

学术
文库

国家重点研发计划、国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金等项目成果

穿戴式与便携式 生化传感检测技术

刘清君 陈星 主编



世界图书出版公司

学术
文库

国家重点研发计划、国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金等项目成果

穿戴式与便携式 生化传感检测技术

刘清君 陈星 主编



世界图书出版公司

图书在版编目(CIP)数据

穿戴式与便携式生化传感检测技术/刘清君,陈星
主编. —西安:世界图书出版西安有限公司, 2018.5 (2019.4 重印)
(学术文库)
ISBN 978 - 7 - 5192 - 4627 - 3

I. ①穿… II. ①刘… ②陈… III. ①生物传感器 -
检测 IV. ①TP212.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 103318 号

书 名	穿戴式与便携式生化传感检测技术 Chuandaishi Yu Bianxieshi Shenghua Chuangan Jiance Jishu
主 编	刘清君 陈 星
责任编辑	李江彬
出版发行	世界图书出版西安有限公司
地 址	西安市北大街 85 号
邮 编	710003
电 话	029 - 87233647(市场营销部) 029 - 87235105(总编室)
传 真	029 - 87279675
经 销	全国各地新华书店
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
开 本	787mm × 1092mm 1/16
印 张	19.5
字 数	350 千字
版 次	2018 年 5 月第 1 版
印 次	2019 年 4 月第 3 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5192 - 4627 - 3
定 价	45.00 元

☆如有印装错误,请寄回本公司更换☆

编写人员

主 编：刘清君 陈 星

副 主 编：（按姓氏汉语拼音排序）

郭 义 姜 璟 王立强 汪小知 张冯江

参 编 人 员：（按姓氏汉语拼音排序）

陈泽涛 程丁儒 董 浩 房钰鑫 郭 扬

纪岱宗 李梦露 李楠涛 李 爽 林丽泉

刘 磊 卢妍利 吴娟利 徐天白 许 刚

张 倩 赵天易



序言

穿戴式与便携式传感检测技术，可以说是近年来发展最为迅速的现代高新技术之一。我们甚至姑且不需要给该类技术一个非常明晰与规范的概念或定义，因为它们已经完全地，甚至可以说是惊艳地，进入了几乎我们每个人的视野，并且开始影响到我们每个人的日常生活。其典型代表就是手机和手环的计步器。所以，对于穿戴式与便携式技术的关注，绝不会也不应，仅局限于我们传感技术相关的科研工作者。

我们可以将穿戴式与便携式技术简单的理解为，可“穿”、可“戴”，乃至可“带”。也就是说，除了可穿戴之外，亦可包括便于携带。但不管是可穿戴，还是可携带，它们都有一个能够极大地利于用户随时随地获得检测数据的便利。这正是该技术的最大优势之所在。因而，也就容易与即时检测（point of care test, POCT）、移动医疗（mobile health, mHealth），乃至大数据（big data）等热门领域建立联系，并成为其信息获取的主要途径。尤其是，随着治未病、整体观等医学体系的逐步建立，个性化医疗（personalized medicine）的目的便在于获得足够可用的个人健康信息，从而能够为其量身制定出最佳的健康管理与疾病防治方案。所有这些，都无不体现着对于穿戴式与便携式技术需要进行深入研究的重要。

本书的编写缘由，最早便可追溯于从2016年开始，我们在我国“即时检测与健康监测物联网产业技术创新战略联盟”张先恩、王加义、康熙雄等老师的组织与带领下，集中了国内外一些主要的学术团体，对穿戴式与便携式技术及其在健康监测领域的应用所进行的多次研讨。通过这一系列卓有成效的研讨，让我们逐步梳理出了该技术的理论体系，但同时也让我们更清晰地明白了，该技术的发展，必须依靠于不同学科、不同领域专家学者之间的密切配合，联合攻关，才可能不至使其沦为“仅是一种时尚的玩意”，而真正达到医用的目的，造福于民。

所以，我们最早的计划，乃是按照“生理”与“生化”测试，这两大检测目标对其分类，并分别由各自具有研究优势的单位分头组织编写。最终决定，由中国科学院电子研究所“传感技术国家重点实验室”方震研究员负责生理检测部分的编写组

织工作，而由我们浙江大学“生物传感器国家专业实验室”负责生化检测部分的编写组织工作。在此框架之下，我们联合了浙江大学生物医学工程与仪器科学学院、信息与电子工程学学院、光电科学与工程学院、医学院等多个院系，以及美国伊利诺伊大学香槟分校（UIUC）、天津中医药大学等国内外知名专家学者，从不同侧面，结合自己的研究进展，完成了本书的编写工作。虽然，相对于运动、呼吸、血压、体温、脉搏、心率等生理信号的测试而言，各类生化指标在穿戴式与便携式技术方面的发展，尚主要还都处于研究阶段，但是，由于这类指标，包括血糖、乳酸、胆固醇、甘油三脂等重要代谢物在内的很多疾病标志物检测，尤其是即时检测，对于各类急慢性疾病的防治与管理而言，意义重大。

同时，随着技术的发展，我们已不难发现，穿戴式与便携式技术之间，其分界也已越来越模糊。这中间，主要获益于柔性电子技术和移动终端（如智能手机）等技术的快速发展。由于柔性电子器件的引入，使得穿戴式技术已陆续具有了接触式测量的表皮电路功能；而由于智能手机等便携式移动终端的广泛普及，尤其是其所能提供的完善的互联网服务，都已使得二者已经开始越来越紧密地结合。因此，甚至可以采用柔性器件进行传感检测，而同时采用智能手机对所测信号进行初步的分析与传输，最终构成一个个面向用户个体的全新的移动检测新平台。

本书的编排体例，正是对我们上述观点的内在体现。即在对柔性电子器件作为整体技术支撑进行介绍的基础上（第一章），跟踪国内外最新的代谢物传感检测方法（第二章），侧重于柔性接触式生化传感检测（第三章），对基于智能手机的光学和电化学检测系统分别进行了介绍（第四章、第五章），并以呼吸诊疗作为一个主要的应用示例（第六章），对穿戴式与便携式技术在医学领域的总体应用进行了分析与展望（第七章）。当然，虽说全书自成体系，但由于各个章节是由不同学科背景的不同研究团队所完成，其写作风格、侧重点等方面难免会存在一定的不一致性，进而在一定程度上会影响到本书内容整体的有机性。但是，好处却也正好在于，不同的章节，从不同的学科背景，为读者提供了一个各有特色与侧重的研究视角。也算是本书“失之东隅、收之桑榆”之处。在此需要提醒读者朋友们注意。同时，如前所述，本书的编写内容，偏重于生化检测，而对于生理检测部分的专门介绍，则有待于中国科学院电子研究所等单位另外即将编撰完成的专著。此外，对于电化学检测系统的内容，也可参考我们2017年6月在科学出版社出版发行的《基于手机的电化学生物传感技术》一书。只不过，有别于本书对技术介绍的偏重，该书则更加侧重于对研究进展的总体介绍，从手机电化学测试来说，内容当然也就更加系统和完整。总之，都可将其视为本书的姊妹篇，而加以参考阅读。

本书的参加编写人员及其所属单位如下：第一章：徐天白、程丁儒、李梦露、汪小知（浙江大学信息与电子工程学学院）；第二章：Jing Jiang（姜璟，美国伊利诺伊大学香槟分校）；第三章：卢妍利、Nantao Li（李楠涛，美国伊利诺伊大学香槟分校）、陈泽涛、许刚、刘磊、刘清君（浙江大学生物医学工程与仪器科学学院）；第四章：王立强、吴娟利（浙江大学光电科学与工程学院）；第五章：张倩、纪岱宗、李爽、刘清君（浙江大学生物医学工程与仪器科学学院）；第六章：张冯江（浙江大学医学院）、董浩、林丽泉、陈星（浙江大学生物医学工程与仪器科学学院）；第七章：赵天易、房钰鑫、郭扬、郭义（天津中医药大学）。没有各位编写人员的共同付出，就没有本书的问世。在此谨向大家致以衷心的感谢！同时，也感谢本书的责任编辑李江彬老师在本书出版过程中所给予的大力支持和无私帮助！

最后，衷心希望我们每个人，不管是作为相关技术的研发人员，亦或只是穿戴式与便携式技术的使用者，都能从本书的研读中获益！希望借助于穿戴式与便携式技术，我们每个人最终都能成为一个个“行走着的传感器”，以一种“平民科学家”的身份，进行大量而有效的数据获取，为我们的健康检测、环境测评，提供新的研究思路与方法。当然，也更加希望读者朋友们能从不同角度给我们不断提出宝贵的意见和建议，以便持续改进。

刘清君

2018年5月1日于浙江大学
电子邮箱：qjliu@zju.edu.cn



第一章 柔性电子器件及其研究进展

第一节 柔性电子器件概述 /2

- 一、概述 /2
- 二、柔性电子器件的材料与工艺 /4

第二节 柔性显示器件 /9

- 一、概述 /9
- 二、背板工艺 /9
- 三、前板工艺 /12
- 四、阻挡层 /13
- 五、柔性显示设备小结 /13

第三节 柔性储能/发电器件 /14

- 一、概述 /14
- 二、柔性太阳能电池 /15
- 三、柔性锂离子电池 /18
- 四、柔性超级电容 /20
- 五、柔性摩擦发电器件 /22

第四节 柔性传感器 /24

- 一、柔性压力传感器 /25
- 二、柔性热流量传感器 /30
- 三、柔性光学传感器 /31

第五节 柔性执行器 /33

- 一、概述 /33
- 二、柔性电活性执行器 /33

三、柔性光驱动执行器 /35

第六节 本章小结 /36

第二章 穿戴式代谢物传感检测技术

第一节 概述 /42

一、连续无创生化传感技术的需求 /42

二、可穿戴无创生化传感技术 /43

三、生化代谢物穿戴式传感技术的挑战与展望 /46

第二节 穿戴式血糖测量 /47

一、穿戴式血糖测量概述 /47

二、穿戴式血糖测量方法 /49

三、穿戴式血糖测量的示范应用 /54

四、血糖测量方法的总结与展望 /55

第三节 其他代谢物测量 /56

一、胆固醇的测量 /56

二、乳酸的测量 /59

三、肌酐的测量 /61

第四节 代谢物测量中的穿戴式应用 /64

一、智能运动腿套 /64

二、多功能穿戴式柔性汗液传感器 /64

三、穿戴式代谢物测量的总结与展望 /66

第五节 本章小结 /68

第三章 柔性接触式传感检测技术

第一节 柔性接触式传感器概述 /74

一、柔性电子皮肤及其发展 /74

二、柔性材料及其加工技术 /76

三、柔性接触式传感器及其应用 /78

第二节 柔性电子皮肤穿戴式传感器 /79

一、柔性电子皮肤穿戴式传感器原理	/80
二、柔性电子皮肤穿戴式传感器方案	/81
三、柔性电子皮肤穿戴式传感器示范应用	/82
第三节 柔性牙齿接触式传感器	/92
一、柔性牙齿接触式传感器原理	/92
二、柔性牙齿接触式传感器方案	/95
三、柔性牙齿接触式传感器示范应用	/98
第四节 柔性角膜接触镜传感器	/103
一、柔性角膜接触镜传感器原理	/103
二、柔性角膜接触镜传感器方案	/105
三、柔性角膜接触镜传感器示范应用	/112
第五节 本章小结	/116

第四章	基于手机的光学传感检测技术
------------	----------------------

第一节 光学检测技术在手机平台上的应用概述	/122
一、基于手机的光学检测技术	/122
二、基于手机的光学检测技术分类	/122
三、基于手机的光学检测技术发展趋势	/123
第二节 基于手机平台的医学显微成像技术	/124
一、通过新增光学透镜实现显微成像的技术方法	/125
二、无须增加光学系统的显微成像技术	/130
第三节 基于手机平台的免疫分析技术	/134
一、基于成像比色测量的免疫分析技术	/134
二、基于分光光谱测量的免疫分析技术	/141
三、基于酶标方式的免疫分析技术	/146
四、基于微流控荧光成像方式的免疫分析技术	/148
第四节 基于手机平台的内窥镜成像技术	/149
一、基于手机摄像模組的内窥镜成像技术	/149
二、基于手机无线网络的内窥镜成像技术	/153
第五节 基于手机的穿戴设备成像技术	/155
一、采用电子眼镜实现的穿戴式成像技术	/155

- 二、采用手机摄像模组实现的穿戴式成像技术 /158
- 第六节 本章小结 /159

第五章 基于手机的电化学传感检测技术

- 第一节 电化学传感检测概述 /166
 - 一、电化学传感检测原理 /166
 - 二、电化学传感检测技术的分类 /168
 - 三、基于手机的检测技术的发展 /169
- 第二节 基于计时电流法的手机电化学检测 /171
 - 一、基本原理 /172
 - 二、基于手机的计时电流检测方案 /174
 - 三、基于手机的计时电流检测示范应用 /178
- 第三节 基于循环伏安法的手机电化学检测 /181
 - 一、基本原理 /182
 - 二、基于手机的循环伏安检测方案 /182
 - 三、基于手机的循环伏安检测示范应用 /186
- 第四节 基于电化学阻抗的手机电化学检测 /188
 - 一、基本原理 /188
 - 二、基于手机的电化学阻抗检测方案 /191
 - 三、基于手机的电化学阻抗检测示范应用 /196
- 第五节 本章小结 /199

第六章 穿戴式与便携式呼吸诊疗传感检测技术

- 第一节 呼吸诊疗传感检测概述 /206
 - 一、呼吸诊疗原理 /206
 - 二、呼吸诊疗的发展趋势 /207
- 第二节 呼气传感检测技术 /209
 - 一、呼气预处理方案 /209
 - 二、呼气挥发性有机物检测方案 /212
 - 三、呼气冷凝物的检测方案 /220
 - 四、穿戴式呼气检测方案 /223
- 第三节 呼气检测临床应用 /227

- 一、慢病监测与疾病诊断 /227
- 二、药物浓度检测 /234
- 第四节 吸气治疗技术 /237**
 - 一、吸气给药原理 /238
 - 二、吸气给药方案 /238
 - 三、吸气给药临床应用 /243
- 第五节 本章小结 /244**

第七章	穿戴式生化检测技术在医学中的应用
------------	-------------------------

- 第一节 穿戴式设备在医学领域应用概述 /256**
 - 一、穿戴式医疗技术的发展概况 /256
 - 二、穿戴式医疗设备分类 /257
 - 三、穿戴式医疗设备在中医领域的应用 /264
 - 四、设备监管及标准化 /269
 - 五、穿戴式医疗设备的技术发展趋势 /270
- 第二节 穿戴式脉诊仪的设计及应用方案 /272**
 - 一、脉象原理 /273
 - 二、脉象客观化原理 /274
 - 三、实施方案 /276
- 第三节 基于 LED 技术的穿戴式穴位理疗设备 /282**
 - 一、设计原理 /283
 - 二、基于 LED 的穿戴式穴位理疗设备的应用示例 /285
- 第四节 基于手机的唾液葡萄糖无线检测设备 /287**
 - 一、唾液葡萄糖检测原理 /287
 - 二、唾液葡萄糖检测设备的硬件设计 /288
 - 三、唾液葡萄糖检测设备的软件设计 /290
- 第五节 挑战与对策 /291**
 - 一、传感器敏感性 /291
 - 二、电池容量 /291
 - 三、数据采集处理效率 /291
 - 四、数据传输可信度 /292
- 第六节 本章小结 /292**

第 一 章

柔性电子器件及其 研究进展



第一节 柔性电子器件概述

一、概述

目前,无论是从工业应用、生产生活还是科学研究的角度,柔性电子器件都已经成了一个热点,并逐渐开始影响我们的生活,包括各类柔性电子电路、显示器、传感器等。

任何足够薄的物体都具有一定的柔性。大约 40 年前,为了提高人造卫星的推重比,就已经采用了减薄的单晶硅太阳能电池板。由于这些光伏单元非常薄,便具备了柔性的特点,并可以像玉米叶子一样卷曲起来。材料具备了柔性意味着具备可弯曲、高弹性、轻便、甚至是可拉伸的特点,在工艺上可以与卷对卷(roll to roll)工艺相兼容。在 20 世纪 60 年代,该减薄的太阳能电池板,厚度在 100 μm 左右,并将其安装在塑料基板表面作为支撑。值得注意的是,为了保证电池板的柔性,基底材料需要采用聚合物或者不锈钢,而这种基底材料决定了器件制造的工艺过程中的温度上限,非晶硅由于其较低的生长温度,也在这时开始广泛应用于柔性太阳能电池上。20 世纪 80 年代 roll to roll 技术被引入之后,柔性太阳能电池的大规模生产应用也成为可能。

随着社会发展与科学技术的进步,显示技术也开始了柔性化的脚步。相比于传统的显示器,柔性显示器成本更低,对环境适应性更好,并且在储存运输的过程中不易损坏。对于柔性显示器,关键组件的研究包括:背板的薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)控制阵列与前板有源矩阵有机发光二极管(active matrix organic light emitting diode, AMOLED)等,显示器的柔性实质上即为前板与背板的柔性化。关于柔性显示器的相关工艺与材料选择将在后文中进行详细介绍。

需要注意的是,上述各类器件的柔性均为可弯曲而不可拉伸,对于可弯曲器件(flexible device),需要保证器件在一定曲率的形变下仍然可以正常工作;而可延展器件(stretchable device)则更需要保证器件在拉伸的情况下保持性能的稳定。显然,可延展器件对器件的物理性能提出了更高的要求。由于移动互联网的爆发和精准医疗

的强烈需求，穿戴或植入式医疗感知和诊断器件对柔性特别是可延展电子技术的需求越来越迫切，在国内外学术和产业界掀起了激烈的竞争。这些场合需要电学系统通过增强与软性及可延展组织和器官的结合度，以生物兼容、长期无毒、成本低廉的方式贴近组织器官的结构从而在组织器官发生弯曲和延展形变时仍能实现感知的连续性和精确性。在此之中，人工类皮肤（如：电子皮肤、电子纹身等）系统是一项非常前沿和热门的研究方向。我们可以将人工类皮肤系统看作是一个柔性可延展并集成了诸多功能的传感系统，其通过贴合表皮或器官，完全可能在无创情况下捕捉到身体内外的温度^[1]、力学感觉^[2]、脉搏及血液^[3]、骨骼^[4]、肌肉^[5]里的各类指标，如图 1-1 所示^[6-8]。近年来国际上出现的类皮肤传感器件通过传感单元的结构设计，新材料的应用和压印、喷墨打印以及卷对卷等工艺的革新，不断朝着这个目标迈进，甚至突破皮肤本身的传感功能，实现如生化、光学、电磁等的感知。这对于医疗穿戴、植入器件、仿生、机器人和军事等领域均有着重要的意义。而如何为包括类皮肤系统在内的柔性电子器件提供大延展性能，是目前国际学术的前沿，也是各个团队正在努力解决的问题。可延展电子和传感系统在科学上的基础问题，即如何克服或利用力学形变下的特殊环境以保证集成电子系统在高性能、可靠性和稳定性上的最佳权衡，在以下三个层面上迫切需要发展：①辅助延展性结构的设计，②材料的选择，以及③多种功能器件的集成及不同感知信号的分辨和区别。

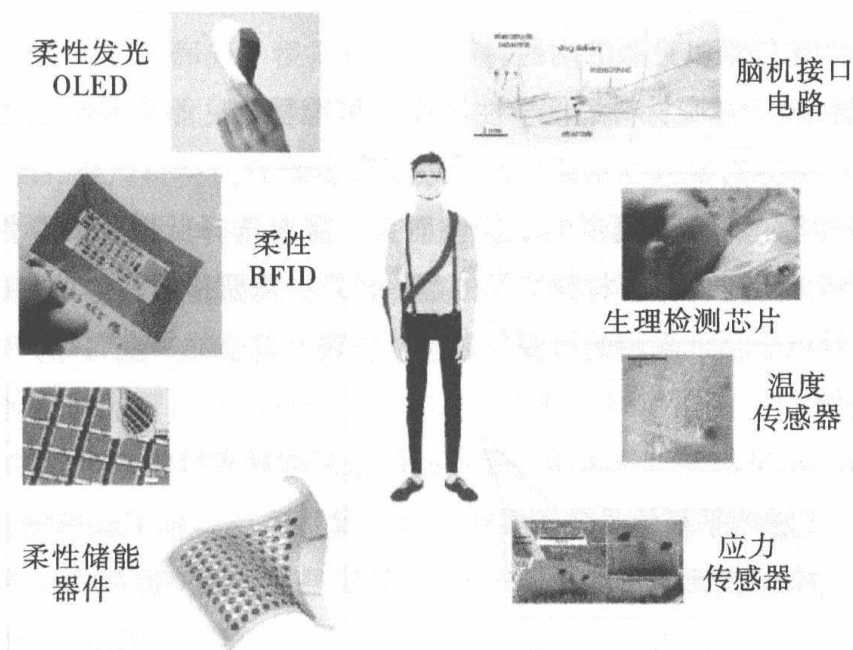


图 1-1 柔性电子器件的应用

综上所述，柔性电子器件的发展经历了从可弯曲到可延展、从消费电子到医疗电子、从外（生产生活）到内（植入式）的发展过程，柔性电子器件以其良好的环境适应性、材料多样化获得了越来越多的青睐，各类功能各异的器件层出不穷，性能上



也有不错的表现，不难预测，柔性电子器件将在未来的生活中发挥更大的作用。

二、柔性电子器件的材料与工艺

(一) 柔性电子器件的材料选择

1. 衬底材料

柔性电子器件衬底材料的选择有很多，根据器件的物理需求（可弯曲/可延展）不同，加工工艺的不同（平面工艺/非平面工艺）需要仔细选择。但是一般需要考虑的因素如下：

(1) 光学特性：柔性显示器对衬底的光学特性要求取决于采用何种显示方式。底部发射或者透射式显示需要衬底材料完全透明，透光率需要在90%以上。

(2) 表面粗糙度：电子器件的电学性能，尤其是薄膜器件，衬底表面的粗糙度是一个重要的影响因素。相对而言，金属衬底的粗糙度较高，而聚合物表面则相对平整。

(3) 热学性能：衬底所能承受的最高温度，例如聚合物的玻璃化转变温度需要高于加工过程中的最高温度。而衬底材料与表面材料的热膨胀系数的差异同样需要考虑，一个简单的判断标准为 $|\Delta\text{CTE} \times \Delta T| \leq 0.1 \sim 0.3\%$ ，其中 ΔCTE 为材料热膨胀系数之差， ΔT 为工艺过程中的温度差。对于采用聚合物做衬底的器件，衬底的高热膨胀系数是一个比较难以克服的问题。

(4) 化学性质：衬底材料的化学性质要尽可能稳定，不会受到工艺中的各种化学物质的腐蚀，并且对氧气与水蒸气的透过率要尽量小。

(5) 机械性能：对于可延展电子器件而言，需要选择低模量高弹性的聚合物材料，而对于可弯曲电子器件，材料选择的范围较广，需要根据具体功能进行选择。

常见的柔性电子器件采用的衬底材料包括玻璃、聚合物、金属等，每种材料均有不同的应用场景。

(1) 玻璃：在平板显示技术中，平板玻璃是标准衬底材料。当玻璃的厚度在100 μm 以下的时候，玻璃平板便具备了柔性特点。薄板玻璃具备了玻璃的大部分优良物理性质：高透光率、表面粗糙度小于1 nm，耐受温度达到600 $^{\circ}\text{C}$ 等。但是薄板玻璃最大的问题在于其十分脆弱，容易破裂。为了减少加工过程中的损坏，往往将薄板表面涂敷一层较厚的聚合物或者直接黏接在塑料衬底表面。

(2) 聚合物：相比于其他无机材料，聚合物衬底柔性特征最优，成本低廉，适于大规模连续生产，但是缺点在于热稳定性低，膨胀系数高，并由此带来面积稳定性较差的问题。此外，聚合物衬底容易渗入氧气与水蒸气等，造成器件性能的退化。常

见的聚合物衬底包括部分结晶聚合物，如聚对苯二甲酸乙二醇酯（polyethylene terephthalate, PET），聚萘二甲酸乙二醇酯（polyethylene naphthalate, PEN）；非晶聚合物，如聚碳酸酯（polycarbonate, PC），聚醚砜树脂（polyether sulfones, PES）；高玻璃化温度聚合物，如聚芳基酸酯（polyarylate, PAR），聚酰亚胺（polyimide, PI）；各类硅橡胶。在诸多材料中，硅橡胶多用于可延展器件中。在可弯曲器件的应用上，使用最多的有PET, PEN以及PI, 原因在于这几种材料较小的热膨胀系数, 较高的耐受温度, 比较适合于微加工工艺。PET与PEN的透光度在85%左右, 耐受温度不超过200℃。PI玻璃化温度在350℃, 但是由于吸收蓝光, 所以呈现出黄色。另外聚合物材料的水蒸气与空气的透过率大概在 $1 \sim 10 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 与 $1 \sim 10 \text{ cm}^3/\text{m}^2/\text{day}$, 远远高于诸如有机发光二极管（organic light emitting diode, OLED）等显示器件对于透过率的最低要求, 因此在柔性显示器件中, 往往需要增加额外的阻挡层来减少外部环境对器件的影响。

(3) 金属: 金属薄片为了达到柔性效果, 厚度需要小于 $100 \mu\text{m}$, 并应用于不需要透明衬底的地方, 如反射式显示等。在诸多金属中, 不锈钢以其耐腐蚀、耐高温、温度系数低的特点应用范围最广。但是不锈钢材料的表面粗糙度非常高, 在 100 nm 左右, 因此需要借助一些办法进行平整化, 如涂覆一层聚合物等。

2. 功能材料

在柔性器件的功能部分, 根据传统电子材料电学性能划分, 同样可以划分出导体、绝缘体与半导体。常见的材料包括金属、有机材料以及各类新型纳米材料等。

(1) 金属: 金属材料在柔性电子器件中的功能, 与在传统器件中发挥的功能类似, 以其高电导率, 常常作为电极以及互连线材料。但是不同之处在于, 柔性电子器件对金属材料的机械性能提出了更高的要求。对于可弯曲器件而言, 由于金属电极或者互连线, 厚度一般不会超过衬底材料厚度, 而且根据弯曲应力公式, 应力 $\varepsilon = d/2r$, 其中 d 为材料厚度, r 为弯曲半径, 不难看出, 材料越薄, 所受到的应力越小。当衬底厚度在几十到几百微米, 而金属导线层厚度为微米级时, 金属所承受的弯曲应力相比于衬底材料可以忽略。因此, 金属材料的性能, 基本可以满足可弯曲柔性器件的要求。对于可拉伸器件而言, 问题则要复杂许多, 金属材料的拉伸一般不超过自身的1%, 而器件中的金属材料往往非常薄, 因此在拉伸过程中, 极易发生断裂。为了避免此类问题的出现, 一方面需要通过引入不同的器件结构设计, 增加金属材料的延展性能, 另一方面则需要寻找金属材料的替代品, 使材料本身就具备在拉伸条件下仍可以保持电性能稳定的特性。可供选择的材料包括诸如聚合物材料, 新型纳米材料等。