

OLED

显示技术导论

于军胜 钟 建 / 编著



科学出版社

OLED 显示技术导论

于军胜 钟 建 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

近年来,全球 OLED 技术和产业布局发展迅猛,柔性高世代 OLED 生产线陆续建设、投产, OLED 产业无疑成为电子信息领域的产业蓝海。然而与之不相匹配的是 OLED 专业人员和相关书籍的严重不足。本书从有机电致发光二极管设计的基础理论着手,逐步拓展到当前实际工程应用到的各种发光器件的设计和应用原理。涉及的内容有很强的工程性和实践性,同时又保证了足够的理论深度,充分做到了理论结合实际。

本书的出版,可以很好地填补国内在此领域教材或科研参考书的不足,不仅可供高校电子科学与技术学科(固体电子或电子材料与元器件相关专业)本科生和研究生使用,而且还可作为从事发光材料及器件相关领域研发人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

OLED 显示技术导论 / 于军胜, 钟建编著. —北京: 科学出版社, 2018.4
ISBN 978-7-03-056760-4

I. ①O… II. ①于… ②钟… III. ①电致发光-发光器件 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 046916 号

责任编辑: 张 展 黄明冀 / 责任校对: 郭学雯

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 罗 科

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年4月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 326千字

定价: 69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

视觉是人类获取信息的重要途径，与视觉密不可分的显示技术在人们获取外界信息、改善生活质量方面扮演着举足轻重的重要角色。随着人类社会信息化程度的提高，大数据、互联网+、智能制造、云计算、VR/AR 等不同信息运用方式的不断涌现，作为人机界面交互的纽带——显示器，在电子信息领域的发展中越来越具有举足轻重的作用。经过短短几十年的时间，从简单的信号显示灯到七段数码显示管，从阴极射线管(cathode ray tube, CRT)显示器到今天的户外全彩色大屏幕发光二极管(light-emitting diode, LED)、室内超薄大屏幕的显示器以及曲面与柔性显示屏，显示技术的跨越式进步是有目共睹的。随着信息科学与技术的飞速发展，信息的显示质量和用户体验对显示器件的要求越来越高，尤其是分辨率、响应速度、宽视角、全彩色方面；同时，超薄、超清、柔性、重量轻、功耗低、耐冲击等特性也成为信息显示器件的发展方向。

作为新一代显示技术的有机发光二极管(organic LED, OLED)，具有自发光、选材广、亮度与效率高、色域与视角宽、响应快、驱动电压低、制程相对简单等优点，同时兼具独有特色的柔性显示。OLED 突飞猛进的发展无疑是人类显示技术领域的重大突破，能够满足当今信息显示的要求，不断提升着人们的生活品质。

近年来，全球 OLED 技术和产业布局发展迅猛，柔性高世代 OLED 产线陆续建设、投产，OLED 产业无疑成为电子信息领域的产业蓝海。然而，与之不相匹配的是，OLED 专业人员和相关书籍严重不足，在此背景下，本书应运而生。参与本书编著的作者是长期从事各类显示器件技术教学的教师和科研人员，电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室的于军胜教授和钟建教授分别担任主编和副主编，本书同时得到了周殿力、祁一歌、王子君、王润、朱方云、邓朝旭等研究生的大力协助和支持，在此向他们表示衷心感谢！

科学技术的发展日新月异，由于编者学识水平有限，书中不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2018年1月于成都

目 录

第1章 绪论	1
1.1 OLED的特点	6
1.2 OLED的应用	9
参考文献	13
第2章 OLED基本理论	14
2.1 半导体能级	14
2.2 基态与激发态	16
2.3 荧光辐射与磷光辐射	19
2.4 激基复合物与激基缔合物	21
2.5 激发态能量转移机理	27
参考文献	30
第3章 OLED基础知识	32
3.1 OLED的分类	32
3.2 OLED的结构	36
3.3 OLED工作原理	38
3.4 OLED性能参数	42
3.5 OLED的制备工艺	45
参考文献	50
第4章 载流子注入与传输材料	52
4.1 电极材料	52
4.2 空穴注入材料	53
4.3 空穴传输材料	55
4.4 电子注入材料	57
4.5 电子传输材料	58
参考文献	62
第5章 发光层材料	65
5.1 荧光发光材料	65
5.2 磷光发光材料	72
5.3 延迟荧光材料	80
5.4 主体材料	82
参考文献	89

第 6 章 OLED 显示与 TFT 技术	95
6.1 TFT 技术	95
6.2 OLED 显示技术	111
6.3 TFT-LCD 与 AMOLED 显示技术	121
参考文献	139
第 7 章 OLED 照明技术	141
7.1 白光 OLED 技术	144
7.2 OLED 照明的特点	150
7.3 OLED 与现有照明技术的对比	154
参考文献	158
第 8 章 OLED 封装技术	161
8.1 盖板封装	162
8.2 薄膜封装	165
8.3 钢封接	169
8.4 熔块熔接密封	170
参考文献	173
第 9 章 OLED 其他技术	174
9.1 柔性 OLED	174
9.2 透明 OLED	178
9.3 颜色可调 OLED	181
9.4 一体化器件	185
9.5 量子点发光技术	187
9.6 钙钛矿发光技术	190
参考文献	195
第 10 章 OLED 相关产业化技术	199
10.1 Roll to roll process 技术	199
10.2 喷墨打印	202
10.3 丝网印刷技术	207
10.4 激光热转印	209
参考文献	211

第1章 绪 论

随着人类社会发展的脚步迈入 21 世纪,近二十年来信息技术的空前发展推动了社会关系、产业结构、教育方式和家庭生活的变革。信息的捕捉、处理、存储和显示已经与人类知识的获取和生活质量的提高紧密相关。其中,由于人类获取的信息 70%以上来自于视觉,与视觉息息相关的显示技术成为信息技术中不可或缺的一环。随着电子信息产业的快速发展,信息显示的硬件设备——显示器,作为人机交互必不可少的载体,在信息显示技术的发展过程中扮演着至关重要的角色,直接关系到人类获取信息的数量多寡、质量高低、时间长短等。显示技术的不断创新进步带动了显示器工业的跨越式发展,经过几十年的努力,信息显示装置从简单的指示灯、七段数码显示管,经历传统的黑白、彩色、超平、纯平 CRT 显示器,发展到大放异彩的液晶(liquid crystal display, LCD)和等离子(plasma display panel, PDP)以及 LED 显示器,全球显示产业的规模越来越大,显示产品的应用领域也越来越广。2000 年以来,被誉为第三代显示技术的 OLED 显示,由于其具有其他显示技术不可比拟的优良性能,受到了业界的极大关注。信息科学与技术的高速发展,使得人们对信息显示器件的要求越来越高,特别是高品质图像即高分辨率、高对比度、高响应速度、宽视角,以及便携性即超薄、超轻、低功耗,成为未来信息显示的发展方向,而 OLED 恰恰满足了以上的各种需求。

回顾显示技术及其器件的发展历程,作为早期的主流显示器,CRT 具备高亮度、宽视角等优良的性能,同时也面临着难以克服的缺陷,如体积大、功耗大、无法应用于移动电话、笔记本电脑等便携式设备。20 世纪 80 年代进入人们视野的 LCD 显示器,具有体积小、薄型化、重量轻、无辐射、抗干扰能力强等优势,目前在电视、掌上电脑、手机等显示器件中是绝对主流的显示屏。但是,LCD 依然存在一些不可克服的缺陷,如视角窄、对比度较低、响应速度慢、温度特性差、无法自发光需采用背光源等。近年来,薄膜晶体管驱动的 LCD(thin film transistor LCD, TFT-LCD)其尺寸、视角和分辨率均取得了突破性进展,已经成为显示技术的主流器件。LCD 发展的初期,与其竞争的显示器是 PDP 显示,并且占据了一定的市场份额。尽管有 MgO 作为介电层的保护,等离子体对荧光粉长时间持续性的轰击仍使得荧光粉发光能力衰减,并且在屏幕上残留之前显示图案的“灼烧”浅像;同时,PDP 上某一特定像素获得高亮度需要高的瞬时电压并由驱动电路提供,这对集成电路也是致命的损伤。此外,PDP 器件必须采用障壁结构,因而只适用于大尺寸显示器。由于全球显示产业的布局和产业链的断裂,PDP 显示器已经退出了显示技术的舞台。

另一方面,作为发光机理迥异的电致发光(electroluminescence, EL),是发光材料在电场作用下而产生光的现象,是一个将电能直接转化为光能的发光过程。用于制备 EL 器件的材料,无机化合物半导体材料研究较多且率先达到应用水平。P-N 结无机半导体

EL 的 LED 实现了红光到黄光的发射, 发光效率超过白炽灯, 同时具备驱动电压低、使用寿命长、效率高、稳定性强等诸多优点, 近二十多年里得到了广泛应用。但是, LED 显示屏的各个发光点的发光颜色不易调节、大面积显示的散热等问题, 限制了其进一步发展。与无机 LED 相对应, 基于有机半导体功能材料的 OLED, 作为新一代显示技术应运而生, 从信息显示到固态照明器件, 伴随着广阔的应用前景和技术上的突飞猛进, OLED 已经逐渐迈入了产业化进程。

与其他显示技术相比, OLED 具备诸多优势, 如材料选择范围广、发光亮度和效率高、可以实现蓝光到红光光谱区域的全彩色显示、视角宽、响应速度快、驱动电压低、制作过程相对简单因而成本较低, 同时最具特色的是其可实现柔性显示。OLED 能够满足当今信息化时代对显示设备更高性能和更大信息容量的要求: 可用于室内和户外普通照明, 以及作为壁纸用于室内装饰照明; 可制成光电耦合器件, 作为集成电路上芯片与芯片间的单片光源, 用于光通信; 可制成可折叠的“电子报纸”; 可用于全彩色超薄大屏电视机, 也可用于手机、笔记本电脑等小巧的便携式移动设备; 其全固态结构适用于航天领域的数字图像处理设备的显示。图 1-1 展示了 OLED 的多样化用途。早期 OLED 产品存在稳定性差、容易老化等缺陷, 通过提高材料稳定性、改善器件结构、改良封装技术等措施, OLED 的寿命和显示性能已经达到商品实用化标准。近年来, OLED 显示实用化进程取得突破性进展, 使人们对其大规模产业化发展倍添信心。在发光效率方面, OLED 显示已经超过 PDP 和 TFT-LCD 水平; 在器件全彩色显示方面, 开发出三基色法、白光加滤光膜方法、蓝光能量转换法等多种技术方案, 多家公司已推出全彩色 OLED 显示器的原型机甚至成熟的产品。在发光亮度方面, OLED 的亮度已经超过 100000 cd/m^2 。OLED 产业经过短短十多年的探索创新, 已经堪比 LED 数十年的发展历程, 产业化势头异常迅猛。

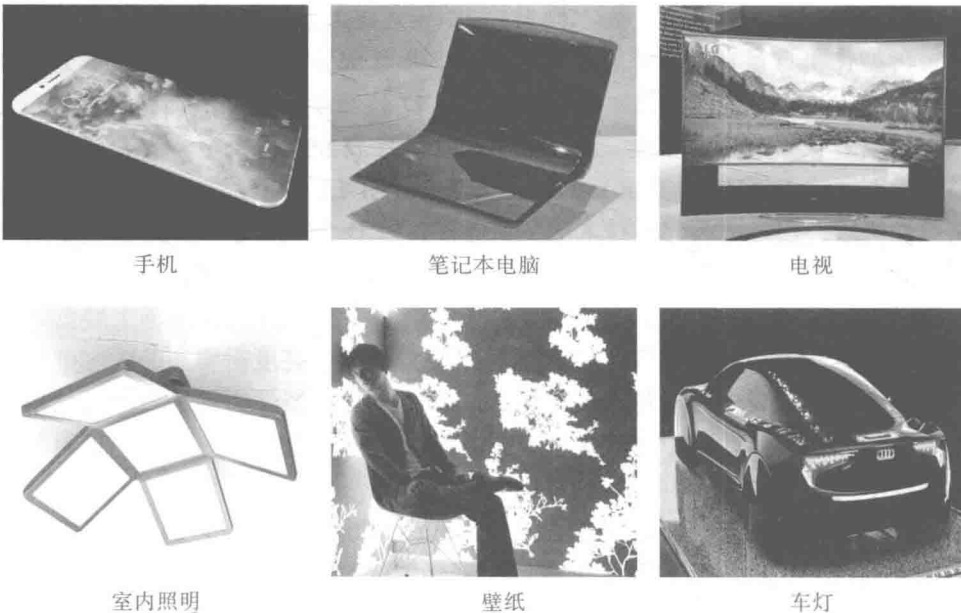


图 1-1 OLED 的多样化用途

20世纪60年代,有机EL现象的发现及相关研究就已经开始了。1963年,美国New York大学的Pope团队首先发现有机材料单晶蒽的EL现象^[1],当时的单晶蒽厚度达到20 μm ,驱动电压更高达400 V,因而未引起人们的关注。1982年,Vincett等制备了0.6 μm 的蒽薄膜,将驱动电压降到30 V以下^[2],但是,器件的量子效率仍然很低,不到1%。1987年,Kodak公司的C. W. Tang等报道了基于高荧光效率、电子传输性能良好的8-羟基喹啉铝和空穴传输性能良好的芳香族二胺两种有机半导体材料,通过真空热蒸镀的方式制备了器件结构为三明治型的OLED^[3]。这种高亮度、高量子效率的器件引起了科研人员的广泛关注和产业界的极大兴趣,促使有机EL材料的研究开发进入一个崭新的时代。1990年,英国学者Friend教授等报道了低电压下高分子聚合物材料EL现象,开启了基于聚合物材料显示技术的新领域^[4]。1992年,诺贝尔化学奖得主Heeger等率先发明了基于塑料衬底的柔性器件,展现出了OLED显示器独一无二的魅力^[5]。1997年,美国学者Forrest教授等发现磷光EL现象,三线态激子的有效利用将OLED内量子效率从荧光材料25%的极限提高到100%^[6]。1998年,日本学者Kido教授等实现了白光EL,使OLED可用于普通的白光照明光源^[7]。1998年,Hebner等发明了喷墨打印法制备OLED技术^[8],将OLED从科学研究的小批量制备逐渐引领到商业化大规模生产。目前,基于红、绿、蓝三基色磷光染料的OLED外量子效率均超过20%,磷光OLED全彩色信息显示和白光照明光源技术已经实现。2012年,Adachi等更是报道了继常规荧光和磷光发光材料之后的第三代发光材料,即热激活延迟荧光材料,其分子结构通常为供体-受体或者供体-受体-供体,打破了荧光材料只能利用单线态激子发光的束缚^[9]。2017年,Dan Credgington, Manfred Bochmann和Mikko Linnolahti共同报道了一种新型的基于碳烯-金属-酰胺的发光分子,分子结构为线性供体-桥-受体^[10]。由于单重-三重态能隙接近零,且其单重-三重态简并点保持了振子强度,所以该种分子的延迟荧光寿命在室温下仅为350 ns,远低于热激活延迟荧光材料的寿命(>5 μs)。基于该种发光材料的湿法制备的OLED的内量子效率接近100%。目前,中国的多所高校和研究所也开展了相关学术研究工作,清华大学、华南理工大学、吉林大学、电子科技大学、武汉大学、北京大学、北京交通大学、香港大学、香港科技大学、南京工业大学、南京邮电大学、太原理工大学、中国科学院长春应用化学研究所、中国科学院化学研究所等结合各自所长,各有侧重地取得了一大批有标志性的研究成果,培养了一批研发和技术人才,为我国在OLED领域中与世界发达国家的同台竞技打下了坚实的基础。

OLED在国际著名公司的受重视程度以及产品化进程,与高校、研究所的科学研究几乎并驾齐驱。1997年,OLED作为显示器件领域中的新面孔,已经实现商业化。Kodak、Sanyo、Philips、Epson、Samsung、HP、Dupont、CDT、SONY、Pioneer、TDK等公司致力于OLED显示器相关的材料、原件、设备等的研发和制造。日本Pioneer公司推出了世界第一个商品化的OLED显示产品——汽车音响显示屏。1998年,Idemitsu Kosan和NEC都推出分辨率为320×240的彩色有源矩阵驱动OLED显示器。2001年,CDT、Epson、TDK三家公司联合研制出13.2 in^①的P-TFT驱动的彩色OLED显示屏;同

① 1 in=2.54cm。

年, SONY 公司展示了 13 in 全彩色 OLED 显示屏; Samsung 研制出 15.1 in 的全彩色有源矩阵驱动的 OLED 原型机; LG 开发出 OLED 显示屏用于 1.8 in 和 1.9 in 折叠式手机。2002 年, Kodak 和 Sanyo 组建的 SK Display 公司已生产出 15 in 显示器, 性能可与 TFT-LCD 电视媲美。2003 年, 中国台湾 IDTECH 展出了 20 in 全彩色 OLED 显示器, 分辨率提高到 1280×768。2004 年, Epson 展出通过喷墨打印实现的 40 in 全彩色 OLED 显示器, 将 OLED 显示技术首次引入大尺寸屏幕领域。显示屏厚度为 2.1 mm, 展示出 OLED 的超薄特性, 寿命为 1000~2000 h, 与 OLED 显示屏电视机寿命 100000 h 的基本要求尚有一定距离。2005 年, Samsung 和 LG 联合开发的 40 in OLED 原型机, 分辨率进一步提高到 1920×1200 像素, 对比度为 5000:1, 亮度达到 1000 cd/m²。同年, 美国有线电视新闻网(CNN)将 OLED 与因特网、手机、计算机列为近 25 年最有影响的创新技术之一, 位居 17 位。2006 年, OLED 又被市场研究公司 Gartner 列为十大战略技术的第三名。

2007 年, SONY 开始上市全球首款厚度仅 3 mm 的 11 in 有源矩阵有机电致发光显示器(active matrix organic light-emitting device, AMOLED)电视, 开启了所谓的“OLED 元年”; 同年, 美国 GE 公司成功研发出“2×2” OLED 光源, 将 OLED 固态照明设备的产业化提上日程, 该项目得到了美国能源部的支持。从 2009 年开始, 全球 AMOLED 的产业规模已超过了被动矩阵有机电致发光显示器(passive matrix organic light-emitting device, PMOLED), 成为 OLED 市场增长的主要动力。随着 SONY 和 LG 分别推出 11 in、15 in AMOLED 电视, 日本、韩国、中国台湾等厂商在 OLED 的市场竞争实力越来越强。此外, 奇晶、TMD、友达等厂商也都加快了 AMOLED 技术开发脚步。2011 年, 尽管 Samsung 仍然是 AMOLED 面板最大的供应商, 但市场份额已经下降至 70%左右。2012 年中期, Samsung 推出采用 LTPS TFT 技术的 55 in AMOLED, 厚度仅为 1.6 mm, 色域为 124%, 响应时间不到 0.01 ms, 对比度达到 150000:1, 亮度为 150 cd/m², 白光的最高亮度达到 600 cd/m²。2013 年 1 月, LG 电子在 CES 上全球首次发布 65 in 4K OLED 电视和 77 in 4K OLED 电视, 这表明全球进入了大尺寸 OLED 时代。其中, 77 in 曲面 4K 超高清 OLED 电视融合了 LGD 的专利 WRGB 四色技术和 Ultra HD 超高清屏幕分辨率(3840×2160)。9 月 13 日, LG 电子在北京召开电视新品发布会, 推出中国第一款 55 in 曲面 OLED 电视——LG55EA9800-CA, 这标志着 OLED 电视时代正式来临。同期, Samsung 在中国也推出了 55 in OLED 电视, 并与 LG 电子同期发布 65 in 4K OLED 电视和 77 in 4K 曲面 OLED 电视。OLED 电视的代表性产品如图 1-2 所示。尽管三星、LG 两者之间的竞争拉低了 OLED 电视的价格, 但是售价仍分别高达数万元(人民币, 下同), 相比较而言, 同尺寸 55 in 三星、LG 的 4K 的 LCD 产品仅在 1 万元左右。因此, OLED 电视目前还只是少数高端用户或发烧级用户的产品。

OLED 照明被誉为继白炽灯、荧光灯、LED 灯后世界照明产业的第四次技术革命, 因此, 其发展前景被业界广泛看好。除 OLED 照明领域的引领者 OSRAM 之外, 全球各大公司在 2012 年已加快布局步伐, 其中 LG 化学正式涉足 OLED 照明领域, 并建设第二代 OLED 照明面板生产线, 住友化学和日本精机分别推出 OLED 照明面板, 中国台湾隆达也首次推出 OLED 照明模块, 日本 Toshiba 合并了东芝照明技术和哈里盛东芝照明, 并将 OLED 照明定位为新公司的支柱业务之一, Philips 和巴斯夫通过战略合作共同开发

照明用 OLED 透明面板。2012 年, Toshiba 开发出了面积为 $8\text{cm}\times 7\text{cm}$ 较大面积的 OLED 照明面板, 发光效率高达 91 lm/W 。较大面积(大于 25 cm^2) OLED 照明面板的发光效率取得的显著进展, 使其具备了与 LED 照明竞争的实力。此外, Motorola、Novaled、GE、OLED-T、CDT 等公司都在从事 OLED 光源的研发和生产。可以预测, OLED 照明器件在成本和寿命方面后续所取得的重大突破, 必将加快其市场化步伐。部分企业开发的 OLED 照明器件及灯具如图 1-3 所示, 除传统室内照明用的吊灯、墙灯、落地灯、台灯外, 还开发了柔性 OLED 照明器件、透明 OLED 照明器件、OLED 照明装饰器件等。



图 1-2 (a) Samsung 55 in AMOLED 电视; (b) LG 77 in 4K 曲面 OLED 电视

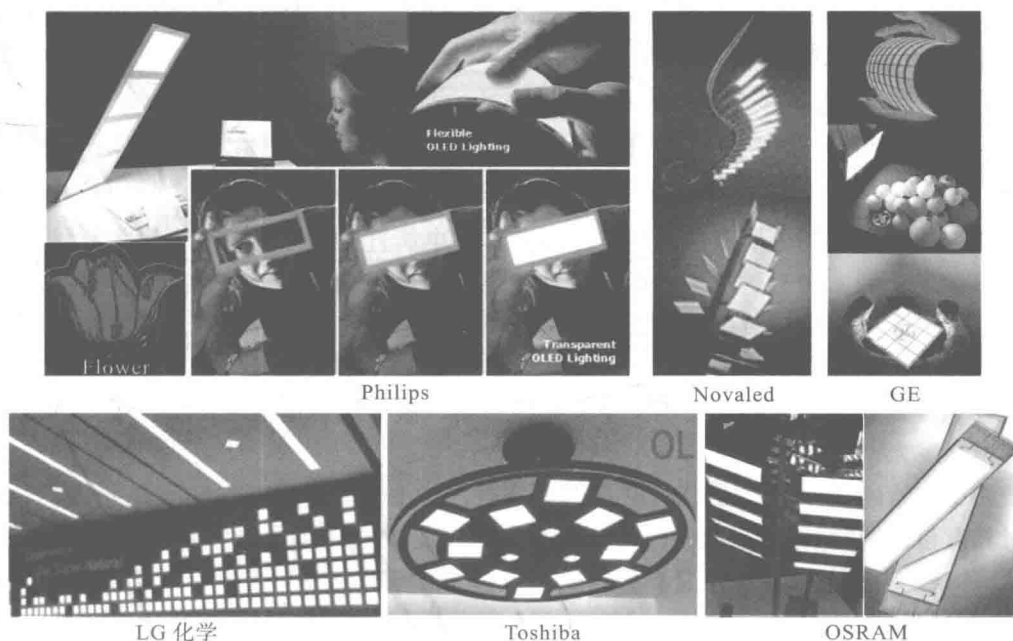


图 1-3 OLED 照明器件

中国从事 AMOLED 产业化的公司主要有京东方、华星光电、和辉光电、信利国际、天马、微信诺、友达光电、奇晶光电等。2006 年，奇晶光电发表了由全球最大 LTPS TFT 基板试制的 25 in AMOLED 面板。同期，友达光电全球首次将全彩 AMOLED 面板用在 BenQ-Siemens S88 手机主屏。2010~2012 年，维信诺先后开发成功 2.8 in、3.5 in、7.6 in 和 12 in AMOLED 样品。2012 年 9 月，京东方成功研发出了 17 in AMOLED 显示屏。2013 年 8 月，华星光电开发成功了中国大陆最大尺寸的全高清 31 in 电视用 AMOLED 显示面板。2013 年 11 月 27 日，TCL 集团子公司华星光电宣布，投资 244 亿元建立二期第 8.5 代 TFT-LCD(含氧化物半导体及 AMOLED)生产建设项目，并于 2015 年 5 月份投产。国内第一大面板企业京东方宣布其在鄂尔多斯市的 5.5 代 OLED 面板中试生产线正式运行，并可小量出货 OLED 小尺寸面板；2016 年，第一条柔性 6 代 OLED 面板生产线在四川省成都市开始建设，预计 2017 年底正式出货；随后，第二条柔性 6 代 OLED 面板生产线在四川省绵阳市开工建设。国显光电在河北固安的 6 代 OLED 生产线也立项建设。目前，京东方、华星光电、信利国际、天马等国内著名显示企业都开始着手布局 OLED 显示技术，陆陆续续有国际先进的生产线开工建设，OLED 显示技术在中国出现了蓬勃发展的产业化势头，在新一代显示领域及全球范围内具有巨大的竞争优势。

OLED 的科研和产业化在高速发展的同时，也暴露出一些长期存在、亟待解决的瓶颈性问题，如 OLED 寿命、色稳定性问题，其中，白光 OLED 的色稳定性同样取决于不同发光颜色有机材料的寿命的一致性。针对以上两点，除了设计并合成高效率和高稳定性兼顾的有机发光材料，同时要开发高 H_2O 、 O_2 阻隔能力的封装材料和切实可行的封装方法。随着量产技术的进步和工艺方面的改进，OLED 显示技术正向大规模产业化和应用领域迈进，带给人们前所未有的视觉享受。

1.1 OLED 的特点

OLED 是空穴和电子双注入型发光器件，将电能直接转化为有机半导体材料分子的光能。OLED 通常为夹层结构，即有机功能层夹在透明导电阳极和金属阴极之间。在阳极接正极、金属阴极接负极产生的正向电压驱动下，空穴和电子分别从透明阳极和金属阴极注入有机功能层，经过其他功能层传输到发光层，在库仑力作用下相互靠近，最后相互俘获成为处于束缚能级的电子空穴对即激子，激子辐射退激发发出光子，即有机半导体材料发光^[1]。

相比传统的 CRT、LCD、PDP 等显示器件，OLED 兼顾了已有显示器的所有优点，同时具有自己独特的优势。既有高亮度、高对比度、高清晰度、宽视角、宽色域(全彩色显示)等来实现高品质图像，又具备超薄、超轻、低驱动电压、低功耗、宽温度等特性来满足便携式设备的轻便、省电、适于户外操作的需求；而自发光、发光效率高、响应时间短、透明、柔性等更是 OLED 显示独具的特点。因而，OLED 在信息显示行业被称为“梦幻般的显示技术”。其中，OLED 的驱动只需要 2~12 V 的直流电压；全固化结构

的主动发光,使其适用于温差范围广、冲击振动大的特殊领域。此外,OLED采用有机半导体材料,由于有机功能材料的分子设计、性能修饰的空间广阔,因而OLED材料的选择范围宽;OLED制备过程相对简单,尤其是喷墨打印等湿法制备技术的引入,使OLED大尺寸面板通过生产线被大规模、低成本、高效生产;OLED容易与其他产品集成,具备优良的性价比。图1-4展示了OLED的性能特色。

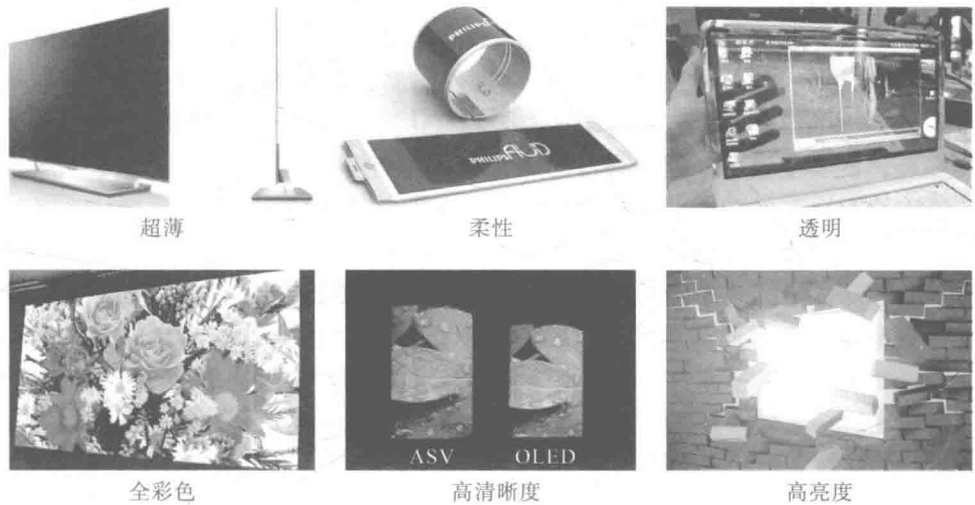


图1-4 OLED性能特色展示

具体而言,OLED作为一种新型发光技术,与目前占据绝对市场份额的LCD相比具有以下优势:

(1)主动发光。无须背光源,有利于实现器件的低功耗、超薄、柔性等优势。

(2)低功耗。例如2.4in的有源OLED(AMOLED)功耗为440mW,而同尺寸多晶硅LCD的功耗达到605mW,OLED能够有效地提高移动电话、笔记本电脑等便携设备在户外的待机和使用时间。

(3)响应速度快。响应时间达微秒量级,能及时捕捉到动态画面的每一个细节,无拖尾现象。

(4)超薄、超轻。厚度一般在25mm以下。基于聚合物基板的OLED柔性器件,充分展现其便携性。

(5)宽温度特性。在高低温(-40~85℃)下正常运行,对温度变化不敏感,环境适应性强,可满足日常户外尤其是寒冷冬天的便携式和可穿戴设备的需求,以及特殊军事领域、航空航天用途。

(6)高分辨率(采用有源矩阵)、高对比度、宽视角。LCD显示器的视角不超过110°,OLED显示器的视角通常可达160°,带来良好的视觉体验。

(7)全固态、无真空。耐震动,抗冲击的特性极好。

OLED依其所使用的有机薄膜材料的不同,大致可分为两类,一类是基于小分子材料元件(small molecule-based device)的系统,即传统的OLED器件;另一类是基于共轭

性高分子聚合物材料元件 (polymer-based device) 的系统, 为了以示区别, 又被称为 PLED。基于 OLED 和 PLED 的特点, 通过以下几方面对两者进行了对比:

(1) 材料方面。OLED 与 PLED 材料共同的特性, 在于都含有共轭的化学结构, 具有高度的荧光效率, 只是两者的分子量差异相当大, 小分子材料的分子量一般约在数百, 而高分子则在数万至数百万之间。就材料的取得而言, 小分子材料的合成与纯化皆较高分子简单, 对材料量产与纯度的要求较易达成。相对而言, 小分子的材料特性较高、分子易掌握, 但热稳定性与机械性质却以高分子较佳。

(2) 设备方面。材料特性的差异将导致器件的制程设备不同, 小分子采用加热蒸镀 (thermal evaporation) 的方式来蒸镀多层有机膜材, 为了避免不同材料间的相互污染, 故需使用多腔体的真空设备, 因此设备的成本高、前期投入巨大。相对而言, PLED 大都是以其溶液旋转涂布 (spin-coating) 的方式涂膜, 设备成本较低, 并且 PLED 可应用 roller 或 screen 的方式涂膜, 利于大尺寸显示器的发展。

(3) 制程方面。PLED 虽然采用 spin-coating 可较快速薄膜化, 但其在涂膜后仍须再经过烘烤以去除溶剂, 因此其总的成膜时间并不会较 OLED 短, 这将影响量产制程的产量。目前, OLED 已有多家大厂制作出全彩的显示器, 而 PLED 却仍受限于红绿蓝三像素独立定位困难的瓶颈, 至今迟迟无法推出全彩的 PLED 显示器, 以喷墨定位的方式应是较为可行的解决之道。

(4) 元件特性方面。两者均为电流型自主发光器件, 发展至今两种元件的发光效率皆可高于 15 lm/W , PLED 甚至可超过 20 lm/W , 且 PLED 可在较高的电流密度与较高的温度环境下操作。

(5) 专利授权方面。目前英国的 CDT 公司希望能加速 PLED 的商业化, 对 PLED 技术转移与专利授权的态度转趋积极, 相较于 Kodak 开放许多。而且, 随着时间的推移和 OLED 产业的发展, 相关知识产权问题将会迎刃而解。

总而言之, 小分子材料的优势在于容易彩色化, 采用蒸镀法的全自动生产方式已经成熟, 制备流程控制较容易且稳定, 材料的合成与纯化、精制较为容易等。但是, 目前设备较为昂贵, 对小分子的耐受性不佳, 蒸镀率低、易造成材料的浪费。反观高分子材料, 无须高价的真空设备, 组件构造只有两层较为简单, 且具有很好的耐热性。但是, 高分子材料的每个像素的衰减常数不同, 必须进行补偿, 因而较难向彩色化发展。

国际上, 亚洲国家厂商较偏向 OLED, 欧洲国家厂商则偏向 PLED, 美国厂商则两种技术皆参与之。目前, 积极投入有机电致发光技术研发的公司, 在 OLED 方面有 Kodak、UDC、IBM、HP、Motorola 及日本的 Pioneer、Idemitsu Kosan、Sanyo、TDK 等, 在 PLED 方面则为英国的 CDT, 美国的 HP、DuPont, 荷兰的 Philips 等, 已进入大规模的产业化阶段。

诚然, OLED 作为极具产业化实力和市场竞争力的第三代显示技术, 要顺应全彩色、高分辨率、柔性显示、薄膜封装、有源驱动以及低成本制备的发展趋势, 一些短板尚待改善, 包括:

(1) 色域尚未完全满足欧洲广播联盟制定的规范。

(2) 三基色的老化时间不一致, 其中蓝光稳定性最差, 导致白光 OLED 工作寿命难

以达到产业化需求，色稳定性有待提高。

(3) 目前大尺寸 OLED 显示器的研发、投产取得阶段性成果，但是还不成熟，生产效率以及良品率低导致成本较高。

(4) 器件效率还有待提高。

除了开发低成本、高效率、高良品率的 OLED 生产设备，以上短板是因为 OLED 研究领域中尚有很多关键问题没有真正得到解决，尚需理清的基础问题分布在发光材料的优化、彩色化技术、制膜技术、高分辨显示技术、有源驱动技术、封装技术等方面，包括高效稳定发光材料制备、彩色化实现方案、大面积成膜技术、高分子材料成膜均匀性等。要解决这一系列问题，改善 OLED 显示器应用的寿命短、效率低的瓶颈问题，促使 OLED 显示器大规模走向产业化，必须在材料结构、器件结构、制备工艺、封装工艺、驱动技术上不断完善创新，在工作原理、界面特性和老化机制等科学问题上不断地明晰夯实。除了通过分析器件结构与性能之间的关系提高器件性能，解决器件效率低、稳定性差和寿命短的关键在于解决材料效率低的问题，以及找到高性能封装材料。具体步骤如下：

(1) 明确材料结构和发光性能、载流子传输特性之间的关系，从而提高材料合成的可控性和确定性，调控材料的发光颜色、色纯度、载流子平衡以及能级匹配。

(2) 合成高性能封装材料，明确有机功能材料和器件退化之间的关系，有针对性地进行封装，从而提高器件稳定性和使用寿命。

1.2 OLED 的应用

OLED 应用方面，可以分为信息显示和固态照明两大应用领域，有代表性的应用产品如图 1-5 所示。在信息显示领域，10 in 以下的中小尺寸显示屏包括 PMOLED 和 AMOLED，可广泛用于体温计等医疗用仪器仪表、智能手表等穿戴式产品以及 MP3、MP4、智能手机、数码相机、笔记本电脑等各种个人移动产品和显示终端上。目前，AMOLED 显示屏的应用已经非常成熟，相关产品已经品牌化，其中三星 Galaxy 系列智能手机和笔记本电脑已经得到普及，其市场占有率超过苹果系列产品。此外，AMOLED 显示产品研发迅速扩展到了华为、联想、HTC、诺基亚等著名智能终端品牌。

目前 AMOLED 已经应用于 10 in 以上的中、大尺寸显示屏，包括笔记本电脑、电脑显示器和电视机等；相比基于 AMOLED 显示屏的笔记本电脑和电脑显示器的研发和产品推广还处于探索阶段，AMOLED 在电视产品领域上的产业化已经被开启，并引起了业内的极大关注和好评。其中，LGD 和 SMD 的 55 in OLED 电视已经上市，65 in、77 in 等 OLED 电视也已成功研发。随着大尺寸 OLED 良品率的提升和成本的下降，可以预见，OLED 电视产品将在近 5 年内得到迅速推广。

OLED 显示屏特有的优势使其能够实现多种功能满足不同特殊需求，其应用产品包括头盔显示器、透明显示器、双面显示器、可卷曲的柔性显示器，以及用于航空航天及军事等在恶劣环境下工作的显示系统。美国 eMagin 是全球最早生产 OLED 微显示器的



图 1-5 OLED 应用领域

企业，其产品已在民用领域得到应用，包括民用监控、模拟训练、医疗、游戏娱乐等领域；OLED 透明显示器和双面显示器具有一定的应用想象空间，比如用于汽车玻璃或商场橱窗等，韩国已开发出这方面的概念产品，但尚未商业化；OLED 柔性显示器是最具竞争潜力的发展方向，目前 LGD 和 SMD 先后均推出了 OLED 曲面显示器，基于这一 OLED 柔性显示器的雏形，业界正在研究可卷曲、折叠的 OLED 柔性显示器。

在所有军事应用的信息显示器件中，LCD 显示器由于其历经长时间发展技术成熟而独占鳌头，占目前军用显示器总量的 70% 以上，被广泛装备于兵器和军用设施上。相比 LCD，OLED 显示器在军事应用中尚处于小规模研发试用阶段，但 OLED 显示系统的优点中以下几点有效地避免了 LCD 显示器在航空航天、军事应用中迫切需要解决的问题，使其更适合在航天、军事等恶劣环境、运动状态下工作，与 LCD 相比，OLED 具有以下 5 个方面的优点。

(1) 耐冲击、抗震动。OLED 为全固态器件，相比液晶可以承受更大的冲击、震动和加速度。

(2) 宽温度特性。LCD 显示器由于液晶的限制，其正常工作温度要求 0°C 以上，OLED 显示器的工作温度下限为 -10°C ，经过特殊处理后可在 -40°C 正常工作。

(3) 低功耗。OLED 显示器为主动发光，无须背光源，驱动电压低，发光效率高，因而功耗相比 LCD 显示器大幅下降。

(4) 宽视角。LCD 显示器的视角不超过 110° ，OLED 显示器的视角通常可达 160° ，更适合空间受限、视角受限的军用场所。

(5) 快速响应。OLED 显示器响应速度快，使其成为近距离显示应用的理想选择，眼睛的轻微移动不会造成残影引起图像失真。

OLED 显示器的航天、军事应用除了包括航空、机载、舰载、车载系统和预警系统中的显示设备,还涉及单兵作战显示系统。常见的单兵作战显示系统有枪械瞄准器、成像仪和头戴式显示器(head mount display, HMD)等,如图 1-6 所示,按照用途分类包括应用现实增强技术的微显示器,应用红外成像技术的夜视设备,应用虚拟现实技术的虚拟任务训练系统。在军用 OLED 显示器的研发与应用方面,美国与日本居于世界领先地位。早在 1997 年,日本先锋公司就研制出一种分辨率为 256×64 像素的 OLED 绿光器件,供日本军队用于汽车无线电通信。作为全球最早生产 OLED 微显示器的企业,美国 eMagin 公司生产的军用微显示器包括美国军方的单兵作战系统、战斗机飞行员的头盔显示器。美国 DARPA 和宇宙显示公司联合开发将可卷曲 OLED 显示器应用在 HMD 上供单兵携带,其研发的对敌定位显示系统能迅速改变显示内容,实现兵器伪装;当应用于作战飞机底部时,能动态显示天空背景,极大地提高了作战飞机的光学隐蔽性。



图 1-6 OLED 在军事中的应用

在固态照明领域, OLED 照明与 LED 照明同属于半导体照明,但是 OLED 照明具有面光源、不需导光板、颜色可调、没有紫外线辐射、可制作柔性照明面板等特性,使 OLED 普通照明、装饰照明的应用更有魅力。例如,与书画艺术结合,制作 OLED 装饰照明面板。OLED 照明器件没有固定的形状,可以按照需求自由设定照明灯具的形态,包括与荧光灯一样的线形态,与 LED 灯泡一样的点形态,以及与墙纸类似的面板形态,实现适合周边环境的多样化设计,继而使照明利用效率变得更高。这种作为更为人性化的 OLED 照明技术,其应用上的无限可能性是其他光源技术无法超越的。

总之,基于 AMOLED 的小、中、大尺寸显示屏,以及柔性显示、透明显示、便携式和穿戴式显示使其应用空间广阔,并满足不同信息显示的需求;同时,基于 OLED 的普通照明、装饰照明使得照明产品更多样化。因此, OLED 技术相比其他任何显示技术