过器件物理特性来实现感知能力的拓展。如图 1-2 所示，Chen 等[3]将传感器的发展定义为四个重要阶段。传感器 1.0 时代主要以早期将物理量转换为易观测的机械输出的传感装置为代表，例如早期西方的测温仪，我国的地动仪等。传感器 2.0 时代的到来伴随着电的发现和发电机的发明。传感器开

始将物理参数转化为电信号以实现控制功能。传感器 3.0 时代的标志是其微型化与集成化，涵盖智能手机、智能手表等智能设备，其中数十个传感器协同提供卓越的用户体验。而近年来，物联网、工业 4.0、大数据、人工智能、机器人及数字健康等领域的发展，促使传感器向互联化、智能化演进，迈入传感器 4.0 时代。例如，具备无线连接功能的各类传感器被大规模集成于自动驾驶汽车以实现自适应驾驶；与人工智能结合的物联网传感器为建筑及工业设施的能源管理提供高效解决方案。

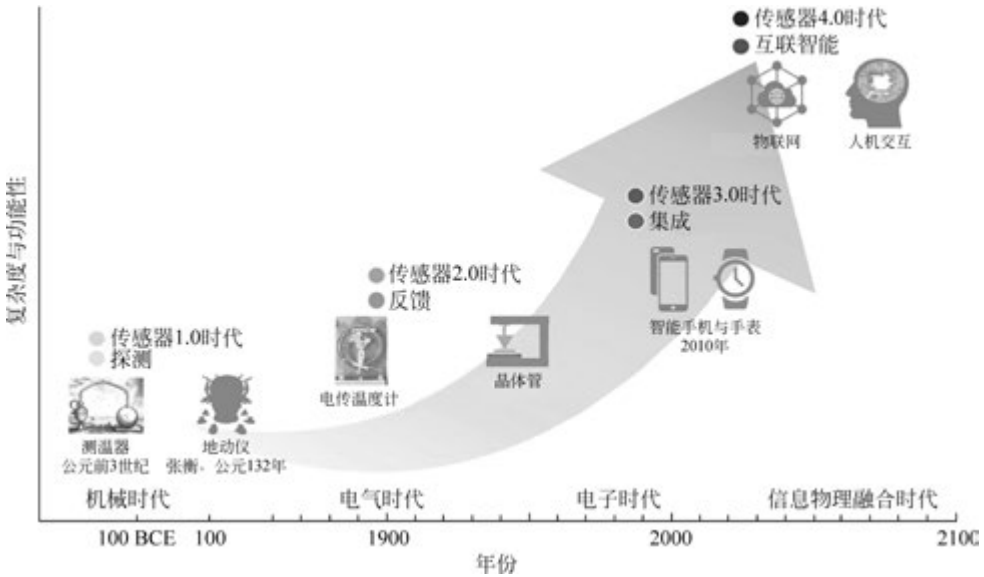


图 1-2　传感器技术标志性发展阶段[3]

而柔性可穿戴电子器件的出现为传统传感器形态引入了全新的机械自由度[4-7]，为可变形、微型化、轻量化的下一代分布式传感及边缘智能应用提供了新技术选项。此外，多模态传感、仿生传感、人工智能增强型传感以及一体化传感材料与器件的最新进展，正在不断拓展智能电子的性能边界，为传感器 4.0 时代开辟了新的发展机遇。截至目前，柔性电子已经经历了较长的发展阶段。最早关于柔性电路的报道始于 1903 年 Albert Hansen 首次在专利中描述了由金属电极与蜡纸结合制备电子器件[8]。同期，在爱迪生(Thomas Edison)的实验记录中也提出了将纤维素胶混合石墨涂在亚麻纸上制备电路的想法，但此想法并未被证实付诸行动。首个真正意义上的柔性电子器件诞生于 1967 年，Crabb 与 Treble 将晶体硅光伏组件减薄用于地外卫星，并提出采用塑料柔性基底替代传统刚性基底的设想，从而能够紧密贴合飞行器表面并同时满足轻量化设计需求[9]。同年 9 月，Peter

Brody 报道了首个基于柔性基底的薄膜场效应晶体管[10]，能够实现 1/16 英寸(约 1.6mm)的弯曲半径。而后数十年导电聚合物、有机半导体、非晶硅、化合物半导体薄膜的出现，以及近年来新材料与量子信息技术的发展，尤其是在显示、传感、医疗等领域对于可弯曲、折叠、拉伸等传统半导体所无法满足的新性能的急切需求，迎来了柔性电子技术高速发展的新时代。

柔性电子技术作为后摩尔时代的关键创新方向，其在可穿戴与智能感知领域的独特优势正深刻重塑电子产业的新发展格局。基于对柔性电子技术的战略性布局，以及全球科技竞争对自主可控产业链的迫切需求，大力发展柔性可穿戴电子技术相较于传统刚性半导体产业展现出以下核心优势。

(1) 降低工艺成本。相较于高度依赖光刻等复杂半导体工艺的硅基集成电路，柔性电子可通过转移与印刷等方式实现大规模器件制备，在投资规模、制造成本、良率等方面具有突出的优势。

(2) 拓宽应用领域。柔性器件的可弯曲性与可拉伸性能够适用于更广泛的应用场景，例如便携式大面积与曲面应用，包括柔性显示器、柔性电池、电子纸等；高度形变需求的应用，包括可穿戴设备、人造假体、电子皮肤等。

(3) 推动交叉创新。相较于传统刚性电子器件，柔性器件可弯曲、折叠、拉伸的特性提供了新维度的灵活性，推动了如人工智能、类脑计算、仿生科技、生物医学等新兴前沿交叉领域的快速起步。

当前柔性电子面临三大核心挑战：①高迁移率柔性半导体材料(例如氧化物薄膜晶体管(TFT)迁移率$<10cm^2/(V\cdot s)$，而硅基>500)；②多层异质结构在动态形变下的界面可靠性(循环拉伸 10 万次后电阻变化$<5\%$)；③规模化制造良率(目前先进柔性屏产线良率约为 80%，而硅芯片$>99.9\%$)。基于此，借鉴成熟的半导体制造技术，开发混合维度材料体系(如碳纳米管-氧化物半导体复合通道)，借鉴半导体前道工艺开发柔性兼容制程(如光刻胶转印技术)，聚焦刚性电子所无法实现的场景(如曲面共形电子、可植入设备)，与传统电子技术产业相辅相成，拓展传统电子器件的适用性，是柔性可穿戴电子的重要发展策略。

1.1.2 柔性可穿戴电子材料

柔性材料的发展是柔性电子技术发展的关键动力。理论上，任何材料足够薄则都能够展现出柔性。另外，材料在微观尺度下晶体或分子结构特性决定了其宏观应力应变性质，即材料与几何形状无关的本征柔性。因此，Peng 和 Snyder 提出，材料的柔性可以用柔度(flexibility)综合量化表示为[11]

$$f=\frac{1}{r_b}=\left(\frac{2}{h}\right)\varepsilon_y=\left(\frac{2}{h}\right)\left(\frac{\sigma_y}{E}\right)$$

其中，r_b 为材料不发生塑性形变的最小弯曲半径；h 为材料厚度；ε_y 为产生的屈服应变；σ_y 为对应的屈服应力；E 为弹性模量（杨氏模量）。其中，与材料几何形状无关的屈服应变 ε_y 决定了材料在不发生塑性形变时的最大拉伸极限，从而定义材料的柔性品质因数，记为

$$f_{FOM}=\frac{\sigma_y}{E}$$

柔性品质因数 f_{FOM} 由材料的屈服应力和弹性模量决定，可用于量化对比不同材料的本征柔性。因此，柔性材料需要具有较小的杨氏模量（质地软）及较高的屈服应力（强度大），即越靠近左上箭头所示方向，材料柔性越好。图 1-3 中列出了电子器件中常用材料所对应的柔性品质因数，为设计柔性器件提供了重要的选材依据。

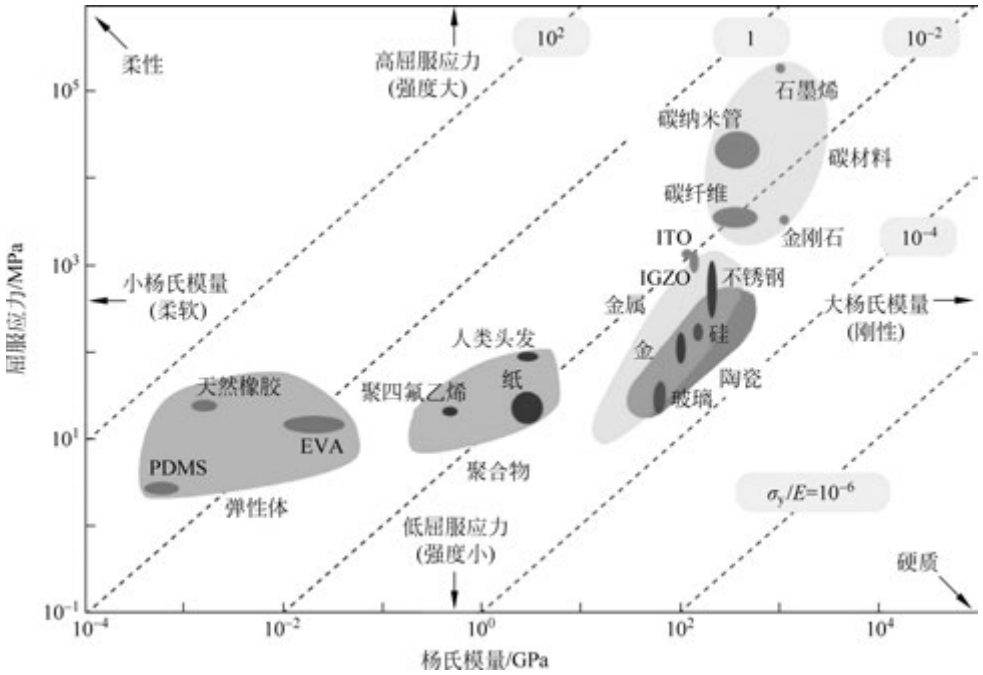


图 1-3　不同材料的柔性品质因数（横轴为杨氏模量，纵轴为屈服应力，图中虚线为品质因数 f_{FOM} 的等值线）[11]

电子元件一般由基底、电极、活性材料构成，实现器件整体柔性则需要各组成部分的功能性与柔性的极大兼容。其中，材料本身具有柔性对最终器件的力学性质至关重要。

1. 柔性基底

表 1-1 列出了几种典型柔性基底材料。基底为柔性器件提供机械支撑，通常需要较小的弹性模量和较好的延展率以满足可穿戴器件的舒适度。玻璃和不锈钢等常用无机材料具有较大的弹性模量与较小的断裂应变极限，本征柔性较差。有机聚合物通常具有较小的弹性模量从而更加适合柔性应用。其中，常用可弯曲硬质塑料包括聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)、PI、PET 等，可拉伸软材料包括 PDMS、Ecoflex 硅胶、Dragon Skin 硅胶、水凝胶(hydrogel)等，其柔性(伸长率)持续递增[12]。但有机基底普遍不耐高温，对于器件工艺具有一定局限性。其中，PI 能在 350℃下保持稳定，但其外观一般呈橙色，对于需求高透光性的器件应用有一定局限性。

表 1-1 常用基底材料与柔性相关的基本物理性质[12]

材　料	弹性模量/GPa	伸长率/%	最小制造厚度/μm	极限温度/℃
玻璃	23.8～90.5	约 2	10	＞500
不锈钢	107.5～197	约 2.5	25	1000
PEN	3.3±0.4	约 7	1.2	160
PI	2.5	约 3	0.5	350
PET	2.3±0.3	约 12	1.4	120
PDMS	$(0.4\sim5)\times10^{-3}$	约 93	4	200
Ecoflex 硅胶	$(20\sim125)\times10^{-6}$	约 164	10	180
Dragon Skin 硅胶	170×10^{-6}	364～1000	500	180
水凝胶	$(39\sim907)\times10^{-6}$	＞1000	210	60～100

2. 柔性电极

电极主要负责电荷的注入与提取，是电子器件的重要组成。而针对柔性可穿戴电子在显示与成像等光电领域的广泛应用，其电极除导电性与柔性的要求外，其透光率也通常需要考虑。品质因数(f_{FOM})定义为电导率与光导率的比值，常被用来定量综合评价其电极的性能，表述为[13]

$$\frac{\sigma_{\mathrm{DC}}}{\sigma_{\mathrm{OP}}(\lambda)}=\frac{188.5}{R_{\mathrm{sh}}\left[T(\lambda)^{-\frac{1}{2}}-1\right]}$$

其中，σ_{DC}、$\sigma_{\mathrm{OP}}(\lambda)$、$R_{\mathrm{sh}}$、$T(\lambda)$分别为电导率、光导率、方块电阻以及在特定波长 λ 下的透光率。对于透明电极，通常需要 $\sigma_{\mathrm{DC}}/\sigma_{\mathrm{OP}}(\lambda)$大于 35[13]。常用的电极材料包括透明导电氧化物薄膜、金属薄膜与纳米结构、碳材料、导电聚合物等。透

明导电氧化物(TCO)材料被广泛用于显示与薄膜光伏领域,包括氧化铟锡(ITO)、掺氟氧化锡(FTO)、掺铝氧化锌(AZO)、铟锌氧(IZO)等。其中,FTO电极的沉积温度多在350℃以上,与柔性工艺兼容存在较大难度。ITO、IZO等电极材料可以通过常温溅射方式沉积在PET等塑料基底上,是目前柔性显示与光伏器件的主流制造手段。但刚性的无机氧化物的本征脆性使其需要在柔性与电导率之间作出妥协,限制了其在高度柔性化尤其是可拉伸器件中的应用。金属材料具有极佳的导电性与一定的延展性,尤其是其纳米结构(纳米线、纳米颗粒等)在兼具高导电性与柔性的同时,通过厚度与微结构调整还能具备较高的透光特性与品质因数[14]。例如,Ag纳米线电极能够实现约10Ω/sq的方块电阻,约90%的透光率,以及400以上的品质因数,在柔性器件制备中极具潜力。但采用印刷等柔性制造技术制备的金属纳米电极通常存在较大的接触电阻,需要有效后处理来实现大面积可靠器件制备[15]。碳材料主要有碳纳米管、石墨烯等组成的透明电极,以及导电碳胶印刷所制备的非透明电极[16]。由图1-3可知,碳材料本身具有较大的机械强度和硬度,其柔性品质因数略高于金属材料,但碳纳米管与石墨烯等的电极柔性品质因数较低。除上述无机材料外,有机导电聚合物如PEDOT∶PSS也被用作电极材料,能够实现125Ω/sq的面电阻以及高达95%的透光度,更重要的是该有机聚合物本征的高度柔性,可承受100%以上的滑移、弯曲、折叠、拉伸等应变,但电导率相较传统电极材料还有较大差距[17]。图1-4(b)总结对比了不同电极材料电阻率与电极品质因数(电导率与光导率之比),结合表1-2可知,金属纳米线电极具有较好的光电特性,适用于对电学性能要求较高的器件应用,而碳材料与有机导电聚合物在要求高度柔性的应用中具有优势。

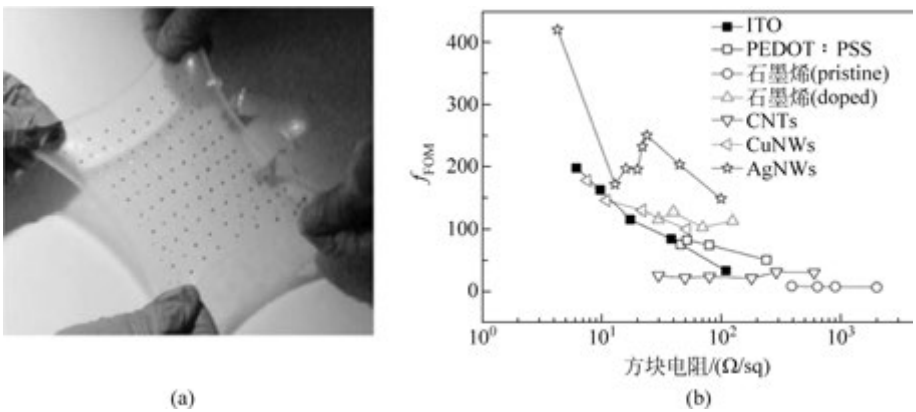


图1-4　(a)在Ecoflex硅胶基底上制造的柔性锂电池[18];(b)柔性电极材料的品质因数-电阻率[14]

表 1-2 常用柔性电极材料的优缺点[19]

柔性电极材料	优　　点	缺　　点
ITO	电导率高，透光性好	脆性高，材料与制造成本高
PEDOT：PSS	可溶液制备，柔性好	电导率低，热/化学稳定性差
碳纳米管	柔性好，透光性好，化学稳定性高	电导率低，接触电阻大
石墨烯	柔性好，透光性好，化学稳定性高，表面粗糙度低，表面缺陷少	电导率低（单层），接触电阻大
Ag 纳米线	可溶液制备，电导率高，透光性好	表面粗糙度高，化学稳定性差，接触电阻大

3. 柔性功能材料

功能电子材料是器件与系统的核心，可以分为传统刚性半导体与新型本征柔性材料。晶体硅是现阶段最重要的功能半导体，基于刚性硅器件与集成电路工艺，通过减薄、屈曲、岛状结构设计等可以实现高性能器件的柔性化[20-21]；无机薄膜材料包括Ⅲ-Ⅴ族半导体、非晶硅、CdTe、钙钛矿等；本征柔性材料包括有机半导体、低维材料（零维纳米颗粒、量子点、纳米线、一维纳米线、石墨烯、过渡金属二硫属化物（TMD）、MXenes 等二维材料），以及有机-无机杂化材料[22]。作为电子器件功能材料，迁移率作为半导体的核心参数，决定了载流子在电场下的移动速率，直接影响晶体管等电学器件的功耗、开关和频率响应特性[23]。图 1-5 所示为常用薄膜晶体管半导体材料的迁移率与响应延迟（二者关系近似图中虚线所示负相关性），高分子聚合物与有机半导体材料具有较好的本征材料柔性，但其迁移率普遍低于金属氧化物、硅等无机半导体，并且稳定性存在一定问题。新型低维半导体材料由于灵活的制备手段，更利于采用转移、印刷等工艺与柔性基底兼容。纳米颗粒、量子点溶胶器件的迁移率通常小于 $0.1cm^2/(V\cdot s)$，但由于量子限域效应导致其独特的光学、电学性质，可溶液法低温制备，使其在集成光电子领域受到广泛关注[24]；以石墨烯为代表的二维材料具有极高的载流子迁移率（室温下为 10^4 量级，约为硅材料的 10 倍），低表面缺陷态密度，这为传统三维半导体高度集成所面临的短沟道效应难题提供了有效解决思路，并且其大杨氏模量与低刚性系数的物理特性，使得材料兼具高断裂极限（源于 sp^2 杂化轨道的强 C—C 共价键作用）与柔度，图 1-5(c)为二维材料的晶体结构与柔性器件[25]。此外，卤化铅钙钛矿材料因其可媲美晶体硅的低缺陷态密度（$10^9\sim10^{10}cm^{-3}$）、高载流子迁移率（约 $200cm^2/(V\cdot s)$）、优异的光学特性、有机无机杂化属性，图 1-5(b)为 ABX_3 钙钛矿晶体结构，是近年来光电子器件尤其是光伏领域的重大突破，并且其灵活的低温溶液制备工艺，对于柔性器件的研究有着重要价值[26]。

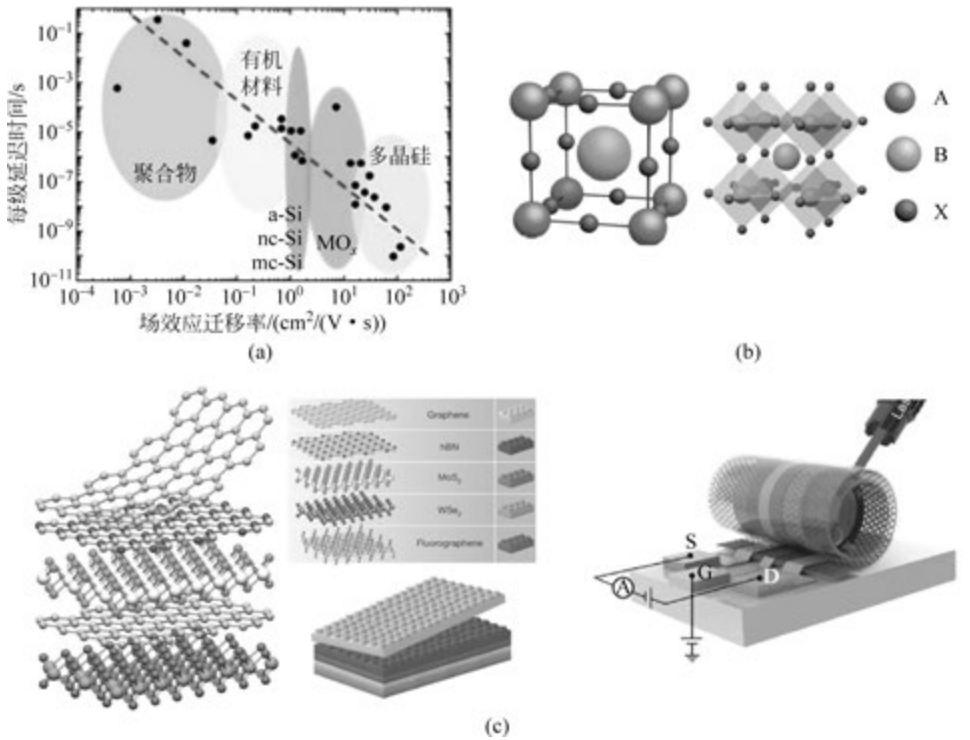


图 1-5　(a)材料场效应迁移率与响应时间[23]；(b)ABX_3 钙钛矿晶体结构[27]；(c)二维材料的晶体结构与柔性器件示意图[28-29]

1.1.3　可穿戴电子器件结构设计

1. 可弯曲性设计

器件与系统的结构设计对于最大限度地发挥功能材料与器件的柔性至关重要。从应用需求出发，柔性电子器件可分为可弯曲和可拉伸两类。如前所述，单一材料的柔性与厚度具有负相关性，任何材料足够薄，则都能够展现出一定的可弯曲性(图 1-6(a))。而电子器件一般采用多层结构设计。图 1-6(b)所示为简单的薄膜-基底双层器件，当二者具有相当的杨氏模量时，器件发生如图所示弯曲时，薄膜顶部的应变可以简单地表述为[30-31]

$$\varepsilon_{\text{top}} = (d_{\text{f}} + d_{\text{s}})/(2R)$$

其中，d_{f} 与 d_{s} 分别为薄膜与基底的厚度；R 为器件的弯曲半径。因此，该体系中的最小弯曲半径(达到极限应变前的弯曲半径)由器件整体的厚度决定，采用超薄设计有利于实现高度可弯曲性。另外，若材料与基底具有不同杨氏模量，上式则改

写为

$$\epsilon_{\text{top}} = \left(\frac{d_f + d_s}{2R}\right)\frac{(1+2\eta+\chi\eta^2)}{(1+\eta)(1+\chi\eta)}$$

其中，$\eta = d_f/d_s$，$\chi = E_f/E_s$。以不锈钢($\chi \cong 1$)和塑料($\chi \cong 100$)两种不同基底(同一功能薄膜材料)为例，其相应的顶部应变(归一化处理后)与 η 的相关性如图 1-6(c)所示：对于给定的弯曲半径 R 与器件厚度，采用软质基底(低杨氏模量)能够减少 5 倍以上的表面应变。

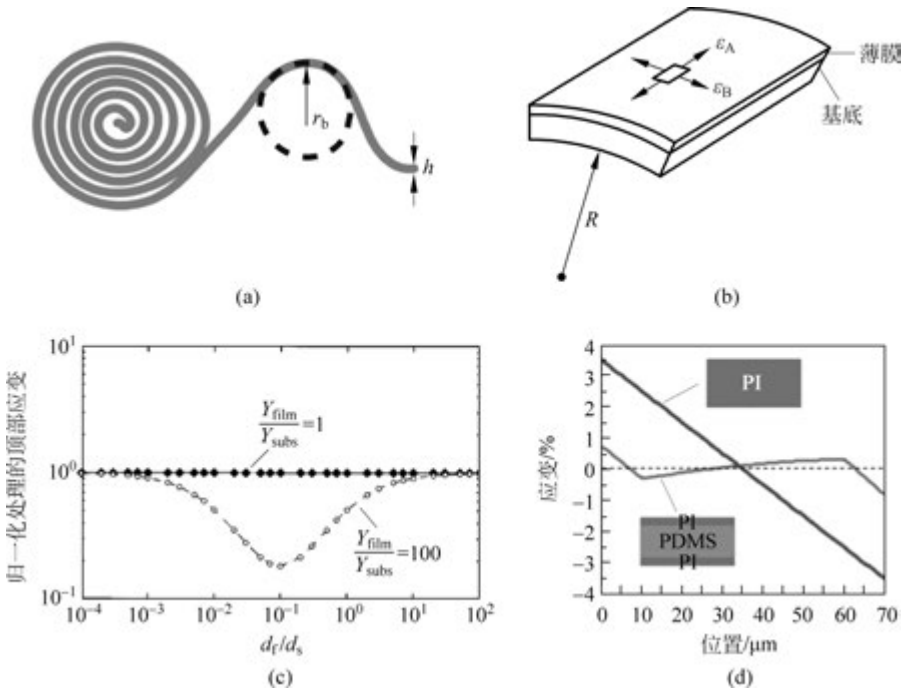


图 1-6 (a)厚度为 h 的柔性材料在发生塑性形变前的最小弯曲半径为 r_b[6]；(b)薄膜-基底双层器件[30]；(c)采用软质基底(低杨氏模量)对表面应力的减缓作用；(d)多中性平面设计[34]

中性平面设计是在多层膜系统中进一步消除应变，提高器件弯曲度的有效方案。当单一均质材料薄膜向下弯曲时，其上表面处于拉伸而下表面处于压缩状态，其应变分布曲线(以图 1-6(d)中聚酰亚胺(PI)材料为例)将由正转负穿过原点，其几何中心平面位置恰好不受应变，称为中性平面(neutral plane)[30]。因此，在上述薄膜-基底双层结构基础上，在薄膜上表面覆盖适当厚度的封装层，则可以将功能层埋置于系统的中性平面，使得系统的最大弯曲半径不再受限于功能材料的断裂极限，而是基底与封装层的应变容限(系统顶部与底部材料分别的拉伸与压缩应变

极限)。对于具有不同杨氏模量的基底与封装,中性平面设计需满足条件:

$$E_s d_s^2 = E_e d_e^2$$

其中,E_e 与 d_e 分别为封装层的杨氏模量与厚度。在多层膜器件系统中,根据经典欧拉-伯努利梁弯曲理论(Euler-Bernoulli beam theory)[32]中假设纯弯曲、小形变(弯曲半径远大于膜总厚度),各层间没有相对滑动,中性平面的位置可以表示为[33]

$$z(\varepsilon=0)=\frac{\sum_{i=1}^{n}\bar{E}_l d_i\left[\left(\sum_{j=1}^{i} d_j\right)-\frac{d_i}{2}\right]}{\sum_{i=1}^{n}\bar{E}_l d_i}$$

其中,$\bar{E}_l=\frac{E_i}{1-\nu_i^2}$代表平面应变杨氏模量,$\nu_i$ 是泊松比;d_i 是第 i 层的厚度。如果当上述系统中出现多层膜器件杨氏模量严重不匹配时,如图 1-6(d)所示,在高模量聚酰亚胺(PI)层间加入低模量聚二甲基硅氧烷(PDMS),会导致该弹性体层在弯曲时发生大的剪切形变,降低了其他两层中的应变。这就导致 PDMS 实际上作为应变缓释层,在上下两个 PI 层中分别产生两个中性平面,极大减小了系统应变(图 1-6(d)中表面应变至少减少为 1/6)[34]。因此,对于柔性光电器件等需要保证透光率而无法将功能层深埋进柔性聚合物(单中性平面)的应用来说,多中性平面设计具有重要意义[35]。

2. 可伸性设计

然而,器件与系统仅具有可弯曲性并不能完全满足对可穿戴设备的舒适性与生物兼容性的需求。例如,在人体关节处放置或植入的传感器,不仅需要随着关节活动进行单轴弯曲,还需要能够承受拉伸、挤压、扭曲等多轴形变。目前,可弯曲柔性电子应用已经进入了柔性屏等消费电子领域,但可拉伸电子目前还主要处在实验室研究阶段,主要因为弯曲对材料应变极限的需求远小于拉伸。例如,在 12.5μm 的 PI 膜上制备的有机晶体管可以实现低至 100μm 的弯曲半径,完成高度弯曲、折叠、卷曲等形变,但其极限状态下的应变也仅为 6.25%;制造在 1.4μm 厚聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)上的柔性太阳能电池能够缠绕在 35μm 粗的头发丝上,而此状态下的应变也仅为 2%[36]。相比较而言,可拉伸器件的应变由伸长率(elongation)表示:

$$\varepsilon=(L-L_0)/L$$

其中,L_0 为初始长度;L 为拉伸后的长度。对于可穿戴应用,器件至少需要承受 20%～30% 的拉伸应变量以达到足够的贴合性与舒适度,实现难度极大提升[36-38]。目前可拉伸器件的设计策略主要分为两类:复合可拉伸器件与本征可拉

伸器件。

复合可拉伸器件是采用已知高性能但本身不具有可拉伸性的功能电子材料与元件(Si,Ⅲ-Ⅴ族等),将其嵌入或置于可拉伸弹性基底上,采用蜿蜒弯曲(图 1-7(a))与分立岛桥结构设计(图 1-7(b))以减小拉伸时施加于器件结构上的应力。蜿蜒弯曲结构是通过机械拉伸、热膨胀或者溶剂膨胀等方式获得预拉伸状态的柔性基底,在将功能器件单元转移后,释放柔性基底的自然预应变,利用力学屈曲原理使得与基底保持黏附的器件单元薄膜发生弯曲,形成蜿蜒连续褶皱结构[41]。Rogers 等给出系统所能承受的极限预应变(prestrain)为[42]

$$\varepsilon_{\mathrm{pre}}(\max)=\frac{\varepsilon_{\mathrm{fracture}}^{2}}{4\varepsilon_{\mathrm{c}}}\left(1+\frac{43\varepsilon_{\mathrm{fracture}}^{2}}{48\times 4\varepsilon_{\mathrm{c}}}\right)$$

其中,$\varepsilon_{\mathrm{fracture}}$ 为材料的断裂应变极限;ε_{c} 为临界屈曲应变(导致屈曲现象的最小应变),可表示为

$$\varepsilon_{\mathrm{c}}=\frac{1}{4}\left(\frac{3\bar{E}_{\mathrm{s}}}{\bar{E}_{\mathrm{f}}}\right)^{2/3}$$

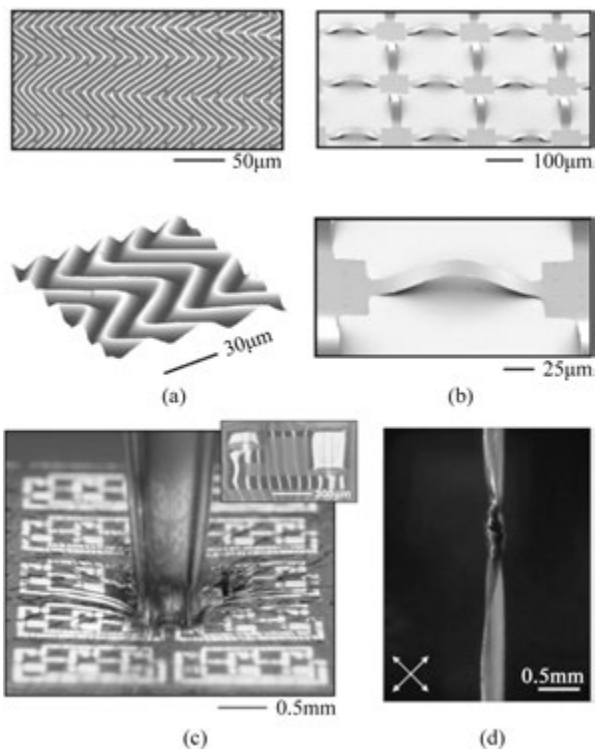


图 1-7 (a)力学屈曲与(b)分立岛桥结构;(c)硅基柔性电路[39]与(d)本征柔性聚合物[40]

其中，$\bar{E}_s$ 与 $\bar{E}_f$ 分别为基底与薄膜的平面应变杨氏模量。而后此蜿蜒系统在外加拉伸/压缩应力作用下，其功能元件薄膜峰值应变 ε_{peak} 与外加应变 $\varepsilon_{applied}$ 的关系为[42]

$$\varepsilon_{peak}=2\sqrt{(\varepsilon_{pre}-\varepsilon_{applied})\varepsilon_c}\frac{(1+\varepsilon_{applied}+\xi)^{1/3}}{\sqrt{1+\varepsilon_{pre}}}$$

其中，$\xi=5\varepsilon_{pre}(1+\varepsilon_{pre})/32$。由此式看出，拉伸应变量（$\varepsilon_{applied}>0$）的极限值取决于预应变量 ε_{pre}（需满足 $\varepsilon_{pre}-\varepsilon_{applied}>0$）。对于硅基半导体材料，其断裂应变极限为1%～2%，而通过上述屈曲蜿蜒设计，柔性系统可承载高达 20 倍以上的拉伸应变（典型 $\varepsilon_{applied}$ 值可达 10%～20%），实现了刚性材料的高度可拉伸器件设计[20,42]。

将此设计进一步优化，采用开放网格结构代替整体薄膜，并选择性地将网格贴合在预拉伸的柔性基底上，随着预拉伸应力释放，形成岛部（功能元件部分）仍与柔性基底保持良好的接触，而桥部（互联导线位置）承受了基底的预拉伸形变而发生明显屈曲变形从基底上拱起[43]。此岛桥结构设计中“桥”与“岛”的最大应变可分别表示为[44]

$$\varepsilon_{bridge}^{max}=2\pi\frac{h_{bridge}}{L_{bridge}^0}\sqrt{\frac{\varepsilon_{pre}}{1+\varepsilon_{pre}}}$$

$$\varepsilon_{island}^{max}=\frac{(1-\nu_{island}^2)E_{bridge}h_{bridge}^2}{\overline{E_{island}}h_{island}^2}\varepsilon_{bridge}^{max}$$

其中，E_{bridge} 与 $\overline{E_{island}}$ 分别为桥的杨氏模量与岛的平面应变杨氏模量；h 为相应材料厚度；L_{bridge}^0 为互联导线的初始长度。由于 $h_{bridge}\ll L_{bridge}^0$，因此互联导线实际产生较小的应变 $\varepsilon_{bridge}^{max}$，能够承载较大的基底预应变 ε_{pre}。进而对于长桥互联设计 $\left(\frac{h_{bridge}}{L_{bridge}^0}\to 0\right)$，其系统的预应变极限则理论上等于 PDMS 等弹性基底的断裂极限（100%以上）。另外，通过设计 $E_{bridge}<\overline{E_{island}}$，且 $h_{bridge}<h_{island}$，系统应变主要由桥部承载（采用较硬与较厚的岛材料也有利于转移应变至桥部）。综上，系统的可拉伸度（stretchability）可定量表示为

$$\varepsilon_{stretchability}=\frac{L_{bridge}^0-L_{bridge}}{L_{bridge}+L_{island}^0}=\frac{\varepsilon_{pre}}{1+(1+\varepsilon_{pre})\dfrac{L_{island}^0}{L_{bridge}^0}}$$

由此可知，采用较长的互联桥路、较小的岛材料尺寸，通过施加较大的预应变，有利于提高岛桥柔性系统的可拉伸度。

本征可拉伸器件是利用新型电极与功能材料本身的柔性可拉伸特性制备的元器件与系统（图 1-7(c)，(d)）。此设计的优点在于能够有效提高系统的空间利用

率，避免了功能区域仅占很小一部分的岛-桥设计所造成的面积浪费，这对于太阳能电池、发光二极管（LED）等追求能源效率的光电器件应用尤为重要；此外，具有高断裂极限的柔性材料的使用能够降低对于系统设计与制造工艺的要求，从而在产率、成本上有一定优势。但受限于材料选择，如可拉伸有机聚合物功能材料的电学性能无法达到传统硅、锗、Ⅲ-Ⅴ族高性能半导体，无法满足实际应用的性能需求。而近年来快速崛起的低维半导体等新兴材料具有独特的光、电、力学特性，为可拉伸电子器件的发展提供了新动力。

1.1.4 可穿戴传感器应用与展望

1. 可穿戴传感器应用

在数字化与智能化快速发展的今天，可穿戴传感器技术正深刻改变着医疗健康、运动监测、环境感知等领域。作为连接人体与数字世界的核心纽带，这些传感器能够实时采集生理、运动和环境数据，为健康管理、疾病预防和智能决策提供精准支持。现代可穿戴传感器可实时监测心率、血压、血氧、体温等关键生理指标，甚至能早期预警潜在疾病。例如，柔性电子皮肤贴片可长期无感佩戴，持续追踪慢性病患者的健康状况；智能手环和手表结合 AI 算法，可分析睡眠质量、压力水平，并提示异常体征。在传染病防控中，可穿戴设备还能监测体温变化和呼吸节律，助力流行病早期筛查。在运动健康领域，可穿戴传感器通过加速度计、陀螺仪和肌电检测等技术，精准记录步态、运动强度和肌肉活动，为运动员和康复患者提供个性化训练方案。例如，柔性应变传感器可嵌入运动服饰或护具，实时监测关节活动幅度，预防运动损伤；智能鞋垫则能分析足底压力分布，优化跑步姿态或辅助术后康复。此外，可穿戴传感器还能感知周围环境，如紫外线强度、空气质量、温湿度等，为用户提供实时安全提醒。在工业场景中，工人佩戴的智能手套或安全帽可检测有害气体、噪声或震动，保障作业安全。在科技探索与军事国防领域，可穿戴传感器可用于单兵健康与生理/心理状态监测、战场环境感知与导航、装备与武器系统集成等重要应用场景。

传统刚性传感器难以满足舒适佩戴和长期使用的需求，而柔性传感器凭借可拉伸、可弯曲、轻薄透气的特性，完美贴合人体皮肤或衣物，实现无感监测。同时，低成本印刷制备工艺和环保材料的应用，使大规模生产成为可能，有望进一步推动可穿戴设备的普及。表 1-3 对比概括了刚性与柔性传感器技术特点，可以看出，柔性传感器在对机械顺应性、集成密度与规模、可制造性及成本控制等有严苛要求的应用场景中占据显著优势。以当前可穿戴传感技术（如连续血糖监测仪、智能手表）为例，要实现心电信号与汗液代谢物等医疗级监测，就必须确保传感器与皮肤形成共形接触——而刚性传感器因无法适应皮肤表面微纹理与

动态形变，难以兼顾测量精度与佩戴舒适度。相比之下，柔软可拉伸的传感器能有效解决这一矛盾，为未来医疗健康领域提供突破性解决方案。此外，柔性传感器因其不规则曲面的适应特性，可用于在曲率复杂的机器人表面部署超高密度传感器网络，实现仿人类皮肤的高灵敏度触觉感知功能。此时，在柔性基底上单片集成传感器阵列的方案远比逐个装配刚性传感单元更高效。因此，柔性可穿戴传感器的技术优势为“传感器 4.0 时代”提供了关键技术选项和最具价值的核心技术载体。未来，随着人工智能、物联网和柔性电子技术的融合，可穿戴传感器将更加智能化、个性化，将成为开发医疗健康，智能生活，工业生产，军事国防等关键应用的重要支撑技术。

表 1-3　刚性与柔性传感器的性能对比

	刚性传感器	柔性传感器
性能参数		
可拉伸性	＜1％	＜1000％
杨氏模量	1～200GPa	10kPa～200GPa
共形性	差	好
形变过程中测量	否	是
工艺与应用		
方法	MEMS 工艺	印刷、MEMS 工艺
尺寸	0.01～0.1m^2（晶圆级别）	1～100m^2（印刷尺寸）
产率	0.001～1m^2/min	10～1000m^2/min
成本	高	低
碳足迹	高	低
应用场景	手机、自动驾驶、工业机器人等	可穿戴传感器、智能织物、共形传感器贴片等

2. 可穿戴传感器技术挑战

现阶段，可穿戴传感器主要面临多种技术难点。首先，在稳定性、选择性、灵敏度等核心传感器性能方面，柔性器件相比于传统刚性器件还存在较大差距。稳定性是确保传感器在变化环境中，特别是长期监测场景下能保持可重复且可靠的性能表现，是评估技术实用性的关键参数，主要包括时间稳定性与环境稳定性（如温湿度等影响因素）。柔性传感器的稳定性挑战主要源于其制造过程中使用的有机高分子材料，这类材料易随时间发生性能衰减，且其特性极易受环境因素干扰。此外，可穿戴生物传感器还面临额外的生物不稳定性问题。当柔性传感器应用于体内组织/体液、深海、高原等存在极端物理化学应力的降解性环境时，这些稳定性挑战会进一步加剧。解决稳定性问题最直接的途径是提升传感器材料的环境稳定性。将传统刚性传感器材料改造成柔性可拉伸形态，是有效方法之一，但复杂的制

造工艺可能限制其规模化生产和成本效益。目前科研人员持续致力于开发环境稳定的有机材料及钙钛矿等新兴材料的合成与改性，但这类材料的物理化学本质决定了该策略仍存在根本性挑战。

选择性是指传感器区分目标分析物与潜在干扰物的能力。在实际应用场景中，多种化学物质与机械力通常同时存在，它们通过相似的作用机制与传感材料发生相互作用，从而导致传感器响应信号出现交叉串扰现象。现阶段实现传感器选择性主要有两种途径：特异性传感器与选择性传感器阵列。理想情况下，特异性传感器仅对单一分析物产生响应，由这类传感器构成的阵列无需复杂数据处理即可精确解析混合物的组分。然而，此类特异性传感器往往难以实现。相比之下，在选择性传感器阵列中，每个传感器对多种分析物呈现差异化响应，阵列的整体响应可生成混合物的特征指纹图谱。另外，可穿戴传感器的运动伪影与环境干扰问题，进一步增加了传感器精确检测的难度。此外，在灵敏度等性能方面，虽然已有报道称敏感柔性材料的基本性能达到甚至超越刚性器件，但基于柔性电路与读出电路的电气互联、数据传输等同刚性互补金属-氧化物-半导体（CMOS）器件还有一定差距。

另一个关键挑战来源于传感器与生物界面问题。可穿戴传感器的最重要应用之一是生物组织测量，包括人体、动物、植物组织与细胞。柔性可拉伸电子器件的优势在于能与非平面生物体和组织表面良好共形贴合。同时，需要在获取高质量生物信号的同时，不干扰正常的生物组织功能，即优异的传感器与生物界面。生物兼容性是实现可穿戴传感器的关键指标之一，而该指标根据组织接触器械的位置和持续时间，所对应的检测项目与阈值各不相同，例如，仅通过细胞毒性测试则无法判定生物相容性，而脱离组织接触位置和持续时间来讨论生物相容性也不具有说明性。因此，可穿戴植入式生物与医疗传感器，尤其是基于新型敏感材料与电路的柔性电子器件，需要大量且长期的具体应用与临床实验。此外，数据传输与能源供给是又一大挑战。可穿戴传感不仅仅要求敏感单元的柔性化与动态跟随，完整的传感器系统还包括信号传输与能源供给，同样需要符合可穿戴应用场景。传统的无线数据基于射频（RF）信号传输，存在体积大、功耗高的技术瓶颈问题。因此，研究低功耗自供电传感器件与新型通信方式，结合柔性可穿戴能源技术的同步发展，是传感器 4.0 时代的重要技术手段。

综上，可穿戴传感器技术在性能、集成度、兼容性、能源供给与系统实现方面仍存在较大挑战。图 1-8 总结了现阶段柔性可穿戴光电传感器在性能、工艺、应用三个方面所对应的具体要求，包括追求高性能的敏感材料，实现增益-带宽-波长-噪声特性的同步提升，并在此基础上，进行柔性器件与集成设计，开发轻小型-低功耗-智能化传感器系统。Chen 等指出，柔性传感技术的长期可持续发展需要发展可持

续材料与器件技术、工业的标准化、用户端的接受，以及功能化与智能化的提升[3]。其中，仿生电子与类脑器件在传感器领域的发展与应用，是传感器 4.0 时代突破传统传感器系统架构功耗瓶颈的标志性手段之一[45-47]。

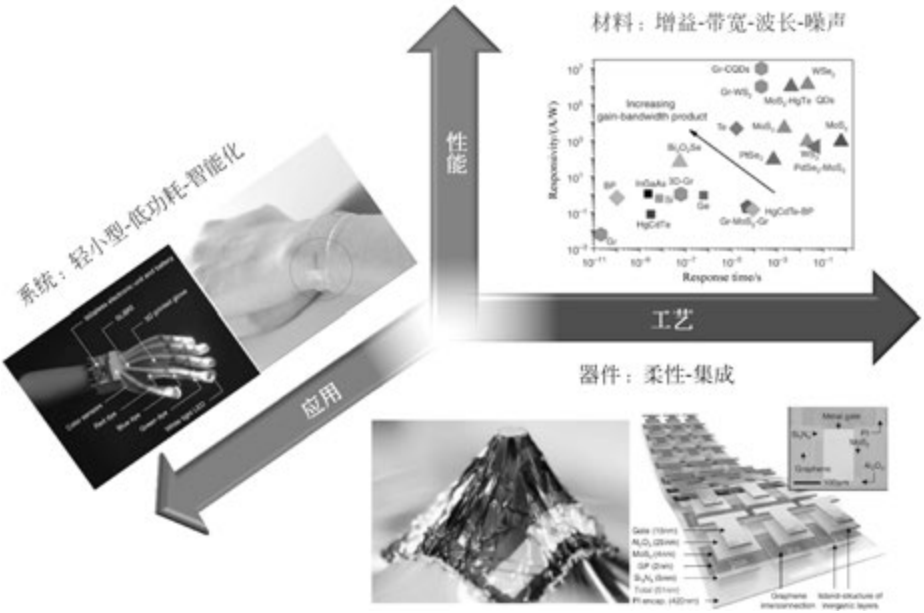


图 1-8　柔性可穿戴光电传感器在性能、工艺、应用方向所对应的材料[7]、器件[38,48]、系统[49-50]发展需要

1.2　柔性光电探测与传感器

现有的光电探测技术已经基本实现了全光谱覆盖：X 射线探测用于生物医学成像，紫外光用于光刻与活体组织监测，可见光用于数码照相与视频成像，红外光用于夜视仪，光通信，质量监测等[51]。目前硅基探测器与 CMOS 集成是数码成像、消费电子领域的主要技术。就光探测器材料本身而言，晶体硅具有较低的介电常数，从而可以使器件具有低电容与快速响应（纳秒级）的特性。然而，晶体硅的间接带隙约为 1.1eV，限制了其光吸收能力特别是对 1μm 以上红外光区域的响应。目前，通用的红外光探测器采用外延生长的 InGaAs、InSb、HgCdTe 等，具有窄带隙、高载流子迁移率、低缺陷态密度等特点。表 1-4 列出了不同光电探测器的峰值响应波长、响应度以及其材料的电子迁移率。

表 1-4 不同光电探测代表性材料与器件的性能参数[52-53]

材　料	电子迁移率/(cm^2/(V·s))@300K	空穴迁移率/(cm^2/(V·s))@300K	光谱范围/μm	比探测率/(cm·$Hz^{\frac{1}{2}}$/W)
Si	1500	450	<1.1	10^{13}
Ge	3900	1900	<1.8	10^{11}
InGaAs	14000	400	<1.7	10^{12}
InSb	70000	850	<5	10^{8}
HgCdTe	10000	1000	<10	10^{8}
有机半导体	<5	<10	<1	10^{12}
量子点	<10	<1	<5	10^{11}
钙钛矿	100	100	<1	10^{14}
MoS_2	200	10	<1.1	10^{12}

然而，一方面，复杂的单晶生长与外延工艺限制了高性能半导体材料在柔性电子的应用；另一方面，红外传感材料中稀有元素(In、Ga 等)、有毒元素(As、Hg、Cd 等)的大量使用，不利于消费电子特别是便携式、穿戴式器件的应用普及。新型光电子材料包括有机半导体、无机低维材料、卤化铅钙钛矿，因其独特的光、电、力学特性而展现出应用潜力。

1.2.1 柔性有机光电探测器

由于有机半导体软材料本身的机械柔性，以及其兼容柔性基底的大面积制成工艺，包括卷对卷、印刷、涂布等，在实现柔性可穿戴设备方面具有突出的优势。有机半导体(π 共轭分子与聚合物)通常具有较强的吸光能力，并且通过调整化学组成结构能够易于实现吸收光谱调节。有机半导体通常具有较小的相对介电常数($\varepsilon \approx 3 \sim 4$)以及局域激发态，导致光生电子-空穴对之间的强库仑力作用而形成束缚态粒子——激子。有机半导体中典型的激子结合能在 0.3～0.5eV，这就需要有效的激子分离手段形成自由载流子，从而得到较大的光电流。为了克服有机半导体中激子传输长度的限制(多为 5～20nm)，由给体/受体互传网络组成的体异质结(BHJ)结构成为有机光电探测器件的主流结构，从而实现对载流子的快速分离与提取[54-55]。

宽光谱吸收的无机半导体材料大都通过分光、滤波等附加组件并结合复杂算法实现颜色(波长)区分，而有机半导体材料的一大优势在于可以通过选用和设计本身窄带吸收分子，从而实现半高宽低至 100nm 以下，对蓝、绿、红光分别响应的窄带光电探测器，更易于满足彩色成像等应用需求[56]。此外，对载流子收集效率进行调制是进一步调制响应谱宽的有效途径[57]。当采用较厚的吸光层时，根据比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律：

$$A = -\varepsilon c l$$

其中，A 为消光比；ε 为摩尔消光系数（与材料本身特性相关）；c 为吸光物质浓度；l 为光程。因此，短波长光具有较高的吸收率 ε，在材料中的传播距离较短，在光电二极管中，绝大部分光生载流子都产生在与耗尽层距离较远的表面区域，而由于有机半导体材料普遍具有较小的扩散长度，此部分光生载流子难以被有效收集，从而导致较低的量子效率。而对于能量靠近吸收带边区域的长波长光子，能够穿透较深的距离从而被有效收集，实现窄带光谱响应探测。有机半导体光电器件的另一大优势在于光谱响应范围灵活可调，完整覆盖可见光区域并延伸至近红外。然而，受有机半导体的能隙定律束缚，当发射间隙移向深红色和近红外区域时，单线态和三线态的振动弛豫会加速，从而导致快速的非辐射复合，并因此降低了激子扩散长度，使得高性能的有机红外光电探测材料的实现非常困难[57]。目前，窄带宽有机半导体聚合物主要有 PTT（E_g=1.3eV）、LBPP-1（E_g=1eV）、PDDTT（E_g=0.8eV）等，以及红外响应有机小分子材料酞菁/卟啉基半导体[58]。有机光电探测应用主要集中在可见-近红外区域，虽然有少数报道称 1000nm 以上的有机红外探测应用[59]，但其较低的响应度/量子效率与传统无机光探测材料相差甚远，限制了其实际应用。

有机材料与生物体相似的软物质特性（较小的杨氏模量）极大地有别于传统无机半导体材料，其独特的机械性能在柔性电子，尤其是在可穿戴传感器领域具有巨大的潜力[57]。在第一代柔性有机光电二极管中，导电聚合物材料 PEDOT：PSS 因具有较好的导电特性，可以直接采用溶液旋涂、印刷等方式与 PET、PEN 等塑料材料兼容，被用以替代脆性无机氧化物材料（ITO 等）制备透明柔性导电基底[60]。Krebs 等设计并报道了首个基于 MEH-PPV：PCBM 体异质结、兼容塑料或编织物基底的可穿戴有机光电二极管[61]。随后，Lipomi 等报道了首个基于 P3HT：PCBM 体异质结与 PDMS 基底的可拉伸器件[62]，利用力学屈曲设计，对 200～500μm 厚的 PDMS 弹性基底进行预拉伸，在涂敷有机材料后进行应力释放转移而实现薄膜的蜿蜒结构，可承受达 27%的反复张力应变。进一步器件的高度可拉伸性由结构设计实现。Kaltenbrunner 等采用约 1.4μm 的 PET 基底实现了超轻（功率密度 10W/g）、超薄（器件总厚度约 2μm）、高度可弯曲（弯曲半径约 10μm）的柔性光电二极管，并且将器件转移至 PDMS 弹性基底后可承载 300%以上的张力形变（图 1-9）[38]。类似地，Park 等采用超轻超薄基底设计，在器件性能上取得了进一步突破（功率密度为 11.46W/g），并与有机电化学晶体管集成实现了自驱动生物传感器应用[63]。近期，Bao 等基于高迁移率（100%应变下迁移率为 20cm^2/(V·s)）本征可拉伸有机薄膜晶体管，实现了高密度柔性集成电路（10 万个晶体管每平方厘米），为柔性可穿戴集成传感与显示提供了可靠的技术支撑[2]。

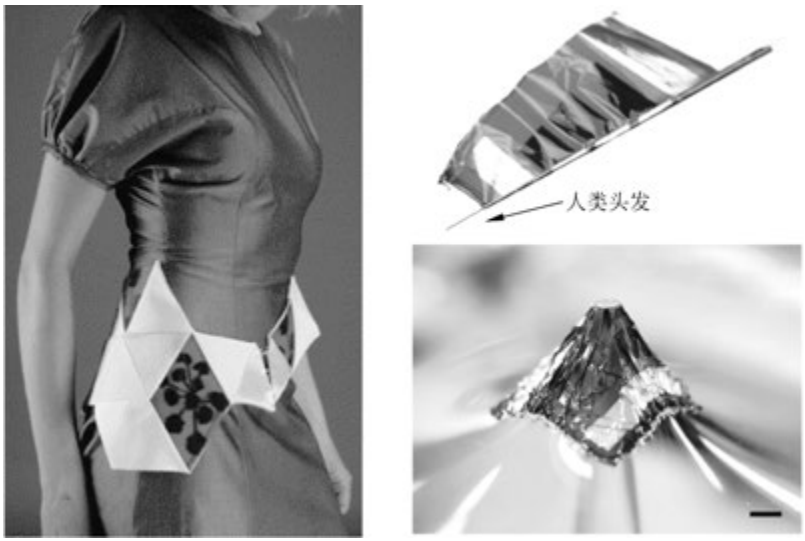


图 1-9　柔性有机光电探测器件[38,61]

综上，有机光电探测器已在高度柔性可拉伸器件上有了较大突破。但由于有机半导体较窄的光谱响应区域，在通信、自动驾驶、产品质量检测、生物医学等长波长光电应用领域有局限性。因此，柔性有机光电子领域的进一步发展，离不开长波长有机探测材料，以及有机-无机杂化、复合半导体体系的拓展与应用。此外，更成熟的封装技术是有机柔性电子的另一大挑战。众所周知，相比于无机半导体，有机材料普遍对空气、湿度、光、热等环境因素更为敏感。如今的有机电子产业，如有机薄膜晶体管(OFET)、有机发光二极管(OLED)等针对硬质基底的封装技术已经较为成熟，但对于需求高度可弯曲、可拉伸的柔性光电子器件，封装工艺的可靠性、稳定性及柔性化兼容问题还亟待解决。

1.2.2　基于无机半导体的柔性光电探测器

如前所述，通过合理的材料尺寸与器件结构设计，刚性半导体材料也能实现高度柔性化电子器件。早在 1967 年，Crabb 与 Treble 报道了最初的硅基柔性光伏组件，将初始厚度 400μm 的晶体硅减薄至 100μm 用于地外卫星[9]。基于高性能商用半导体材料与工艺向柔性基底的转移与结构设计，是柔性电子学发展的重要方向之一。2006 年，Rogers 等进一步将晶体硅厚度减薄至 100nm，采用微米级的带状阵列结构，运用转印的方式移植至柔性基底，利用力学屈曲设计，能够实现毫米级弯曲半径[20]。但晶体硅由于其间接带隙的特性，导致其受吸光系数的限制，无法通过进一步的厚度减薄以实现柔性与光电性能的最大化。而直接带隙半导体薄

膜材料，包括非晶硅、Ⅲ-Ⅴ族半导体、多元化合物半导体，可以通过超薄光吸收层设计进一步优化器件的可弯曲性[64-68]。

当材料减小至更小的尺寸时，材料本身的光学、电学、力学特性会发生改变。而低维材料因其至少一维方向的小尺寸效应而具有独特的力学特性，并且其灵活多样的制备手段如溶液法、低温外延法、转移、印刷等更有利于拓展柔性器件工艺。更重要的是，低维纳米材料因其不同于传统三维材料的光学与电学特性，如量子限域效应、多重激子效应等，有助于实现低噪声、高响应度的高性能光电器件[69]。

三维尺寸都处于纳米尺度范围内的纳米颗粒或量子点材料，具有带隙可调，强光耦合等特性，并因其广泛采用低温溶胶溶液法而有助于开发廉价大规模工艺制备高性能光电器件(图 1-10)[70]。Sargent 等采用溶液法制备 PbS 量子点光电导探测器，在 1.3μm 短波红外波段实现高达 10^3 A/W 的响应度与 10^{13} Jones 量级的比探测率，性能首次超过采用外延工艺的 InGaAs 商用红外探测器[24]。除广泛研究的 PbS 量子点之外，零维(0D)光电探测材料还包括 HgSe 纳米晶、$CuInSe_2$ 纳米晶、CdTe 纳米晶、ZnO 纳米晶、SnO_2 纳米晶、PbSe 量子点、CdSe 量子点、$AgBiS_2$ 纳米晶、InAs 等，光谱响应范围覆盖紫外-可见-长波红外区域(HgTe 量子点探测极限可达 12μm)[71]。然而，量子点(QD)半导体薄膜的迁移率多为 $10^{-5}\sim10^{-1}$ $cm^2/(V\cdot s)$ 量级，远低于无机薄膜材料或晶体硅，严重影响了器件的响应速度(与迁移率成反比)，因此，二极管型光电探测器多采用垂直耗尽型器件结构，使得载流子在反向偏压下快速分离与收集，能够实现快速响应。并且，量子点的可溶液低温制备特点使其具有与硅基 CMOS 读出电路单片集成的优势，有利于突破硅基光谱局限，实现高分辨红外传感器应用。然而，量子点器件的另一大问题在于其材料毒性，来源于 Cd、Pb、Hg 等有毒重金属元素在高质量量子点敏感材料中的大量使用，与环境政策相悖，不利于该技术的进一步发展与推广。针对此问题，Konstantatos 等制备了环境友好型Ⅱ-Ⅵ族 Ag_2Te 与Ⅲ-Ⅴ族 InSb 量子点材料[72-73]，实现了宽谱短波红外(350～1600nm)的高灵敏检测，比探测率维持在 10^{12} Jones 以上，并实现了与硅基 CMOS 的单片集成红外成像应用，对于推动低成本无毒红外成像技术的进一步发展具有重要意义[73]。

纳米线、纳米管等高长径比结构在光电探测与传感领域取得了长足的进展。单根纳米线通常具有较大的比表面及较少的表面缺陷，并且载流子传输被限制在一维传输通道，具有较高的迁移率及低复合率等优势[74-75]。同时纳米线具有较小的弯曲刚度，具有较好的柔性。与薄膜器件类似，纳米线器件也可大致分成光电导、二极管、晶体管三类。早在 2002 年，Yang 等首次报道了 ZnO 的单根纳米线光电导型探测器[76]，随着纳米线合成与器件制备工艺的进一步发展，半导体单质(Si、Ge、Te 等)、氧化物(ZnO、SnO_2、Zn_2SnO_4、$In_2Ge_2O_7$ 等)、Ⅲ-Ⅴ族(GaAs、

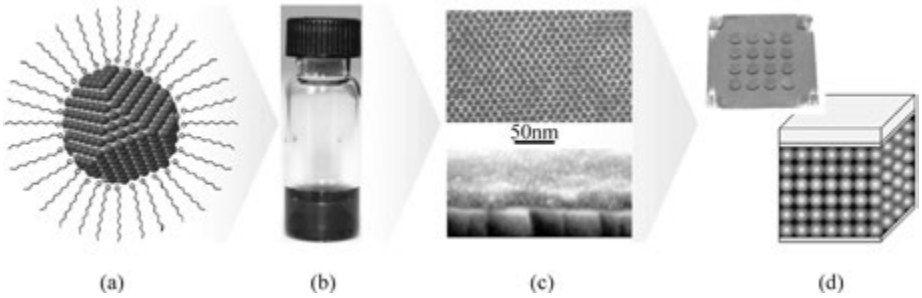


图 1-10 量子点器件工艺[70]

(a) 表面配体钝化的量子点结构示意图；(b) 量子点溶胶；(c) 量子点薄膜电子显微镜照片；(d) 量子点薄膜器件

InAs、InSb 等)、硫族化合物(CdS、PbS、In_2S_3、HgCdTe、Sb_2Se_3 等)等光敏材料均被研究用于单根纳米线光电导探测器，响应范围覆盖整个紫外-可见-红外区域，比探测率可高达 10^{19} Jones，但普遍存在暗电流较大，响应时间长的问题(多为毫秒级)[69]。纳米线异质结可以调制载流子的输运与分离，并通过内建能垒有效抑制暗电流，同步实现高增益与快速响应。Joselevich 等采用 CdS-CdSe 一维核壳结构实现了 3.8×10^3 的增益(响应度 1.2×10^3 A/W)，并且响应时间低至 200ns[77]。Lu 等报道了铁电聚合物侧栅极光电晶体管，采用铁电场效应实现了 InP 和 CdS 纳米线中本征载流子的调控，有效地抑制了暗电流，实现高增益(4.2×10^5 和 1.2×10^7)、高响应度(2.8×10^5 A/W 和 5.2×10^6 A/W)和高比探测率的光电探测器件[78]。尽管单根纳米线已经能够实现较高的探测性能，但应对实际应用中需求大面积、高响应度的光电探测应用，则需要进行纳米线的排布与集成。高质量Ⅲ-Ⅴ族垂直结构纳米线阵列可以通过外延工艺直接制备光电器件，但其材料巨大的表面粗糙度增加了电极制备难度，同时，复杂的 MOCVD、MBE 等外延工艺难以兼容柔性工艺。相比较而言，将预制备纳米线通过转移排布的方式更易于实现大面积柔性器件制造，具体工艺包括液流导向排布、鼓泡法排布、接触转印、电场辅助排布、Langmuir-Blodgett (LB)排布等，通过对液体流向、表面张力、静电力等的精确控制，实现对原本无序的纳米线定向诱导移动与排布，图 1-11(a)～(d)展示了通过差动辊式接触印刷法获得了柔性基底上的整齐排列纳米线阵列[75]。Javey 等采用液体辅助转印方式，实现了纳米线的晶圆级、高密度(8 根/μm)、定向排布(约 95%的方向准确性)[79]。类似地，Shen 等通过对 Zn_3As_2 纳米线的转印排布而实现了高性能柔性纳米线光电探测器[80]。除转印外，Shen 等采用静电纺丝技术实现了 Zn_2GeO_4 一维阵列的直接打印，通过改变打印参数可以实现对一维材料尺寸、阵列间距的直接调节[81]。类似地，Javey 等采用静电纺丝技术实现了 ZnO 纳米线在

柔性 PI 基底上的排布，并由于多晶纳米线晶界的肖特基势垒调制作用，对暗电流实现有效抑制，比探测率高达 3.3×10^{17} Jones[79]。但高性能纳米线器件制造工艺问题（包括材料产率、转移和排布）离集成电路的大面阵、产业化需求还有相当的距离，研究高质量高产率的纳米线与异质结制造工艺、高效的纳米线排布与集成工艺、不同维度材料的杂化互补以及新型器件结构，是现阶段的研究重点。

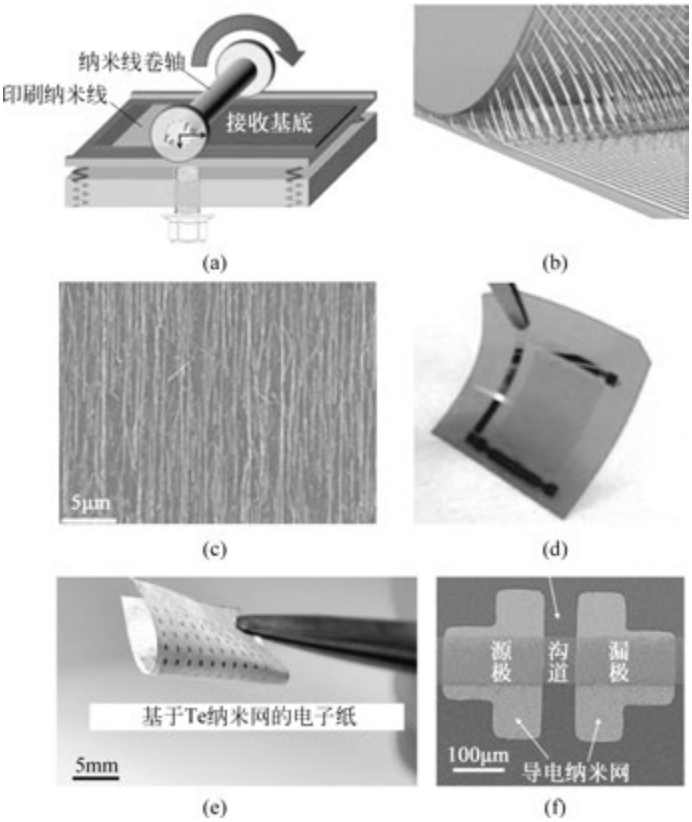


图 1-11　一维纳米线光电探测器件[75,82]

（a）差动辊式接触印刷装置；（b）使用圆柱形生长基底进行接触印刷过程图；（c）印刷出的纳米线阵列扫描电子显微镜图像；（d）印刷在柔性 PI 上的纳米线照片；（e）基于 Te 纳米网的电子纸；（f）导电纳米网

另外，由范德瓦耳斯作用力构筑的原子链结构，其共价键原子沿链向排布，构成独特的一维线状结构[83-84]。例如，碲、硒等单元素材料，展现出特异的类 DNA 螺旋链式结构，具有极高空穴迁移率，并具有较好的半导体特性。此外，过渡金属硫属化物与卤化物，构成丰富的一维材料体系，能带结构包括金属特性与半导体（0.1～6.71eV）。与普通的纳米线材料相比，一维范德瓦耳斯原子链半导体理论上不存在表面悬挂键，在尺寸大幅减小时不会出现因表面态增加而导致的电学性

能衰退，更有利于在三维尺度打破摩尔定律下的物理极限，实现下一代高密度光电传感芯片与集成电路应用。其中，Te 半导体材料因其链式结构，在柔性红外探测研究中受到大量关注。例如，Meng 等在任意的目标基底上，通过多重维度范德瓦耳斯作用机理，制备了自焊接(self-welding)原子链式 Te 基半导体纳米网，展示了高空穴迁移率 Te 纳米网的电子传输性能和超快的红外响应速度，如图 1-11(e)和(f)所示[82]。该工艺可实现低至 100℃的大面积材料生长，可兼容 PDMS、纸张等柔性基底，并且其网状结构具有天然的应力适应特性[85]，对于可穿戴光电传感应用具有潜力。

二维材料在垂直于材料平面的一维尺度具有量子限域效应，具有较强的光与物质作用以及较高的水平载流子迁移率，在光电器件领域有着巨大的潜力[28]。二维材料的原子级厚度层状结构使材料具有较好的机械柔性，从而在可弯曲柔性与曲面光电探测领域极具潜力[86]。此外，二维材料表面不存在悬挂键，能够在范德瓦耳斯力作用下与不同类型二维或其他维度材料和基底匹配，不受晶格失配的限制，在器件制备和优化方面具有很高的灵活度，在柔性器件、大面积集成电路领域具有巨大潜力[82]。

目前，二维材料系统已涵盖多个体系，按电学性质可以分为金属、半金属、半导体和绝缘体，适于不同光电子器件与系统的研究[28,87]。石墨烯为研究最早的零带隙半金属二维材料体系，由一层碳原子按蜂窝状六角晶格排列，室温下载流子迁移率高达 $10^4\,cm^2/(V\cdot s)$，能够被用于紫外-太赫兹的超快光谱探测(高达 40GHz 带宽)，但单层石墨烯的光吸收能力较弱，从而限制了其光响应度与量子效率。TMD 是另一种广泛研究的二维材料，化学式为 MX_2(M 代表 Mo、W 等过渡金属元素，X 为 S、Se 与 Te)，其带隙多为 1～2eV，是典型的半导体材料。随着层数的减少，量子限域效应逐渐明显，能带结构发生改变，同时展现出很强的光与物质相互作用，比石墨烯更适合于光电器件应用；但由于带隙限制，工作范围多集中在紫外-可见-近红外区域，对波长 1μm 以上的红外区域响应有限，并且 TMD 材料普遍缺陷浓度较高，因其对光生载流子的捕获作用而影响器件响应速度。六方氮化硼(h-BN)是一种禁带宽度约为 6eV 的层状材料，因其较高的介电常数被用作良好的绝缘介电材料。此外，新兴的类石墨烯的单原子层单质二维材料 Xenes(例如，硅烯、锗烯、磷烯等)，具有更窄的禁带宽度(0.2～2eV)并兼具高迁移率(100～1000$cm^2/(V\cdot s)$)，能够应用于短波与中红外光探测。其中，黑磷(BP)光电探测器在光通信窗口 1.55μm 波长下可实现高达 657mA/W 的响应度及 3GHz 的响应带宽。但此类材料的大面积制备及稳定性等问题还有待解决。图 1-12(a)为典型二维材料结构示意图。

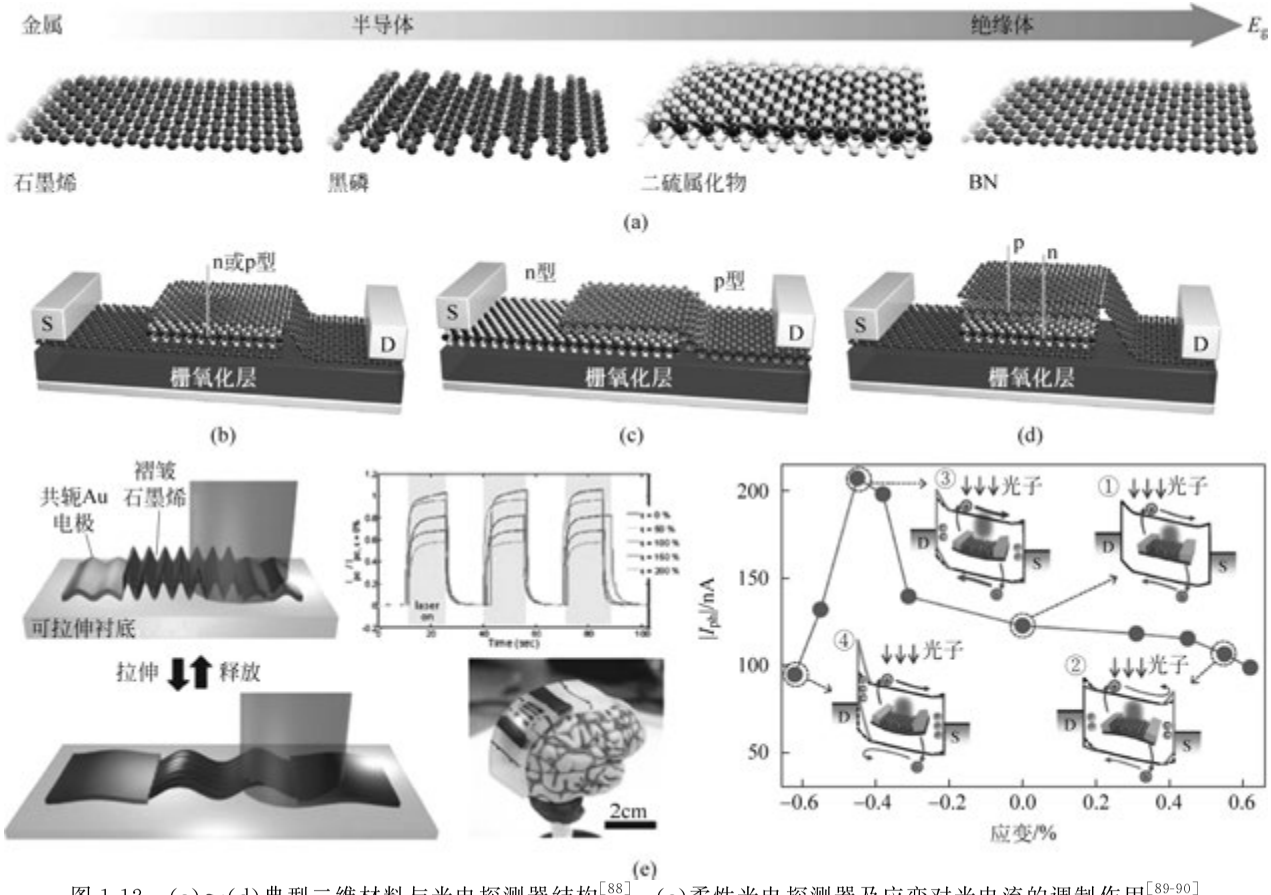


图 1-12　(a)～(d)典型二维材料与光电探测器结构[88]；(e)柔性光电探测器及应变对光电流的调制作用[89-90]

由于二维材料本身的物理特性，其在器件制造时不受晶格匹配限制，能与任何维度材料复合制备异质结型器件。图 1-12(b)～(d)所示为三种典型二维范德瓦耳斯异质结型器件。图 1-12(b)为垂直结构石墨烯-二维光敏层-石墨烯结构，通过二维石墨烯作为电极与光敏材料垂直堆叠，可以实现载流子在光电导探测器中的纵向传输。这是根据载流子渡越时间与沟道长度的二次相关性[51]：

$$\tau_{\text{transit}} = L^2/(\mu V_{\text{ds}})$$

垂直结构器件的沟道长度仅为材料厚度本身，对于单层二维材料仅为原子级别，因此能够实现大面积的光电子产生与快速传输。另外，石墨烯的功函数可通过底栅极进行调制，实现类二极管的整流效应，对光电流进行调控。Koppens 等报道了石墨烯/WSe_2/石墨烯光电探测器，采用三层 WSe_2 实现了 5.5ps 的超快响应以及 70%以上的内量子效率(IQE)[91]。图 1-12(c)与(d)均为 pn 结光电二极管型探测器，区别在于是否需要载流子在二维光敏层中进行横向输运。通常 TMD 等光敏材料具有较高缺陷浓度与相对较低的迁移率，从而载流子的扩散长度有限，难以在微米量级的沟道内实现对载流子的有效收集(图 1-12(c))。而通过石墨烯电极可以将光生载流子在光敏层的传输完全限制在耗尽区，能够有效提升探测器型性能(图 1-12(d))。Kim 等证明，基于石墨烯电极的纵向二维 pn 结器件的响应度是横向参比器件的 5 倍[92]。

同时，因其较好的机械柔性，二维材料被用于研究应变对其光电性能的调控。例如，Nam 等采用力学屈曲方式设计了褶皱的石墨烯柔性器件，发现其消光比与平面石墨烯相比增加了一个数量级以上，获得了更高的光响应度(图 1-12(e))，这归因于褶皱区域的费米能级在应变下发生改变，从而与无应变区域形成了背靠背内建电场(势垒)，有利于光生载流子的分离并抑制暗电流[89]。Javey 等发现了多层 WSe_2 在应力作用下发生间接带隙向直接带隙的转变，致其光致发光强度提升了 35 倍[93]。Garaj 等利用基底粗糙表面诱导 MoS_2 等 TMD 材料产生应变，将载流子迁移率增加了约 2 个数量级[94]。此外，应变还能够通过压电效应调节器件性能。Wang 等报道了基于单层 MoS_2 的柔性光电探测器，应变能够调节肖特基势垒，以类似栅压调控的方式对光电流进行调制[90]。事实上，施加应变对于晶体硅等三维半导体的电学性能同样有着显著的调节作用，电子与空穴的迁移率都能得到大幅提升[86,95]，但可调节范围受限于其较小的弹性应变窗口(约 1%)。相比较而言，原子层厚度的二维材料本身能够承受约 20%的拉伸应变，更有利于研究和利用应变调制以实现高性能柔性光电器件。

1.2.3 卤化铅钙钛矿柔性光电探测器

钙钛矿是分子通式为 ABX_3 的一类晶体材料，最早是 1839 年德国科学家

Gustav Rose 发现了元素组成为 $CaTiO_3$ 的矿物，后来人们将具有这种晶体结构的物质统称为钙钛矿[96-97]。在钙钛矿八面体结构中，A 是较大的阳离子，B 是较小的阳离子，X 是阴离子，每个 A 离子被 B 和 X 离子一起构成的八面体所包围。其中，有机卤化铅钙钛矿在光伏领域的突破使其成为近年来备受瞩目的材料之一。有机卤化铅钙钛矿的 ABX_3 结构中，A 为一价阳离子包括甲基铵（$CH_3NH_3^+$，简写为 MA^+）、甲脒（$HC(NH_2)_2^+$，简写为 FA^+）、铯离子（Cs^+）等；B 为二价金属阳离子，包括铅离子（Pb^{2+}）或锡离子（Sn^{2+}）；X 为卤化物阴离子包括碘（I^-）、溴（Br^-）、氯（Cl^-）等。卤化铅钙钛矿卓越的光电性能来源于其较强的可见光吸收（比硅高一个数量级以上）、高载流子迁移率，以及较高的缺陷容限。此外，其离子化合物属性使得有机卤化铅钙钛矿材料通常具有较好的溶解性，有利于采用低温溶液法制备，能够较好地兼容柔性工艺[98]。首个柔性钙钛矿光电探测器是将 $MAPbI_3$ 涂敷在镀有 ITO 的柔性基底上，采用光电导结构实现了 310～780nm 的宽光谱响应，在弯折测试 120 次后，电学性能保持不变[99]。此外，被用于钙钛矿光电探测研究的柔性基底还包括碳纤维布、纸等[100]。虽然钙钛矿薄膜厚度可低至 300～500nm，能够具有一定可弯折性，但具有本征柔性的低维材料更有利于实现高度柔性器件，而钙钛矿因其灵活的低温合成手段，易于实现形貌和维度控制。$MAPbI_3$ 量子点可由配体辅助再沉淀法（LARP）制备，通过添加反溶剂来改变溶质极性从而激发钙钛矿快速成核析出，带隙 3.1～1.7eV 可调。Zhai 等报道了 $MAPbI_3$ 量子点敏化 TiO_2 纳米管阵列，实现透明柔性光电探测器（在 400～800nm 范围透明度 85%），可承受 180°的弯折角度[101]。钙钛矿一维纳米线主要通过二甲基甲酰胺（DMF）-异丙醇混合溶剂法加速溶解-析出制备，在柔性光电探测领域也展现出应用潜力。Cloutier 等在柔性 Kapton 胶带上采用溶液法制备了 $CH_3NH_3PbI_{3-x}(SCN)_x$ 钙钛矿纳米线网络，具有 0.62A/W 的光响应度，7.3×10^{12} Jones 的比探测率，227.2μs 的响应时间，5000 次以上弯曲测试后保持光电流稳定[102]。随后，Zhai 等报道了化学改性后的 $MAPbI_3$ 钙钛矿纳米线网络结构，实现了全面的性能提升（比探测率 2.06×10^{13} Jones，带宽 160DB，响应时间＜100μs，在空气中 5000h 以上的器件稳定性）[103]。Shen 等报道了钙钛矿微米线，其具有偏振敏感与柔性兼容特性，为多维度视觉光电传感器研究提供了重要思路[104]。

同时，钙钛矿材料的低温溶液工艺优势，可以兼容曲面基底，在新型光电探测与成像领域有着重要应用。Wei 等采用喷涂工艺制备了差分式钙钛矿半球探测器，具有高量子效率（约 1000%）以及低噪声$\left(10^{-13}\,A/Hz^{\frac{1}{2}}\right)$的器件特性，借助计算成像手段实现了颜色与路径识别[105]。Fan 等开展了一系列基于阳极氧化铝多孔模板的钙钛矿纳米线阵列的光电探测与图像传感阵列研究，在曲面成像与视网膜

功能模拟方面取得了关键突破[1]。然而材料的稳定性与铅的毒性仍然是卤化铅钙钛矿器件发展的最大障碍，器件的有效封装以及开发稳定、非铅、高性能新型钙钛矿材料是开展相关器件研究的重点。

1.2.4 纤维与编织柔性光电器件

相较于可弯曲的平面器件(仅在一维度下具有较低弯曲刚度正比于厚度 d 的三次方：$EI=E\times bd^3/12$，其中 EI 为弯曲刚度，E 为杨氏模量，d 为材料厚度，b 为材料宽度)，纤维结构在宽度与厚度二维尺度下都实现小尺寸，使得细纤维能够具有更低的弯曲刚度(正比于半径的四次方：$I\propto r^4$)而具有更好的柔性[100]。单根纤维结构光电器件主要通过两种工艺制备：基于多材料的共拉制与基于导电纤维基底的共轴器件。前者源于光纤制备工艺，首先基于器件结构设计并制备包括活性材料、电极、包覆层的大尺寸预制棒，之后通过加热材料至玻璃化温度以上进行拉制，直接实现纤维结构的器件制备[106]。此器件工艺要求：①包覆层具有相对较高的黏度，例如玻璃和热塑性塑料等在温度变化下具有连续变化的黏度；②工艺具有足够大的温度窗口(从玻璃态到结晶化温度)，使得非晶材料在发生塑性形变前不会结晶；③所使用晶体材料的熔点需要低于拉制温度，从而能够以熔融状态流入纤维；④所有非晶材料必须具有相对一致的热膨胀系数，从而避免在拉制过程中参与应变引起纤维断裂。最初的纤维光电探测器结构由半导体($As_{40}Se_{50}Te_{10}Sn_5$)光敏材料、锡金属电极以及绝缘包覆层通过热拉制而制备[107]。随后，Fink 等进一步拉制了基于 InGaN LED 的发光纤维与 GaAs pin 光电探测纤维的光通信系统(图 1-13)，展现了在可穿戴领域的应用潜力[108]。此外，相比于 Si、Ge 等商用半导体材料由于自身的晶体学特性而不易通过拉制形成理想的微结构及电极接触，Se 单质具有较低的熔点、良好的微结构可控性以及优异的光电特性。Sorin 等报道了共拉制 Se 纤维光电探测器响应度约为 0.06A/W，开关比为 700～800，并且具有低至 $76pW/Hz^{\frac{1}{2}}$ 的噪声等效功率(可以与硅光电二极管媲美)[109-110]。

相比于多材料拉制，基于导电纤维基底的共轴设计则采用多步工艺，直接在金属丝、碳纤维等柔性电极表面包覆传输层与活性材料，避免了高温拉制对材料物理化学性质的限制，对电极可以采用图 1-14(a)所示的共轴、缠绕、交错三种方式实现电荷收集[112]。其中，共轴方式近似平面薄膜光电器件，所需载流子传输路径较短，最利于实现对载流子的有效收集，但在光电应用中对于电极材料的透光性有较高的要求；缠绕方式能够避免对电极对光的完全遮挡，但其点接触式截面需要较长的载流子传输路径，不利于对载流子的收集；交错方式在两者间求取折中，更加便于集成制备可编织器件。其中，共轴方式较为普遍，图 1-14(b)所示为原位生长 ZnO 阵列的 Zn 导电纤维结构，之上包裹一层聚(9-乙烯基咔唑)(PVK)与 PEDOT：PSS 分别作为电

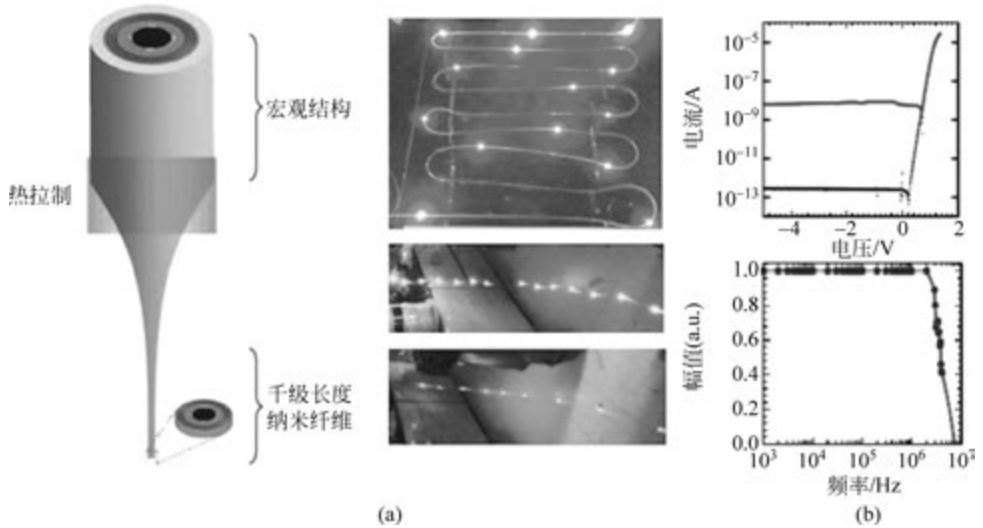


图 1-13　(a)热拉制光电纤维与器件[111]；(b)发光 LED 与探测纤维器件[106,108]

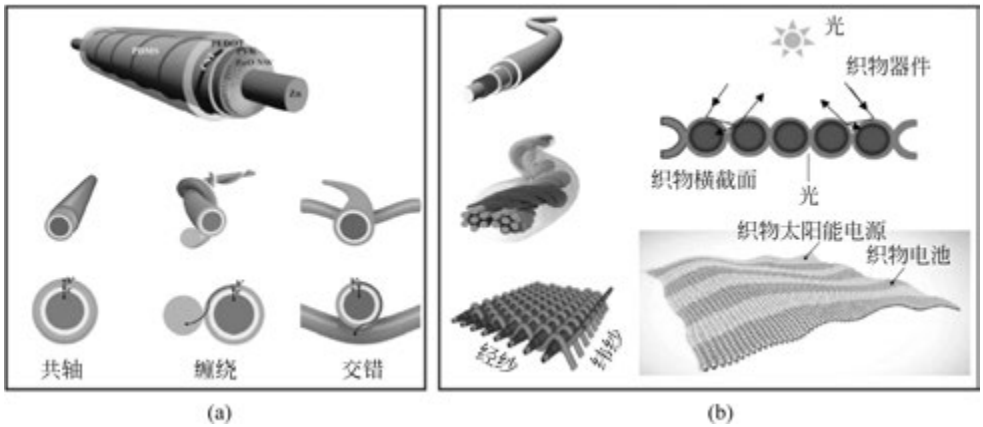


图 1-14　(a)单根光电纤维器件[112,116]；(b)纤维集成柔性织物[100,117]

子阻挡层与空穴传输层，最后包裹碳纳米管(CNT)及 PDMS 封装层。所制备的光电探测纤维具有 2.18 的开关比与 0.03A/W 的响应度[113]。随后，采用石墨烯替换 CNT 与 PEDOT：PSS 实现了更高的响应度(0.9A/W)与开关比(7.2)[114]。此外，采用纤维缠绕的方式在染料敏化、有机、钙钛矿等光伏领域取得了一定进展，例如，基于卤化铅钙钛矿的双捻纤维光伏器件取得了 15.7%的光电转换效率，并通过经纬交错编织展示了在可穿戴光电应用中的潜力[115]。

而针对单根纤维机械强度较低，活性面积较小的问题，常采用捆装、编织的方式实现高机械强度、高性能器件。一方面，编织结构器件通过构建粗糙表面减少了

光能的反射损耗；另一方面，由于编织物中纤维的卷曲排列，为器件增加了柔性。例如，不锈钢丝等金属纤维本身不具备可拉伸性，但交错编织后的不锈钢网就具有一定的可拉伸性，尤其是在其经、纬线的45°方向上，这源于金属网的角向弹性。此外，编织器件的孔状结构具有一定的透气性，特别是采用弹性纤维的编织器件在穿戴舒适度上优于基于柔性聚合物的平面器件[100]。现阶段的电子织物编织制备主要通过两种方式：①将完整功能的单根/捆纤维通过传统纺织方式集成；②将活性电极与对电极通过经纬交错方式编织集成。前者每根纤维都是独立的器件，整体织物通过简单串并联结合以满足实际应用需求[118]。例如，独立的锂离子电池纤维可以被编织集成，实现2.5～10V的电压提升[119]。而第二种方式是将功能纤维分为经纬两部分，通过交错编织实现织物的完整功能。此方法较易于实现大面积电子器件与组件制备，通过调控纺织参数，如间隔、厚度等，能够优化器件性能，尤其是在光电器件中实现光吸收与电传输的平衡。尽管目前高性能、大面积的电子织物已有相关文献报道，在穿戴电子领域展现出巨大的应用潜力，但现阶段的纤维电子器件工艺基础还不成熟，其电学与机械性能、封装工艺并不完善，难以适用大规模机械化的纺织流程，与实际应用还有较长的距离。

1.2.5 类脑光电传感器件

尽管人工智能和微处理器速度发展迅猛，但功耗与能源供给问题仍是先进可穿戴电子设备的主要瓶颈。这一挑战在日常生活中显而易见——从智能手机频繁充电到电动汽车续航与安全性问题，均受限于电池技术。对于可穿戴电子器件应用，如Apple Vision Pro等虚拟现实/增强现实(VR/AR)设备，也因高功耗而面临续航时间受限的问题。为解决这一难题，我们可选择两条技术路径：开发高能量密度超级电池，或在保持性能的前提下降低功耗。这里将聚焦后者，重点探讨如何实现微型化、轻量化的可穿戴设备设计。

传统传感系统将刺激信号在传感节点转换为电信号，随后将原始数据传输至处理单元进行识别与驱动(图1-15(a1))。这种架构会导致延迟、功率损耗和效率低下，因为大量无关数据需在下游进行过滤。为解决这一问题，具备固有图像预处理能力的新型探测器件显得尤为重要，尤其对于可穿戴眼动追踪器等资源受限设备。如图1-15(a2)所示，预处理任务包括噪声抑制、边缘及对比度增强等。与处理器中晶体管电路不同，某些模拟生物神经系统的器件模型可在传感层面实现这一功能。例如，具有超线性光响应的传感器可增强对强光的敏感性并抑制背景噪声，而亚线性光响应则能降低对比度、平滑边缘。类似地，具有可调电导的忆阻器或光学突触可模拟突触行为，实现底层数据过滤。诸如MoO_x之类材料通过光诱导氢插层表现出持久且可逆的电导变化，能够通过将强刺激与长时程保持相关联来提取有效特征[120]。此外，陷阱态、结势垒和相变等机制也有助于实现光诱导持续光

电导效应[121]。这些创新技术实现了传感器内信息预处理，既简化了系统架构，又为紧凑型、高能效物联网应用提供了新机遇。

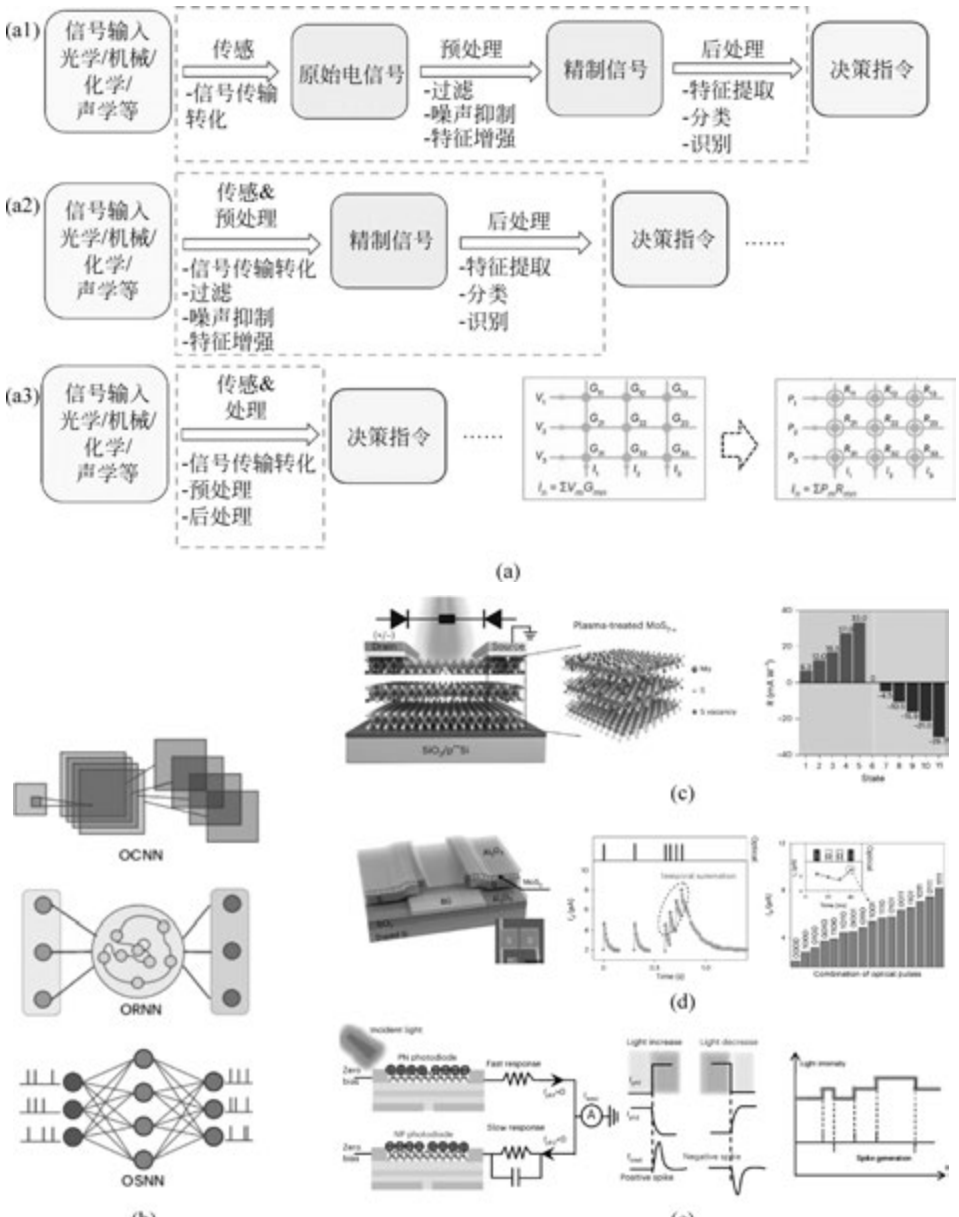


图 1-15　(a1)传统传感器、(a2)近传感器、(a3)传感器内运算架构的对比[122]；(b)三种人工神经网络架构[123]及其(c)～(e)对应的器件模型[124-126]

更进一步，可重构多状态电子器件能够执行更高层次的功能，如信息处理计算。人工神经网络（ANN）中的关键操作——包括矩阵向量乘法（MVM）和乘积累加运算（MAC）——可通过具备多态更新能力（如电导或光响应性）的器件实现，从而编码突触权重。MVM 可通过矩阵光电检测或欧姆定律实现（图 1-15(a3)），而 MAC 则能基于基尔霍夫定律通过电路设计完成[127]。以混合模拟存内计算框架为例，其与传统 GPU 和 CPU 相比展现出更高能效[128]。图 1-15(b)具体展示了三种典型 ANN 架构[123]：卷积神经网络（CNN）和储备池神经网络（RNN）擅长图像与视频处理；对于时空数据，受生物神经元脉冲行为启发的脉冲神经网络（SNN）在低功耗计算方面表现突出。为实现 ANN 的硬件部署，目前已开发出多种神经形态传感器件。例如，具有可重构极性的光电二极管可实现双极光响应（图 1-15(c)），从而促进卷积运算[124]；具有可调短时光电流持续与累积行为的器件可在单帧内编码时空信息（图 1-15(d)），形成兼容 RNN 的光电前端层，显著提升运动识别计算效率[125]；另有创新设计采用两个极性相反、RC 常数不同的并联光电二极管（图 1-15(e)），能够响应光变化产生双极脉冲，有效复现事件驱动行为[126]。该结构与泄漏积分发放（LIF）神经元集成后构成完整 SNN，其中栅极可调响应度与突触权重相关联。

综上，光电探测器作为光电传感系统的核心，其柔性化的实现要求各组成部分在光、电、力学层面上实现完美统一。但限于目前材料与器件工艺，与柔性器件的大面积、大规模制造与产业化应用还有相当的距离，对于新材料物理化学性质的进一步探索以及在器件层面上有针对性的优化和工艺改进，是柔性光电子领域发展的关键。

1.3 可穿戴光电传感技术

以上分别从材料与器件层面阐述了柔性光电传感技术的核心——柔性光电探测器的设计原理，并综述了研究领域的前沿进展，分析了目前所面临的瓶颈问题。本节将以应用为导向，综述柔性光电传感系统的研究前沿，结合其在下一代智能社会中的感知延伸、人工智能、医疗与健康等关键领域中的重要作用，展望柔性光电传感技术的前景。

1.3.1 柔性与曲面图像传感

光电成像是指采用光电传感技术获取图像信息，涉及从日常生产生活到尖端国防应用，对社会的信息化与现代化发展具有重要意义。而系统的柔性化能够提供便携式、可穿戴、高度适应的新技术选项，对发展曲面成像、仿生感知应用具有重要价值。

光电成像可以简要概括为以下两步：①光电探测器阵列吸收光能并转化为与光信息相关的电信号；②电信号的处理与读取[129]。因此，柔性成像系统不仅要求光电探测阵列的高度柔性化，还需要实现与之兼容的柔性逻辑电路。就其具体的信号读取方式，成像系统可以分为无源和有源两类。无源像素传感器(PPS)包括光敏元件与开关器件(如晶体管与二极管等)。该系统的结构简单(每个传感像素仅包含两个元件)，易于制备，在柔性成像系统的研究中广泛使用。Someya 等报道了基于有机光电二极管和有机薄膜晶体管集成的 72×72 的柔性图像传感阵列，像素尺寸为 36dpi，能够成功用于弯曲成像识别曲面文字信息[130]。Gasparini 等报道了更大面阵 256×256 像素阵列的有机光电二极管与非晶硅薄膜晶体管集成图像传感系统[131]。除晶体管外，二极管也被用作图像传感系统中的开关元件，这是由于二极管器件常采用垂直结构(沟道较短)，具有大电流和快速响应等优势，并且在工艺上更易于与同样二极管结构的光探测器集成(图 1-16(a))。Lee 等将硅基薄膜整流二极管与钙钛矿光电二极管集成，制备了 10×10 的柔性图像传感阵列，每个像素点仅为 2μm，传感器总厚度为 4μm[132]。Someya 等进一步报道了在 1μm 厚的聚合物柔性基底上采用溶液法制备 16×16 矩阵、262dpi 的高分辨有机图像传感器[133]。

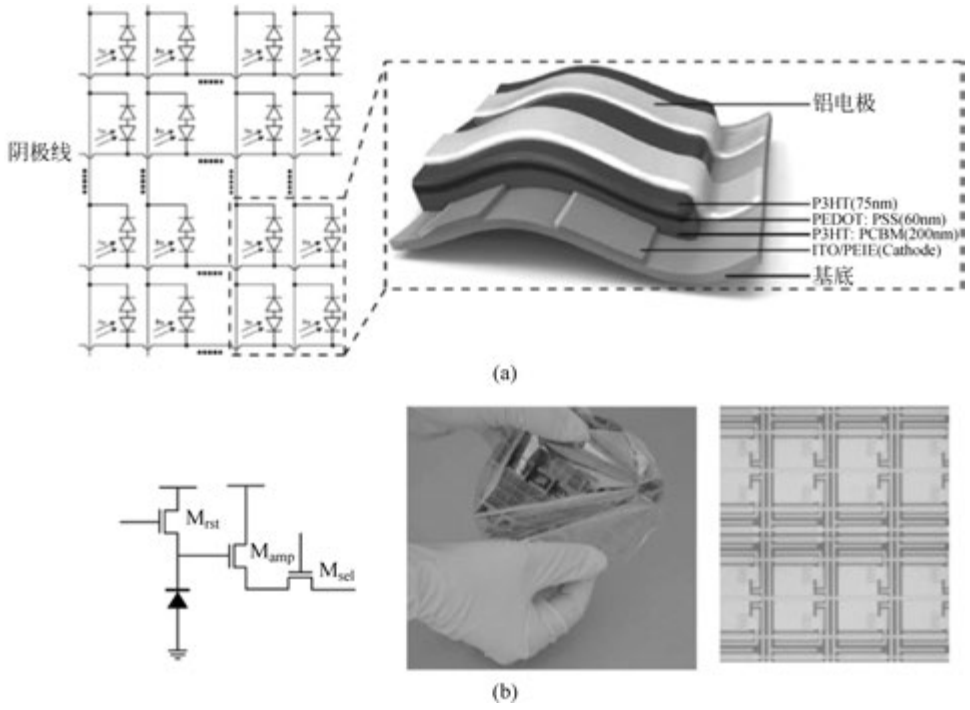


图 1-16　柔性成像器件

(a) 无源像素传感器；(b) 有源像素传感器[129]

但由于每个独立光探测器的输出信号较弱，PPS 系统存在信噪比低与串扰等问题。相比而言，有源图像传感器（APS）在光敏元件与开关元件外还引入信号放大单元，能够实现信噪比的提升，从而有效抑制电路噪声与像素串扰[134]，如 CMOS 等大部分商用图像传感器采用 APS 系统。其中 3T-APS 读取/控制电路中包含三个晶体管器件，分别为复位晶体管、行选晶体管、源跟随晶体管，分别实现重置、选行、有源信号放大的功能（图 1-16(b)）。而针对 3T 结构中放大与重置电路中的噪声问题，进一步地，光电二极管与源跟随晶体管之间加入传输门晶体管（4T-APS），实现光电转换和探测工作模式的分离，能够有效降低电容热噪声（kTC），提高信噪比。因此，增加 APS 像素的有源器件数量如 4T、5T、6T 等，能够提高图像传感器的成像质量[135]。但是在特定像素尺寸下，多晶体管设计会挤占光电二极管的面积，从而降低像素的填充系数（FF，即光敏面积占整个像素面积的比例），而过低的 FF 将降低传感器的灵敏度和动态范围，并且不利于微型化设计。对于柔性器件，增加晶体管数量将极大地增加设计与制造的困难程度，以及系统整体的柔性力学设计。De Roose 等采用 IGZO 薄膜晶体管制备了基于 3T-APS 结构的柔性图像传感器，实现了高分辨率（254dpi）的 X 光成像[135]。然而在现阶段柔性光电成像系统的研究中，由于 3T-APS 设计工艺的复杂性，大都采用较为简化的 APS 设计。例如，Wang 等报道了基于三元件集成的有机图像传感器，包括有机光电导探测器、有机电阻负载、有机薄膜晶体管来实现信号读取与放大，在 10μm 厚的柔性聚合物基底上实现了 152 像素的成像系统[136]。Shen 等报道了基于 Bi_2Se_2S 光探测器与 In_2O_3 场效应晶体管的全纳米线图像传感器，实现了在 1342nm 红外光下响应度高达 7.6×10^4 的光探测器件，并制成基于 10×10 图像传感阵列的感算系统，能够模拟神经网络功能对图像进行智能识别[137]。此外，有机与杂化半导体易加工且具本征柔性，已证明其在大规模电子应用中的可行性，在可穿戴与人机交互领域极具潜力。例如，Bao 等报道了基于有机晶体管的高密度大规模集成电路，包含 1000 个晶体管以上，开关频率高于 1MHz，并具有本征可拉伸特性[2]。有机半导体另一优势是优异透光性，Kamijo 等报道了一种基于视觉透明的近红外敏感有机光电探测器（OPD）阵列传感器的非接触式用户界面，可用于显示器屏幕[138]。光学透明度是通过以印刷铜栅格作为底部透明导电电极（TCE）和图案化有机光电探测器子像素阵列来实现的。通过优化图像传感器的设计，从而在 850nm 处获得 10^{12} Jones 的光电探测率，高达 70% 的可见光透射率（VLT），可以无接触式光控界面[138]。

然而，有机半导体等材料存在稳定性问题，与标准光刻工艺不兼容，限制了超大规模集成（VLSI）的发展。相较之下，胶体量子点（CQD）虽在严苛化学试剂中本征不稳定，但近期通过配体化学调控可兼容光刻技术。这一重要进展采用双配体

钝化策略：光交联配体(PXLs)与分散配体(DLs)[139]。PXLs为经结构设计的分子支架，在长波紫外光(UVA)照射下与相邻配体形成共价键，可实现高通量量子点图案化且不损害光学性能。最终获得15000ppi的精细量子点图案，突破有机与杂化图像传感器的分辨率瓶颈。有报道通过钙钛矿量子点嵌入有机半导体的光刻工艺，成功制备2.67英寸全画幅极大规模集成(ULSI)芯片，含2700万互连像素[140]，像素密度达3.1×10^6 units/cm^2(等效4016ppi)，可媲美最新商用全画幅相机芯片水平。

柔性光电传感系统在曲面成像应用中尤为重要。例如，X射线医学成像可以通过间接转换方式，利用闪烁体将X射线转换为紫外或可见光后，采用光电探测器接收。然而，商用刚性探测器对于复杂的曲面人体结构的适应度较差。柔性光电成像系统能够更易于制备曲面X射线检测系统，较好地适应人体结构，有利于实现更高的检测精度[55]。2014年，Kaniki等基于有机光电二极管与非晶IGZO薄膜晶体管的有源图像传感器，提出了下一代基于断层扫描的乳腺癌诊断技术[14]。随后，Gelinck等在塑料基底上完成了首个X射线探测器的雏形设计，具有120×160阵列，像素尺寸126μm[142]。相比而言，X射线探测器的直接转换具有更高的图像质量与转换效率，是近年来的研究热点。Huang等将卤化铅钙钛矿填充于尼龙薄膜中，利用钙钛矿材料的优异的辐射探测性能(强X射线吸收、高扩散长度等)，结合尼龙材料的本征柔性，制备了大面积(400cm^2)、高柔度(弯曲半径低至2mm)的X射线探测器[143]。Kim等设计了一种基于MoS_2薄膜晶体管和石墨烯/MoS_2光电探测器的柔性X射线探测器。通过合理选择材料和优化器件结构，成功实现了3600个像素的大面积背板(3cm×3cm)，并且该探测器展现出17.31cm^2/(V·s)的高电子迁移率和9.37A/W的光电响应性，特别是在闪烁体发射波长544nm附近。该团队还采用生成式对抗网络(GAN)技术对探测器图像进行后处理，显著抑制了设备的固有噪声，并在低剂量X射线曝光下成功获取了高质量图像。

1.3.2　仿生视觉

人眼具有突出的图像传感特性，包括大视野、高分辨率、低像差等，研究仿人眼形态与功能的人工视觉系统将推动下一代机器人、仿生电子等领域的发展。例如，人眼成像系统将光由晶状体聚焦在视网膜，刺激感光神经细胞，通过大脑的中央处理功能形成视觉[74]。Fan等报道了基于钙钛矿纳米线阵列的感光器件，并成功实现了模拟人眼形态和功能的电化学仿生电子眼[1]。相比于平面图像传感器，人工视网膜的球面设计使得透镜与传感阵列的距离更加一致，具有更广阔的视场(FOV)并更有利于光聚焦于每个像素。除人眼外，单腔体结构的鱼眼、鹰眼与昆

虫复眼结构等也是仿生视觉的研究热点(图 1-17),主要针对水下、远程视觉、大视野、深景深等特定应用需求[144]。例如,Kim 等受鱼类等水生生物的眼睛结构启发(鱼类具有高达 160°的广角视野特性,而人类视野普遍低于 100°),研制了由单轴透镜和半球结构硅纳米棒光电二极管阵列组成的仿生视觉系统,具有大视角、小型化、低像差、深景深和高适应性等特性。其中,硅基图像传感阵列的连接处通过蛇形蜿蜒力学设计,极大程度地减小了硅光电二极管所承受的应变(仅为 0.02%,远小于硅的断裂极限(约 1%)),实现了仿生视网膜的柔性化[145]。

现阶段的仿生视觉研究已经取得了突出的进展。然而数据的采集与信号处理仍然采用传统感知-计算分离的方式,相比于人眼等生物视觉系统中每平方厘米的千万个视锥细胞,感知-存储-计算一体的低功耗、高效率的感知模式,还存在较大差距。为突破传统冯·诺依曼感知-存储-计算分立计算体系在高速并行计算效率方面的局限,近年来光电神经形态器件和系统在物理层面上模仿人脑神经结构和运行模式,无需额外内存和处理单元,具有实现高度并行、高效的感知-存储-计算一体视觉感知系统的应用潜力[121]。人脑中大约有 10^{11} 个神经元和 10^{15} 个突触,其中神经元是神经系统传递信息的基本结构和功能单元,可以接收来自之前神经元释放的信号并进行整合。当整合的信号强度超过一定阈值时,神经元的轴突末梢会释放神经递质,向后续神经元发送电化学信号,实现信息的处理和传递。而突触是实现神经元间或神经元与效应器间信号传递的重要媒介。生物突触通过电化学的相互作用引起突触权重的改变,称为突触的可塑性,是大脑实现信息编码、学习与记忆的基础。人工光电突触器件是通过光信号对器件电导或电阻的可控调节来模拟突触权重变化,实现对其可塑性功能的模拟。光电神经形态器件兼具感光和信号处理功能,对于构建人工视觉系统具有广阔的应用前景。例如,Shen 等将 In_2O_3 纳米线光探测器与 Al_2O_3 薄膜忆阻器结合,通过光电调制忆阻器在高阻态与低阻态之间的转化,实现可控的图像存储功能[147]。除忆阻器外,薄膜晶体管、相变存储器、铁电存储器等具有存储与记忆效应的元件都能够用来与光敏元件结合模拟光电突触[148]。相比于采用分立元件集成方式中存在的电学兼容性、工艺的复杂性、元件连接噪声等问题,单一元件的光电突触器件通过光对器件电导率的调制,结合离子迁移、缺陷捕获、光致相变等材料内部机制,导致光照结束后的光电导效应的弛豫特性,从而模拟突触的光致可塑性、学习和记忆功能,在高集成度视觉系统的研究中具有重要意义[121]。例如,IGZO 等金属-氧化物-半导体可以通过光致氧空位缺陷的电离或移动引发弛豫光电导效应,实现对生物突触可塑性的模拟[149];纳米颗粒、量子点等材料的表面容易形成载流子陷阱,其较长的缺陷复合寿命能够模拟类似突触功能的记忆效应。Shen 等报道了基于 $Cs_3Bi_2I_9$ 纳米颗粒溶胶的人工光电突触,能够模拟视觉系统完成彩色图像识别、信号处理功能,并展示了较好

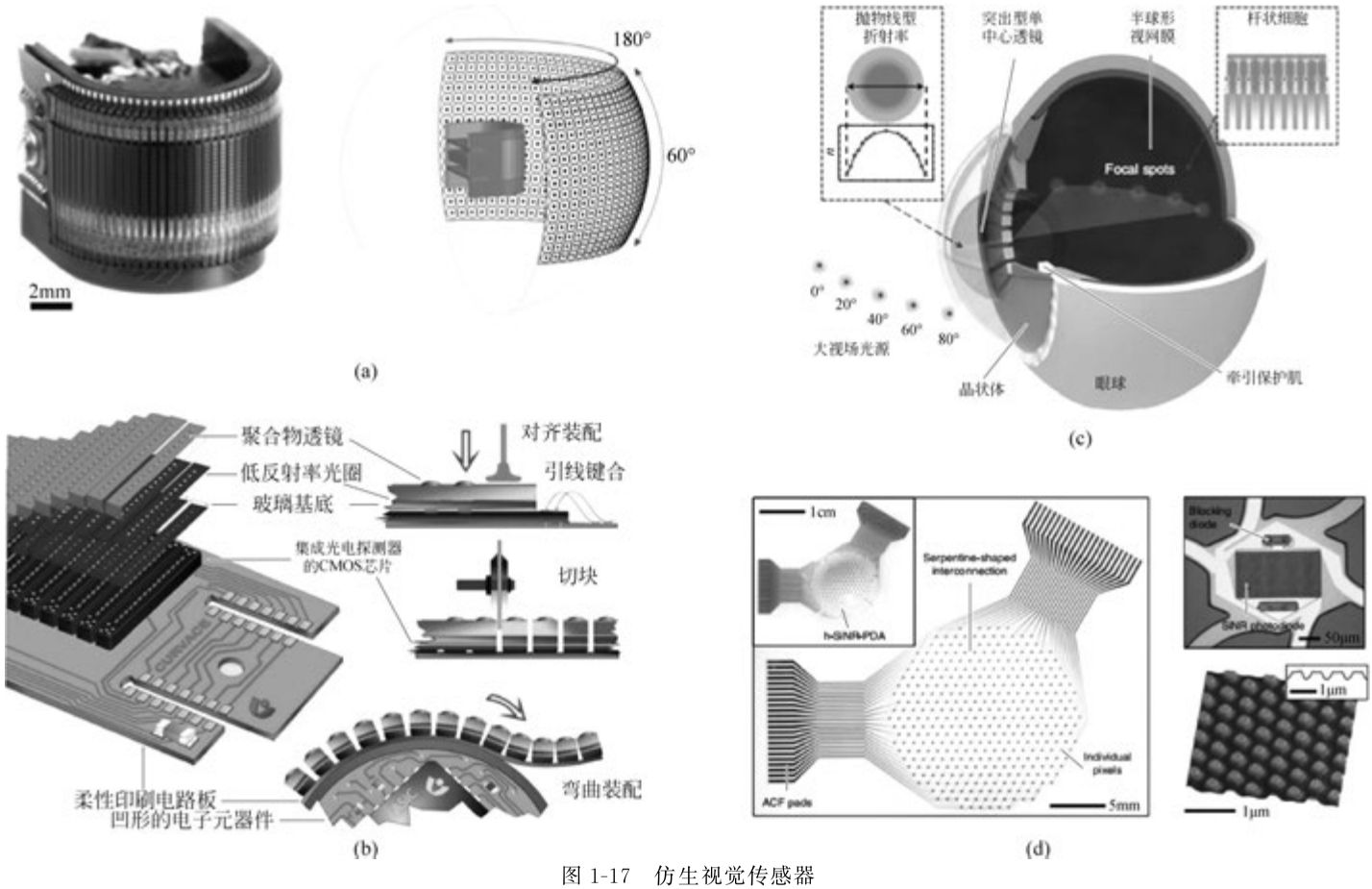


图 1-17　仿生视觉传感器

(a),(b)曲面 CMOS 复眼相机[146]；(c),(d)微型鱼眼相机[145]

的机械柔性[150]。此外，过渡金属氧化物如 MoO_3、WO_3 等具有相变特性（$Mo^{5+} \leftrightarrow Mo^{6+}$，$W^{5+} \leftrightarrow W^{6+}$），从而通过光致氧化/还原作用能够实现突触功能的模拟。此外，具有正负光响应的二维晶体管和光电二极管可以模拟双极细胞的兴奋/抑制特性，从而实现生物感受野的仿生重建[124]。此外，通过器件物理与机制研究可获取包含空间、时间、光谱、偏振、相位等多维视觉信息，这对开发具有多维度信息感知融合功能的类脑视觉芯片具有重要意义[151]。

除仿生视觉外，光电传感系统还可以应用于气体探测，化学物质检测，模拟嗅觉、味觉等生物感知[87,152]。化学物质的光电检测方式主要有：①通过不同物质的红外吸收谱检测化学物质；②采用化学薄膜，当与特定化学物质接触时表面发出荧光，通过荧光信号读取以实现对该化学物质的检测[56]；③采用 LED 光源激发光敏染料发光，通过与 CO_2、O_2、NO_x 等气体分子的碰撞作用，受激荧光的强度与寿命将发生变化（淬灭），从而通过量化此变化过程来标定所检测的气体浓度[152]。此外，研究还发现采用光电调制作用能够激发材料的化学物质探测活性[87]。例如，过渡金属-氧化物-半导体、黑磷等二维材料的场效应晶体管的电导率能够被栅压和光照协同调控，从而对湿度（H_2O）以及 NO_2、NH_3、Hg^{2+}、DNA、RNA 等化学物质具有较高的检测灵敏度，并且由于二维材料的本征柔性，在仿生感知领域具有潜力。

1.3.3 人机交互界面

以 2006 年深度学习模型的提出为标志[153]，人工智能迎来第三次高速成长，进入了人工智能高速发展的新阶段[154]。通过人机交互和协同，使人工智能成为人类智能的自然延伸和拓展，实现对复杂问题的高效处理，在人工智能 3.0 时代具有科学意义和产业化前景。其中，相较于传统硬质电路与器件系统，具有高度适应性的柔性可穿戴光电传感技术在以人为重要组成的人机交互系统中具有重要的意义[155]。

眼动追踪与眼机交互是可穿戴光电传感器的重要应用之一。在多种眼球追踪技术中，基于摄像头的红外视频眼动仪（VOG）目前应用最为广泛，其能以非侵入方式提供最完整、精确的细节信息。硬件设备包括头戴式显示器（HMD）和智能眼镜，随着先进 CMOS 图像传感器（CIS）技术的成熟，其正向更具沉浸感的交互和更小型化方向发展。然而，挑战之一在于如何将图像传感器无缝集成到镜片中而不遮挡正常视野——这将省去大多数商用产品需在镜框上加装额外仪器的需求。此外，斜视角观测会因图像质量下降而限制凝视精度，需依赖多摄像头配置和复杂深度学习算法，这不可避免地增加了系统复杂度与功耗。因此，透明图像传感器成为关键需求，它可通过镜片集成提供眼球运动的完整正面视角，从而消除复杂光学元件，最终降低整体设备的体积与功耗。

为实现这一目标，透明电极与感光材料的研究持续推进。Mercier 等报道了一种半透明图像传感器，其通过图案化石墨烯/PbS 量子点像素与 ITO 十字交叉读出结构制成[156]。该器件透明度达 85%～95%，基于二维/零维混合结构的光门控效应实现高灵敏度，其 8×8 光电二极管阵列初步模拟了眼动追踪功能。但需指出，其像素密度与帧率仍受限，需专用读出电路与系统支持。事实上，低维半导体已展现出与商用读出集成电路（ROIC）技术（如 CMOS 和透明薄膜晶体管）的优异兼容性[73,157-159]，后者可实现高透明度。例如，低温工艺的石墨烯与 PbS 量子点已展现出与 CMOS 芯片的兼容性，推动低成本短波红外技术发展。此后，二维材料与 CQD 在合成及器件物理学方面的进展，进一步促进中长波红外[159]、环保材料（如 Ag_2Te、InSb 等）[72-73]、可集成透明焦平面阵列（FPA）[156]等技术的突破，为新一代人机交互应用图像传感器提供可行方案。

基于图像传感器的眼动追踪设备的进一步发展需要优化外形设计与融合功能。例如，柔性或曲面图像传感器不仅能更好地适配可穿戴设备的共形/不规则表面，还因仿生几何结构而具备更宽视场和更低光学畸变[1]。这些特性有助于简化光学系统并提升性能，从而优化 $SWaP^3$（尺寸、重量、功耗、性能与成本）特性。业界如 CURVE 公司与索尼等公司已推出原型产品，在系统层级实现质量、体积与光学复杂度的降低。近年来研究前沿快速发展，人工复眼与多腔眼结构已实现全景视觉、水下视觉、望远视觉及伪装破解视觉等卓越性能。随着后文讨论的科学技术问题逐步解决，新型器件外形设计将为眼动追踪领域带来持续创新，这仍是一个开放的研究方向。

身份验证是人机交互的重要应用之一。指纹是重要的生物信息，由于其个体的独特性，被广泛用于身份信息验证。光电成像是指纹识别的核心，通常是利用指纹中隆起与凹陷条纹对光的反射或折射所引起的光强变化，实现指纹图样的扫描和信息识别[129]。柔性图像传感器件能够更好地匹配手指轮廓，从而获得更大的有效面积，具有更快的识别速度和精度。根据国际标准化组织与国际电工委员会标准 ISO/IEC 19794-4:2011，指纹识别所需要的最低分辨率为 500dpi[160]，Banach 等结合有机晶体管和光电探测器，制备了总厚度 300μm、满足分辨率需求的图像传感器，成功实现了对指纹的扫描成像功能[161]。类似地，Akkerman 等制备了基于 IGZO 薄膜晶体管的大面积掌纹扫描仪[162]。除指纹外，静脉也可用作身份验证，因其深埋表皮之下，与指纹信息相比更难以伪造，并且不易破损。由于近红外光对人体组织具有较好的穿透性，易与静脉中的脱氧血红蛋白相互作用，因此静脉信息能够通过近红外光的反射或透射采集。并且，静脉纹路相比指纹的形状特征更加明显，对传感器的分辨率要求相对较低。Someya 等集成有机光电二极管与多晶硅晶体管，报道了总厚度 15μm、分辨率 508 dpi 的柔性图像传感器，通过与皮肤的紧密贴合而实现可媲美 CMOS 的静脉扫描成像[163]。

可穿戴光电传感系统可以通过对光信号的解读，实现对机器设备的控制。Shen 等基于 Te@TeSe 纳米线阵列设计了可编织柔性光电传感器，通过对近红外光信号编码信息的解读，能够实现对机械手的远程控制[164]。基于透明有机光电二极管阵列（透光率高达 70%）的非接触用户界面已实现矩阵级（16×16 阵列中每个含 14×14 子像素）红外笔光与手势控制人机交互[138]。近期，钙钛矿因多光照条件下的高灵敏度，其 6×5 小型阵列可实现 5°识别角度、99%准确率的眼动追踪，实现对小车的运动控制。柔性图像传感器还可以直接进行动作捕捉，对特定手势等物理信号进行图像捕获-特征提取-数据库比对，实现信息获取，从而向机器传递相应的动作指令。Abowd 等对有机光电二极管阵列的空间分布进行调节，通过优化算法，实现了柔性光电传感系统对形状、位置、方向、速度等动态信息的识别[165]。柔性传感器还能够基于光在传输过程中与人体组织的相互作用（吸收、散射等），通过分析接收端调制光信号的变化，提取动作信息，实现人机交互。Samuel 等通过肌肉纤维在等距舒张和等距收缩时光散射所导致的各向异性传输，通过集成 LED 与光电探测器的可穿戴传感系统分析识别肌肉运动，从而实现机器人手臂对人类动作的模拟[166]。光纤传感器可通过光传输模式的变化精确感知外界物理信息的微弱变化。Bai 等基于分布式光纤内反射传感原理，开发了一种包含连续或离散彩色图案的光导传感器，通过对拉伸与压缩应变的检测，可实现手套式的多位置与多形变解耦，实现基于可穿戴光电传感器的力学感知[50]。此外，视触觉技术基于图像传感与机器学习结合，采用视觉表征触觉的方式提高了触觉信息的质量，并且有利于多模态功能的开发融合，在机器人灵巧手开发中具有重要的应用（图 1-18）[167]。

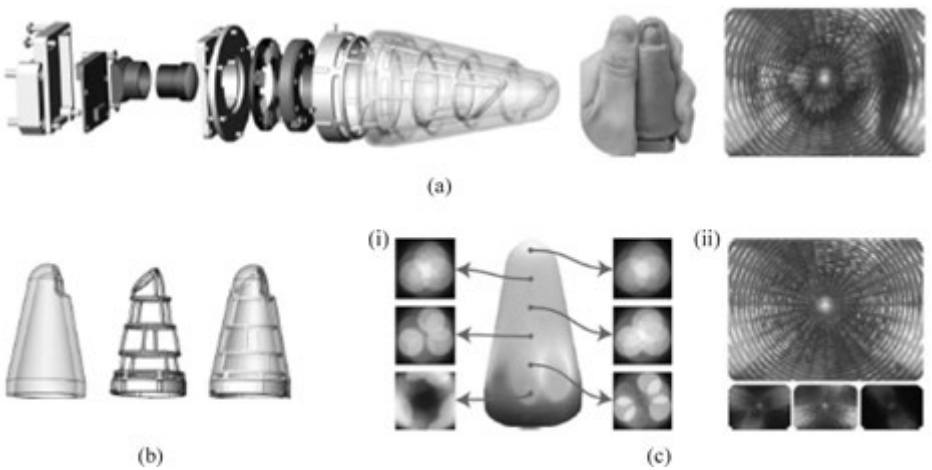


图 1-18　基于视觉的拇指型全方位力学感知传感器[167]

（a）总体结构设计；（b）传感器模具设计；（c）内部的灯光设计以及内部摄像机拍摄效果图；（d）工作原理及数据处理流程图

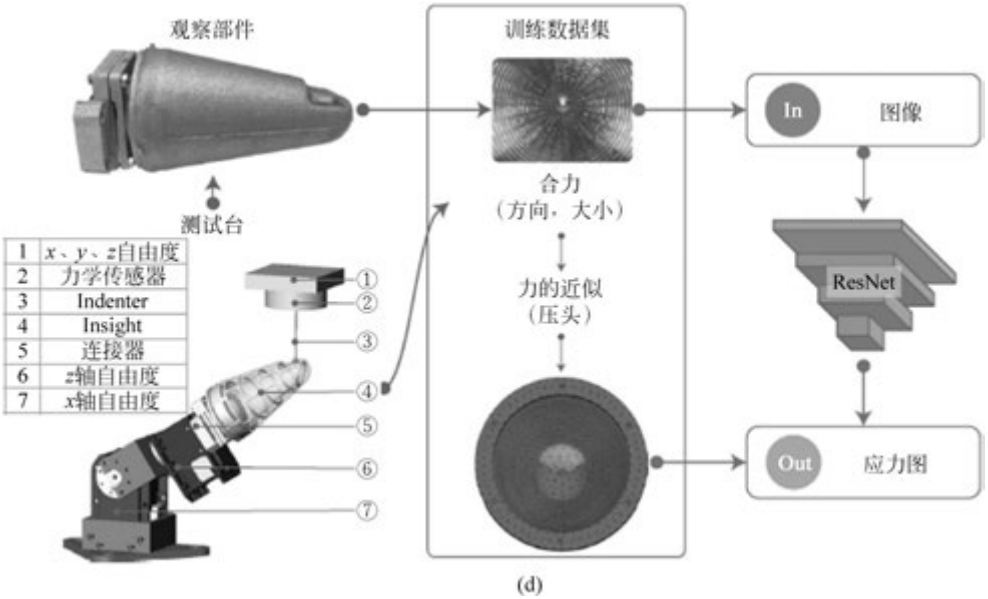


图 1-18　（续）

然而，光能够远距离传输是建立在不被吸收、散射的前提下，这也使得其应用对调制光的穿透性、抗干扰能力具有较高的要求，对于光穿透较差的环境，如医疗机器人的体内控制则具有较高难度[146]。因此，未来人与机器的通信与控制将是集合磁、光、电、力等多种方式的协同互补。

1.3.4　视网膜假体

视网膜假体是对于视力恢复治疗的一种重要的植入式手段。大部分视力退化致盲的原因是视网膜图像接收功能的损坏，但通常用于图像处理的神经功能还正常。这为开发视觉假体提供了强有力的理论依据：通过电刺激视网膜内核神经元，替代退化视锥细胞和视杆细胞的光感功能[168]。此类设备通过电激活视网膜神经元而产生被称为“光幻视”的视觉感知。目前已有三种视网膜植入物实现了商业化或获准临床测试：Argus Ⅱ（美国）、Alpha AMS（德国）和 PRIMA（法国）[169]。尽管这代表重大技术进步，但其视觉敏锐度仍受限（如 Argus Ⅱ为 0.9%，Alpha AMS 为 3.7%，PRIMA 为 4%），导致临床应用率低下。因此，Argus Ⅱ与 Alpha AMS 均于 2019 年停产。当前研究重点转向开发新型材料与装置，以创建侵入性更低、疗效更优的植入方法，提升视觉修复效果[170-171]。对于需摘除眼球的终末期眼疾患者，人工眼球的探索不仅旨在恢复外观，更可能提供功能性或增强视觉[1]。虽然这

些目标仍具挑战性且多处于实验阶段，但近年来科研与工业界已取得显著进展。光电二极管的光伏效应能够将光信号直接转变为电刺激，无需外加电源，能够以人工手段有效地补偿视细胞的感光功能，刺激正常神经细胞完成信息传递与识别。针对人工视觉对于高分辨率的需要，Loudin 等制备了硅光电二极管阵列的人工视网膜假体(图 1-19)，其中每个像素包含三个二极管，像素尺寸 70μm，能够提供 1.5V 的光电压，并将现实图像以近红外光脉冲投影至视网膜假体像素，以增强光电响应实现对正常视神经细胞的有效刺激；为更好地贴合生物体曲面，通过减薄像素连接区域，形成厚度约 0.5μm 的弹簧形态，从而实现一定程度的机械柔性[172]。相比而言，有机材料具有更好的柔性与生物兼容性，Benfenati 等发现，将有机光电半导体(如 P3HT)与退化的视神经细胞接触，能够有效地激活神经细胞对光刺激进行响应[173]。因此，Benfenati 等将负载 P3HT 薄膜的丝质柔性基底作为假体植入小鼠视网膜下区域后，原本视网膜受损的小鼠视力能够恢复，持续时间为 6～10 个月，并且具有良好的生物兼容性，展现出临床应用潜力[174]。然而，有机材料的稳定性与毒理性仍然饱受争议。因而可靠的封装至关重要。研究人员开发了一种可折叠、广视野的光伏视网膜假体(命名为 Polyretina)[171]，其结构包括：PDMS-光伏接口，采用 P3HT:PCBM 混合有机光伏(OPV)配置，集成 2215 个刺激像素点，并由另一层 PDMS 封装，生物相容性钛作为暴露电极；这种柔性可折叠设计使其能通过微小巩膜切口植入，并在释放至目标位置后自动展开，从而实现广视野(46.3°)、大面积的视网膜神经节细胞刺激。后续，像素数量增至 10498 个，通过离体实验验证，其刺激空间分辨率显著提高，等效像素间距约 120μm[175]。

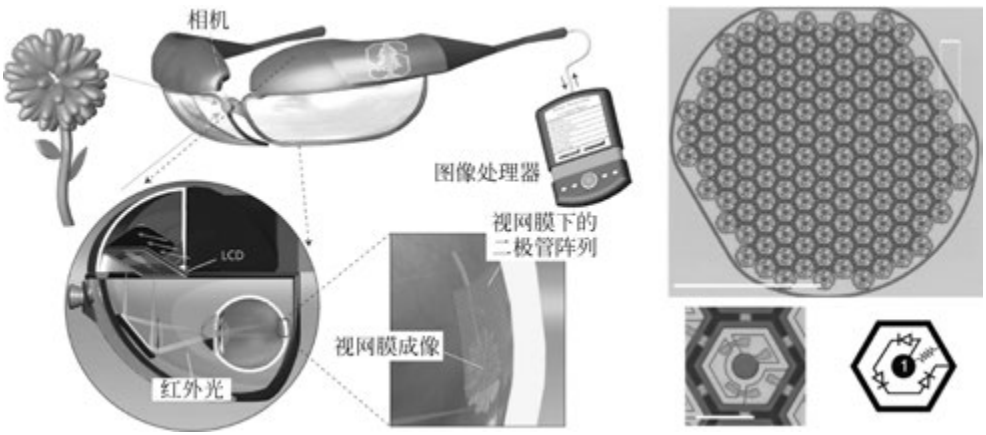


图 1-19　光伏视网膜假体器件与系统[172]

1.3.5　智慧医疗与健康监测

光电探测是一种高灵敏度、非侵入式的检测技术，在医疗健康领域尤为重要。柔性光电传感技术是发展可穿戴医疗与健康监测，实现智慧医疗的重要手段[176]。将光电传感器小型化、柔性化设计后能够与皮肤紧致贴合，能够实现表皮式生理指标监测。与电传感相比，光信号具有高分辨率、较强的组织穿透性、远距信号传输的特性。光电容积描记(photoplethysmography，PPG)技术，是利用光电探测手段在活体组织中监测血液容积变化的一种无创监测方法(图 1-20(a))：当一定波长的光束照射到指端皮肤表面，每次心跳时，动脉血管的收缩和扩张都会影响光的透射或反射，从而导致检测到的光信号发生相应变化，而肌肉、骨骼、静脉等在没有大幅运动的状态下光吸收基本保持不变，从而通过提取交流(AC)信号实现心率检测(呼吸率检测同理)；血氧饱和度(SpO_2)检测则利用氧合血红细胞和脱氧血红细胞对 660nm 红光与 940nm 近红外光具有最大的消光系数差，根据朗伯-比尔定律[177]中消光比与物质浓度的线性关系，通过两种光源下探测的交流与直流电信号的比值能够计算血氧饱和度。

作为 PPG 技术中的核心，现阶段商用设备主要采用晶体硅光电二极管实现健康信号监测。而其微米量级的晶片厚度以及块体三维材料不可弯折的特性，使得整体设备与人体皮肤的兼容性较差，进而影响检测结果的准确性与设备佩戴的舒适度，无法满足新一代智能穿戴设备对高度集成化、微型化、柔性化的需求。近年来有机光电子技术的快速发展，为实现本征柔性化、生物体兼容的可穿戴传感技术提供了重要选项。Yokota 等将有机光电探测器(OPD)与聚合物发光二极管(PLED)结合，实现了集心率、血氧等健康体征检测和显示于一体、与皮肤贴合的柔性光电皮肤系统(OE-skin)(图 1-20(a))，整体厚度仅为 3μm，能够实现 100μm 的弯曲半径，与预拉伸的弹性基底集成后能够承受至少 60%的反复压应变[178,181]。针对有机半导体材料稳定性较差、光谱范围较窄的问题，Koppens 等报道了基于石墨烯/量子点复合柔性光电探测器(图 1-20(b))，利用其强光栅(photo-gating)效应、高灵敏度和探测率等特性，实现了对心率、血氧、呼吸等健康指标及紫外光强度的低功耗、高精度的可穿戴监测功能[49]。但 PbS 材料的毒性问题仍有待进一步解决。此外，环境干扰及运动伪影是 PPG 技术中另一个重要问题。随着人工智能技术的发展，通过结合深度学习，能够实现高质量的健康信号的提取与临床疾病诊断。例如，Yeo 等制备柔性 PPG 胸贴，结合机器学习实现对睡眠呼吸障碍的可靠诊断(对呼吸暂停 100%的灵敏度，呼吸过浅 95%的精确性)[182]。与 PPG 类似，功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy，fNIRS)利用血液的主要成分对 600～900nm 近红外光有较强的散射性，从而获得大脑活动时氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化情况，对神经疾病、心理疾病的诊断与治疗具有重要意义[183-184]。

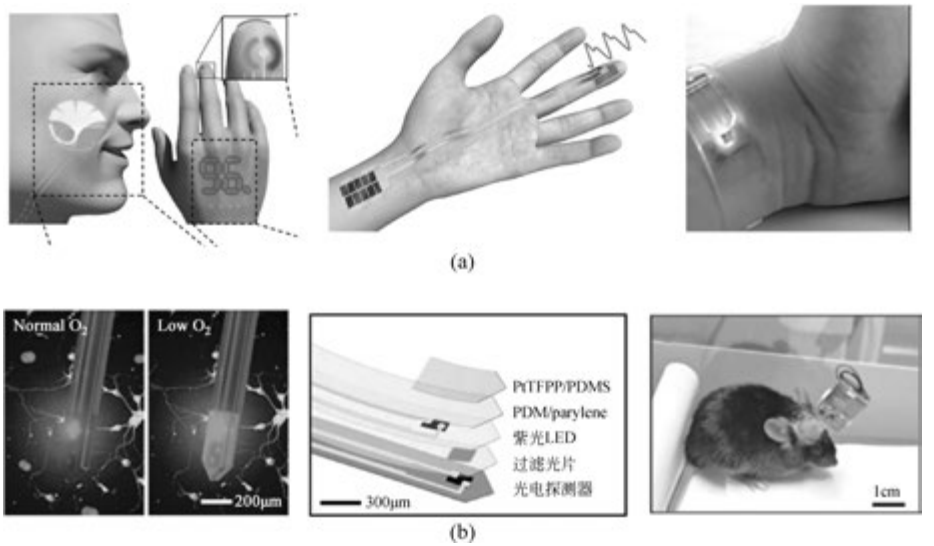


图 1-20 (a)基于 PPG 的可穿戴血氧仪[49,178-179]；(b)植入式光电传感系统[180]

然而由于生物组织的复杂性，光信号对人体的穿透具有局限性，例如可见与近红外信号的透过率仅为微米至毫米级。为实现生物体内对特定组织的深层传感应用，需要采用植入式光电传感系统。植入式光纤是另一种基于柔性光电传感的重要生物医疗手段，主要用于对深层大脑进行光刺激并进行活体荧光检测。光与神经接口通常由常规氧化硅玻璃光纤，以及其他柔性、可拉伸，甚至可生物降解的光波导实现[176]。然而传统的植入式光纤传感器通常需要耦合外部光源和电路来完成供电、通信和传感，不可避免地增加了导线连接和系统尺寸。近期，集成电极与微腔的多功能纤维结构能够同步实现光刺激、电生理信号传感、药物递送等功能，在植入式光电传感领域受到关注[185]。Bruchas 等设计了细胞尺度的植入式微型光电传感系统，将 InGaN 蓝光 LED(尺寸约为 50μm×50μm×5μm)、微型电极、硅光探测器、温度传感器全部集成在柔性树脂微针头上，能够植入并释放至实验小鼠大脑深层，通过无线射频驱动实现对带有光敏感通道蛋白(channelrhodopsin-2，ChR2)神经元的活体光遗传刺激和行为控制[186]。此超薄、柔性、生物体兼容的传感系统能够极大地减少对活体软组织的损伤。Rogers 等进一步将微型 LED 与微流腔集成，结合光遗传学与药理学，实现了闭环反馈式同步神经刺激与微流给药柔性系统[187]。此外，植入式柔性光电传感器集成微型 LED 与 CMOS 图像传感器后，还可以用作颅内荧光检测与成像，从而对大脑活动与神经行为进行观测和研究[188]。Cai 等通过设计制备微型薄膜式 LED 和光电探测器，结合氧气敏感的磷光涂层，实现高度集成的微型植入式光电探针，利用氧气对铂系金属配合物的磷光淬灭作用而实现氧分压检测。此外，该研究团队开发了微型柔性电路用于无线能量与信号传

输，配合氧分压检测探针，实现全植入式的光电氧分压传感系统（图 1-20(b)）[180]。

1.3.6　面向边缘智能传感的架构设计与功耗优化

基于边缘计算的智能感知系统设计，对未来可穿戴电子领域的发展至关重要。相较于传统云计算或异地处理架构，边缘智能允许在实际创建数据的位置附近进行直接数据处理与计算，这种本地化处理允许设备在极短时间内作出响应，具有更好的响应能力、更高的带宽效率、更高的数据隐私，以及在连接有限或间歇性情况下提高可靠性等。面向 AR/VR、微型机器人、具身智能等下一代关键应用的穿戴式、便携式光电传感器，是边缘计算的典型代表。传统的 CMOS 图像传感器-数字处理器的计算机视觉架构能够处理复杂视觉任务，具有高分辨率与通用性。然而，其大量的模数转换（ADC）以及基于数字电路的算法执行，带来巨大的运算和存储压力，其高能耗难以满足采用电池供电的下一代边缘智能设备的长待机、轻量化需求[189]。例如，Choi 等报道称，对于传统四分之一视频图形阵列（quarter-video graphics array，QVGA）图像传感器，对其原始图像处理及 ADC 的功耗占比高达 96%，而像素电路占比仅不到 4%[190]。

为满足边缘智能传感领域对尺寸、质量、功耗（SWaP）同步优化的迫切需求，前文提到的类脑光电传感与视觉器件，基于新型器件物理机制与电路设计，实现了在传感器内部集成光学感知与模拟运算，从而极大地减少了数据冗余与功耗需求。如图 1-15 所示，可重构光电探测阵列将响应度作为权重，可直接在成像过程中实现卷积运算，在传感器内部过滤有效数据并送至后端处理器。因此，将部分数字运算迁移至模拟域以减少数据传输与 ADC 所带来的巨大功耗，能够在架构设计方面优化整体系统功耗。如图 1-21(a)，(b)所示，Ma 等系统性地对比了不同传感器与处理器节点及架构，对应不同任务的传感器内与传感器外运算的功耗[128]。他们得出结论，只有当传感器的节点与 SoC 节点相差不大，且应用是通信占主导时，传感器内运算才具有功耗优势。而眼动追踪等运算密集型复杂算法（Ed-Gaze）的特征图尺寸过大，导致在模拟域执行的操作数量过多而超过通信功耗，无法发挥传感器内运算的优势。因此，采用模拟数字混合架构，适量迁移数字部分进模拟域，有利于优化整体系统在边缘处理复杂任务的能效问题。

此外，Xu 等提出了一种面向常开型（always on）的多级处理的边缘智能视觉架构 Senputing[189]，将直接进行光电流运算的传感器内处理模块与传统传感器模块融合（图 1-21(c)，(d)）。在待机状态下，其计算模块直接将光电流进行 MAC 运算，直接将二值激活信息传输至 BNN 传感器进行低功耗粗略分类。系统一旦判定到感兴趣的对象（ROI），即唤醒普通的传感模式进行高精度 CNN 运算。该感知与计算深度融合架构旨在突破传统单一模式的能耗与功能局限，为可穿戴机器视觉等关键边缘应用提供有效策略支持。

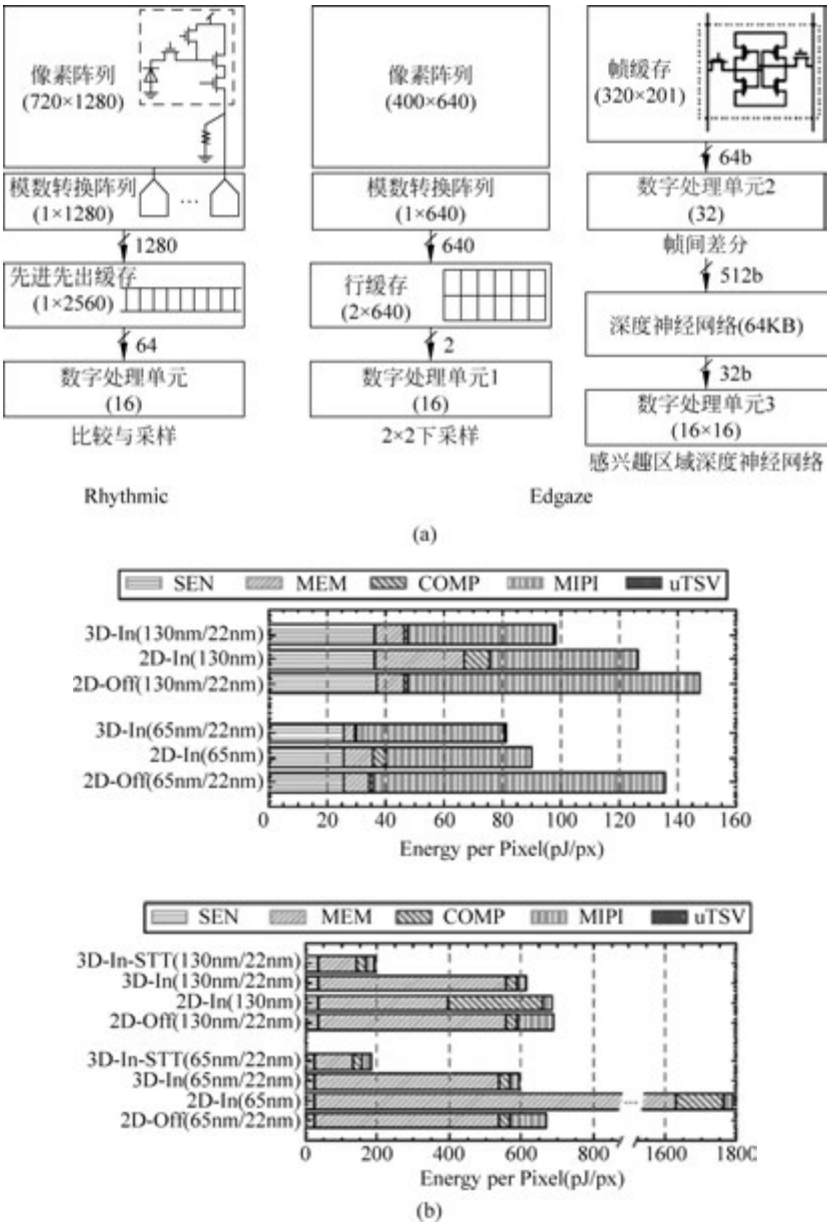
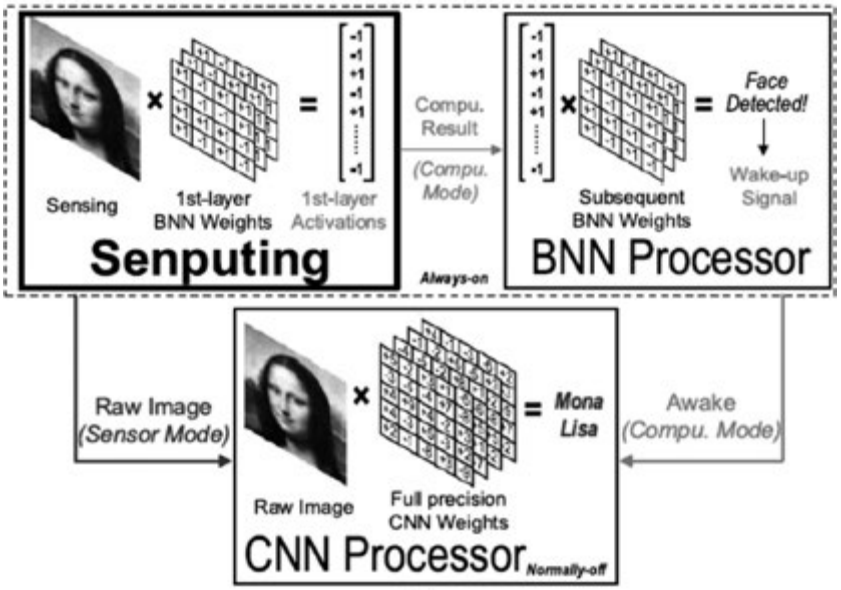
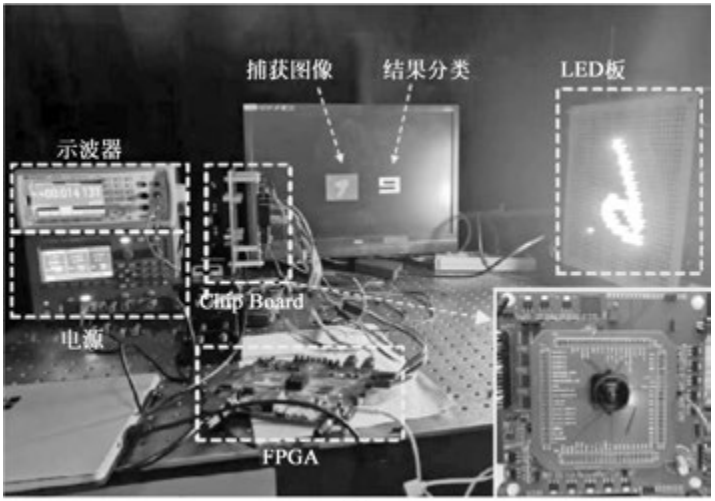


图 1-21 可穿戴边缘智能系统的功耗优化设计[128,189]

(a) Rhythmic 与 Edgaze 算法的硬件设计；(b) 对应的不同芯片架构(2D 和 3D)、传感器节点(130nm 与 65nm)、传感器内(-in)和传感器外(-off)架构的各部分对应功耗，SEN 为所有 ADC 相关组件功耗，MEM 为存储器部分，COMP 为计算功耗，MIPI 为 MIPI CSI-2 通信，uTSV 为 uTSV 层间通信功耗；(c) 传感计算融合多级处理器架构；(d) 传感与计算模式在多级处理器架构中轮流激活的展示



(c)



(d)

图 1-21　（续）

综上，柔性光电子领域的快速发展带动了智能感知、仿生、人机交互、医疗健康等应用领域的前沿研究，并取得了突破。然而，柔性光电传感系统在上述领域中的实际应用与产业化还存在着诸多挑战：①系统中所有分立元件的柔性化离实现还有一定距离，如可媲美 CCD 或 CMOS 的柔性逻辑电路，高能量密度柔性电源等；

②元件之间的集成，包括光、电、力学性质的兼容性仍然有待提高；③柔性系统的性能、可靠性与现有刚性系统之间还存在不小的差距。因此，在柔性材料、器件、系统三个层面上的进一步探索，物理、化学、光电、力学、生物、计算机等多学科的交叉融合，将是接下来应对上述挑战的关键。

1.4 总结语

柔性电子研究前沿与产业的快速崛起，对后摩尔时代人类社会信息化、智能化发展具有重要意义。作为柔性电子技术的关键分支，柔性光电传感系统以光电探测材料与器件为核心，在智能感知、人机交互、生物医疗等领域的前沿研究中取得了突破性进展，展现出巨大的应用潜力。本征柔性是实现可弯曲、可拉伸器件的重要前提，其中有机半导体的软物质特性、低维半导体的小尺寸效应为新一代本征柔性电子器件的实现提供了重要选材依据。采用中性平面、力学屈曲、岛桥结构，能够最大限度地发挥材料本征柔性，是实现高度可弯曲、可拉伸器件与系统的重要保证。光电探测器作为柔性传感系统的核心，其综合性能的提升，源于增益带宽积与机械柔性的最大化兼容，本质在于材料光、电、力学性能在光电导探测器、光电二极管、光电晶体管等器件结构中的协同优化。有机光电半导体、量子点、纳米线、二维材料、钙钛矿等新型材料兼具优异的光电性能与机械柔性，纤维与可编织结构为柔性光电器件提供了新的设计方案，在可穿戴传感领域极具潜力。以光电探测器为核心，集成发光、逻辑控制、信号处理单元，进一步对系统进行微型化、柔性化设计，在成像、视觉、控制、生物、医疗等领域展现出优于传统刚性系统的新特性与新应用前景。

尽管目前柔性光电子技术在显示领域已经取得了较大突破，大面积曲面显示器、折叠屏已经在消费电子领域实现产业化，但系统的逻辑单元、信号处理单元仍然采用刚性半导体工艺，大面积柔性化也多基于分立模块与岛桥结构。因此，实现系统中各组成元件包括电源、光源、传感器、控制与信号处理电路的本征柔性化与高效集成，是柔性光电传感技术发展的终极目标。为解决现阶段分立元件各自光、电、力学性能的平衡与系统的兼容性等问题，一方面，从材料出发，拓展新材料体系，充分挖掘新物理化学特性；另一方面，从器件与系统出发，进行结构优化设计，改进新工艺，多学科交叉，以实际需求为导向，逐步发展可产业化的新型传感技术。

柔性光电传感技术具有非侵入、高分辨、高灵敏度等特点，与现有压电、热电、磁电等传感技术结合互补，将推动柔性传感在未来柔性电子市场中占据重要

地位。同时，借鉴现有成熟半导体工艺的先进性方案，解决现有刚性电子器件在便携式、可穿戴式、植入式应用场景中的局限性，刚柔并济，推动实现智能社会的万物互联。

参考文献

[1] Gu L, Poddar S, Lin Y, et al. A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina[J]. Nature, 2020, 581(7808): 278-282.

[2] Zhong D, Wu C, Jiang Y, et al. High-speed and large-scale intrinsically stretchable integrated circuits[J]. Nature, 2024, 627(8003): 313-320.

[3] Luo Y, Abidian M R, Ahn J-H, et al. Technology roadmap for flexible sensors[J]. ACS Nano, 2023, 17(6): 5211-5295.

[4] Wong H. On the CMOS device downsizing, more Moore, more than Moore, and more-than-Moore for more Moore[C]//2021 IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL), 2021: 9-15.

[5] Lefebvre M, Moreau L, Dekimpe R, et al. 7. 7 A 0. 2-to-3. 6TOPS/W programmable convolutional imager SoC with in-sensor current-domain ternary-weighted MAC operations for feature extraction and region-of-interest detection[C]//2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2021: 118-120.

[6] Arya S, Pumera M. Flexible electronics for forest and veterinary health monitoring[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2026, 3: 341-356.

[7] Wang Z, Shen G. Flexible optoelectronic sensors: status and prospects[J]. Materials Chemistry Frontiers, 2023, 7(8): 1496-1519.

[8] Hanson A P. Improvements in or connected with electric cables and the jointing of the same [P]. 1903: 190304681.

[9] Crabb R L, Treble F C. Thin silicon solar cells for large flexible arrays[J]. Nature, 1967, 213(5082): 1223-1224.

[10] Brody T P. The birth and early childhood of active matrix: a personal memoir[J]. Journal of the Society for Information Display, 1996, 4(3): 113-127.

[11] Peng J, Snyder G J. A figure of merit for flexibility[J]. Science, 2019, 366(6466): 690-691.

[12] Li H, Ma Y, Huang Y. Material innovation and mechanics design for substrates and encapsulation of flexible electronics: a review[J]. Materials Horizons, 2021, 8(2): 383-400.

[13] Qiu T, Akinoglu E M, Luo B, et al. Nanosphere lithography: a versatile approach to develop transparent conductive films for optoelectronic applications[J]. Advanced Materials, 2022, 34(19): 2103842.

[14] Li W, Zhang H, Shi S, et al. Recent progress in silver nanowire networks for flexible organic electronics[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(14): 4636-4674.

[15] Li D, Lai W-Y, Zhang Y-Z, et al. Printable transparent conductive films for flexible electronics[J]. Advanced Materials, 2018, 30(10): 1704738.

[16] Wang C, Xia K, Wang H, et al. Advanced carbon for flexible and wearable electronics[J]. Advanced Materials, 2019, 31(9): 1801072.

[17] Fan X, Nie W, Tsai H, et al. PEDOT : PSS for flexible and stretchable electronics: modifications, strategies, and applications[J]. Advanced Science, 2019, 6(19): 1900813.

[18] Xu S, Zhang Y, Cho J, et al. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1543.

[19] Zhu Y, Deng Y, Yi P, et al. Flexible transparent electrodes based on silver nanowires: material synthesis, fabrication, performance, and applications [J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(10): 1900413.

[20] Khang D-Y, Jiang H, Huang Y, et al. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates[J]. Science, 2006, 311(5758): 208-212.

[21] Ko H C, Stoykovich M P, Song J, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics[J]. Nature, 2008, 454(7205): 748-753.

[22] Flexible electronics: from materials to devices[J]. MRS Bulletin, 2016, 41(10): 818-819.

[23] Nathan A, Ahnood A, Cole M T, et al. Flexible electronics: the next ubiquitous platform [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1486-1517.

[24] Konstantatos G, Howard I, Fischer A, et al. Ultrasensitive solution-cast quantum dot photodetectors[J]. Nature, 2006, 442(7099): 180-183.

[25] Du J, Yu H, Liu B, et al. Strain engineering in 2D material-based flexible optoelectronics [J]. Small Methods, 2021, 5(1): 2000919.

[26] Lim K-G, Han T-H, Lee T-W. Engineering electrodes and metal halide perovskite materials for flexible/stretchable perovskite solar cells and light-emitting diodes [J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(4): 2009-2035.

[27] Zhou J, Huang J. Photodetectors based on organic-inorganic hybrid lead halide perovskites [J]. Advanced Science, 2018, 5(1): 1700256.

[28] Geim A K, Grigorieva I V. Van der Waals heterostructures[J]. Nature, 2013, 499(7459): 419-425.

[29] Deng T, Zhang Z, Liu Y, et al. Three-dimensional graphene field-effect transistors as high-performance photodetectors[J]. Nano Letters, 2019, 19(3): 1494-1503.

[30] Suo Z, Ma E Y, Gleskova H, et al. Mechanics of rollable and foldable film-on-foil electronics[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(8): 1177-1179.

[31] Gleskova H, Cheng I C, Wagner S, et al. Mechanical theory of the film-on-substrate-foil structure: curvature and overlay alignment in amorphous silicon thin-film devices fabricated on free-standing foil substrates[M]//Wong W S, Salleo A. Flexible electronics: materials and applications. Boston: Springer US, 2009: 29-51.

[32] Hsueh C-H. Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(12): 9652-9656.

[33] Hu J, Li L, Lin H, et al. Flexible integrated photonics: where materials, mechanics and