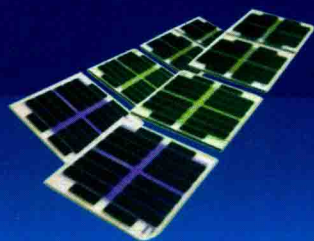
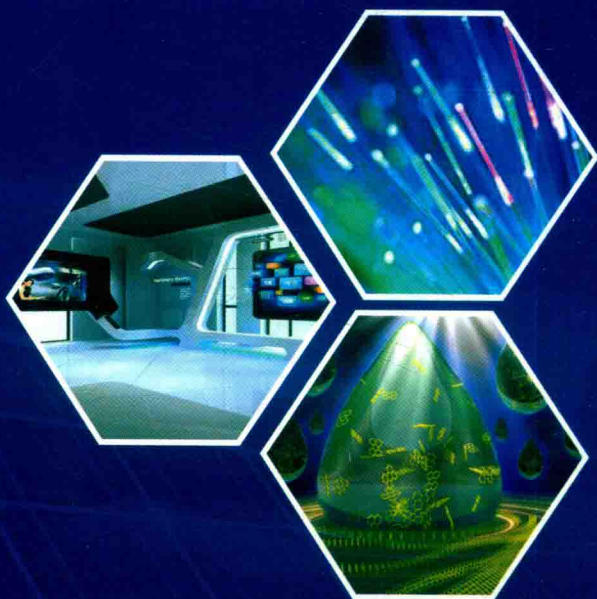


曲大龙◎著



热退火对 有机光电器件性能的影响

EFFECT OF THERMAL ANNEALING ON
THE PERFORMANCE OF
ORGANIC OPTOELECTRONIC DEVICES



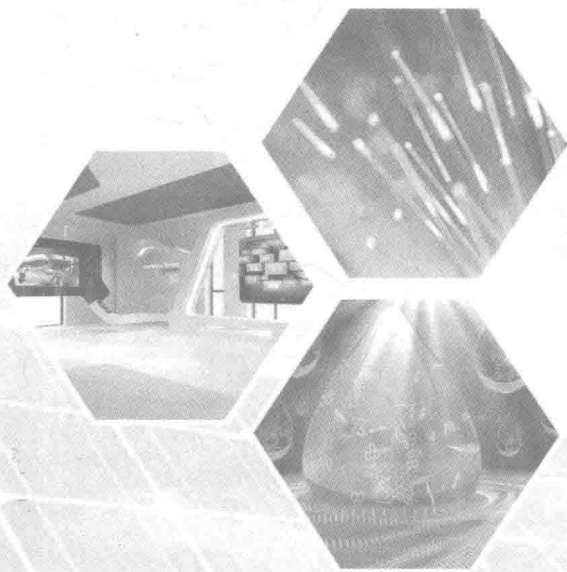
经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

感谢吉林工程技术师范学院专著基金资助

曲大龙◎著

热退火对 有机光电器件性能的影响

EFFECT OF THERMAL ANNEALING ON
THE PERFORMANCE OF
ORGANIC OPTOELECTRONIC DEVICES



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

热退火对有机光电器件性能的影响/曲大龙著. —北京: 经济管理出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5096-6229-8

I. ①热… II. ①曲… III. ①退火—影响—光电器件—研究 IV. ①TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 273178 号

组稿编辑: 宋 娜

责任编辑: 宋 娜 田乃馨 张馨予 张艳玲

责任印制: 黄章平

责任校对: 赵天宇

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn

电 话: (010) 51915602

印 刷: 三河市延风印装有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 8.5

字 数: 162 千字

版 次: 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-6229-8

定 价: 98.00 元

· 版权所有 翻印必究 ·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

作者简介

曲大龙，男，汉族，1976年10月生于吉林省榆树市。1995年考入吉林大学电子工程系电子材料与元器件专业，2008年和2015年先后两次分别于德国InWEnt和德国Hochschule Neubrandenburg进修学习，2011年至2018年于吉林大学电子科学与工程学院微电子学与固体电子学专业攻读博士学位。现就职于吉林工程技术师范学院信息工程学院。

组稿编辑：宋 娜

责任编辑：宋 娜 田乃馨 张馨予 张艳玲

封面设计： 品牌设计
00532505444

前 言

有机光电器件由于其具有制备工艺相对简单、材料合成简单、低成本、绿色环保等优点，成为广大科研工作者的研究重点。并且，有机光电器件便于实现大尺寸、柔性的独特优势，使其成为近年来学术界和产业界共同关注的热点。例如，有机电致发光二极管（Organic Light Emitting Diode, OLED）已经在显示领域形成了巨大的产业规模，且随着研究的深入，OLED 在照明领域同样展示出强大的潜力；新兴的量子点发光二极管（Quantum Dot Light Emitting Diodes, QLED）在制备工艺、器件物理方面与 OLED 有着极大的关联性，并且基于有机材料的功能层在 QLED 结构、性能优化上发挥着关键作用；低成本、高效率的有机光伏电池（Organic Photovoltaic, OPV）在如今这个能源时代有着重要的研究意义；有机光电探测器（Organic Photodetector, OPD）良好的生物兼容性，在开发低成本的民用、商用探测器上拥有优势。总的来说，研究出低成本、低功耗、高效率、高稳定性的有机光电器件是这一领域研究者追求的目标。本书立足于有机光电器件，重点探索热退火工艺对器件性能的影响，从有机薄膜成膜性以及有机功能层界面变化的角度揭示其内在的物理机制，结合新材料体系与器件结构优化设计的交叉研究，改善有机光电器件的性能，具体内容包括以下几个部分。

首先，我们进行了使用胶体量子点作为发光材料、有机小分子和聚合物材料作载流子传输层的高性能、低成本的新型电致发光器件的研究。设计出 ITO/PE-DOT: PSS/poly-TPD/QLED/Alq₃/LiF/Al 的多层结构（三元量子点材料摩尔比为蓝：绿：红 = 96：5：1）。并且提出采用热退火工艺处理量子点发光层的方法，利用共聚焦显微镜在纳米尺度进行空间分辨率图像分析与光谱分析，解析了量子点薄膜光学特性和量子点材料超分子排列之间的关联。量子点发光层经过热退火工艺处理后，其存在的空间空位在热诱导下能够被量子点更均匀地填充。我们通过对量子点发光层进行热退火处理，成功地改善了其薄膜形态学特性，并且电子传输层 Alq₃ 的发光经过热退火后被有效地抑制了，避免了其在合成白光时产生的不利影响。成功地获得了光谱平衡的白光发射，CIE 色度坐标值为（0.39，

0.45), 在亮度 $100\text{cd}/\text{m}^2$ 时显色指数 CRI 达到了 71.4。

其次, 我们进行了基于四甲基酞菁铜 (CuMePc) 的有机光伏器件 (OPV) 的研究。一般情况下, 平面异质结结构的 OPV (PHJ-OPV) 在主要性能上 (主要包括开路电压 V_{oc} 、短路电流 J_{sc} 、填充因子 FF、光电转换效率 PCE) 差于体异质结结构的 OPV (BHJ-OPV), 但平面异质结 OPV 具有制备方法相对简单的优点, 因此, 我们提出了利用热退火工艺处理 PHJ-OPV 改善器件性能的设计思想, 系统地研究了 OPV 各个主要性能参数受热退火温度变化影响的规律。从薄膜形貌上看, 经过热退火后的 MoO_x 、 V_2O_5 缓冲层能够抑制泄漏电流。同时, 经过热退火处理的 CuMePc 会发生晶化现象, 其晶化程度可通过退火温度来控制, 晶化后的 CuMePc 不仅吸收光谱会略有增强且向红光方向扩展, 增强了对光的吸收, 而且空穴迁移率也有所提高, 改善了空穴的传输能力。重要的是 CuMePc 的结晶增大了给体/受体 (D/A) 界面接触, 从而产生了类似于体异质结的结构, 还避免了体异质结中容易形成隔离团簇而造成的“孤岛效应”。通过热退火处理优化后的 PHJ-OPV 性能 (PCE=3.35%、 $J_{sc}=9.85\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=0.533\text{V}$ 、FF=63.8%) 不仅优于同结构未采用热退火处理的器件, 还优于结构相似的 BHJ-OPV。在 OPV 研究的基础上, 我们开展了基于热退火处理改善红光 OPD 器件性能的研究工作。利用阳极间隔层 m-MTDATA: MoO_x 产生的电荷转移络合物 (charge transfer complex) 不仅能够使该层材料承受较高温度的热退火处理而没有结晶, 还能使这一有机功能层在长波段的透射率增加, 进一步增强器件的光电流。我们还发现热退火处理后的有源层材料 CuMePc 结晶使其自身缺陷减少, 从而降低了器件的暗电流。最后制备的基于热退火处理的平面异质结 OPD 相比未热退火时暗电流降低了 67%, 光电流增加了 126%, 明暗电流比提高了 578%。

最后, 我们进行了有机电致发光器件的研究。我们引入新型主体材料 SFX2PO, 利用其较高的三线态能级 (T_1) 和较高的空穴迁移率, 制备基于磷光染料 FIrpic 的蓝光磷光器件 (PhOLED), 并且研究了采用热退火工艺对该体系的蓝光 PhOLED 性能的影响, 在总结规律、阐释机理之外, 实现了通过调整器件结构和热退火温度来改善 PhOLED 发光性能的目的。优化后的器件最大亮度达到 $9920\text{cd}/\text{m}^2$; 器件色稳定性得到改善, 亮度从 $10\text{cd}/\text{m}^2$ 到 $5000\text{cd}/\text{m}^2$ 色度坐标值仅从 (0.15, 0.28) 漂移到 (0.17, 0.29), 器件的最大电流效率为 $21.68\text{cd}/\text{A}$, 最大功率效率为 $16.65\text{lm}/\text{W}$, 对应最大外量子效率为 12.34%。

目 录

第 1 章 绪论/1

- 1.1 有机光电材料的起源与发展/2
- 1.2 有机光电器件的研究进展/3
 - 1.2.1 有机电致发光器件的研究进展和产业化现状/3
 - 1.2.2 量子点发光二极管 (QLED) 的研究进展/7
 - 1.2.3 有机光伏电池 (OPV) 的研究进展/8
 - 1.2.4 有机光电探测器 (OPD) 的研究进展/10
- 1.3 热退火对有机光电器件性能的影响/15
- 1.4 本章小结/15

第 2 章 热退火处理三元 CdSe/ZnS 量子点白光 LED 的研究/18

- 2.1 简述量子点发光二极管/18
- 2.2 本章的主要研究内容及创新点/21
- 2.3 实验部分/22
 - 2.3.1 实验中涉及的材料/22
 - 2.3.2 器件的制备与测试/22
- 2.4 结果与讨论/23
- 2.5 本章小结/26

第 3 章 热退火对基于 CuMePc/C60 平面异质结光伏电池和光电探测器性能影响的研究/28

- 3.1 引言/28
- 3.2 实验制备与测试方法/31
 - 3.2.1 实验用到的材料/31

- 3.2.2 器件制备工艺/31
 - 3.2.3 器件结构/32
 - 3.2.4 测试表征方法/32
 - 3.3 实验结果与讨论/33
 - 3.3.1 热退火对带有 MoO_x 阳极缓冲层的平面异质结 OPV 器件性能影响的研究/33
 - 3.3.2 热退火对带有 V_2O_5 阳极缓冲层的 OPV 器件性能影响的研究/35
 - 3.3.3 热退火温度的优化/38
 - 3.4 $\text{CuMePc}/\text{C60}$ 平面异质结在光电探测器中应用的探索/39
 - 3.4.1 OPD 的主要性能参数及器件设计/40
 - 3.4.2 OPD 的实验制备与测试方法/41
 - 3.4.3 OPD 的实验结果与讨论/42
 - 3.5 本章小结/50
- 第4章 热退火处理基于磷氧型主体材料 SFX2PO 的蓝色磷光电致发光器件的研究/52
- 4.1 OLED 的理论基础/52
 - 4.1.1 有机电致发光材料的基本性质和分子轨道理论/52
 - 4.1.2 有机电致发光材料的能态/54
 - 4.1.3 荧光与磷光/54
 - 4.1.4 OLED 的工作原理/55
 - 4.2 热退火处理基于磷氧型主体材料 SFX2PO 的蓝色磷光 OLED 的研究/55
 - 4.2.1 实验制备与测试方法/57
 - 4.2.2 实验结果与讨论/59
 - 4.3 本章小结/67
- 第5章 总结/68
- 参考文献/70
- 习题/87

第 1 章 绪 论

人类到目前为止经历了三次工业革命，18 世纪第一次工业革命是以蒸汽机作为动力机被广泛使用为标志，使机器代替了繁重的手工劳动。19 世纪中期第二次工业革命是以电力的广泛应用为标志，使人类进入了电气时代。进入 21 世纪以来，第三次工业革命是以新材料、新能源和信息技术等为标志，使人类的生产生活发生了巨大的变化。现在人们对新科技的追求与探索欲望日益强烈，沃特·布拉顿 (Walter Brattain)、约翰·巴丁 (John Bardeen)、威廉·肖克莱 (William Shockley) 于 1947 年在贝尔实验室发明了世界上第一只点接触型晶体管，人们以无机半导体材料如硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs) 为基础，开创了现代信息产业。随着信息产业蓬勃发展以及在各个领域的广泛应用，人们对半导体材料以及其制作的器件的成本和功能的要求越来越高，无机半导体材料较为单一，器件的制备工艺较为复杂，很难全面地满足人们对电子器件性能和价格的越来越高的要求^[1]，而采用有机材料制作的有机光电器件具有原材料来源广泛、合成简单、可实现柔性、环境友好等优势，而且有机光电器件很容易与现在已经很成熟的硅基电路相兼容，所以无论是科研学术领域还是产业界都把其列为研究和开发的重点，从而推动有机电子学更快地发展^[2]。

有机光电器件包括有机电致发光器件 (OLED)、量子点发光二极管 (QLED)、有机光伏太阳能电池 (OPV) 和有机光电探测器 (OPD) 等。OPV、OPD 和 QLED 的研究越来越迅速，OLED 已经从实验室走向了市场，在全球巨大的需求下形成了较大的生产规模，市场上出现的各种各样的 OLED 产品以其高效、低污染和环境友好的优点得到了广大消费者的认可，非常适合现在社会所强调的“绿水青山”的发展潮流。

本章将从 OLED、QLED、OPV 和 OPD 这几个方面介绍有机光电材料与器件的起源与发展现状，特别是 OLED 已经实现产业化，在社会上形成了巨大的需求，使其蓬勃发展。OLED 技术的成熟也必然会带动使用相同或相近材料和技术的 QLED、OPV 和 OPD 等其他有机光电器件的迅猛发展，所以本章将着重介绍此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

OLED 的产业化进程和发展现状, 并介绍 OLED、QLED、OPV 和 OPD 的科研现状, 最后提出要研究的内容。

1.1 有机光电材料的起源与发展

有机材料作为人们生产生活中常见的材料很早就被广泛地应用到制药和化工等领域, 但其光电特性是直到 1953 年法国科学家 Bernanose 等观测到了有机染料的电致发光现象^[3] 才发现。Bernanose 于 1955 年用 500~2000V 的电压分别施加在沉积在纤维素薄层的吡啶橙 (acridine orange) 以及奎纳克林 (quinacrine) 上, 观测到了有机电致发光现象^[4]。1963 年, 来自美国陶氏化学公司 (The Dow Chemical Company) 的 Pope 等, 用多环的芳香族有机化合物制备了电致发光单元, 并申请了世界上第一个电致发光器件的专利^[5]。之后 Helfrich^[6]、Lohmann^[7] 和 Williams^[8] 等又相继报道了用葱、萘等稠环芳香族化合物有机材料制备的电致发光器件, 但都由于器件较高的驱动电压 (大于等于 100V) 和要求使用有机单晶材料等因素而没能引起人们的重视。直到 1982 年, Vincett^[9] 等用真空沉积法得到了驱动电压低于 30V 的有机电致发光器件。同年, 美国 Kodak 公司的 C. W. Tang^[10] 也采用相同的方法制作了有机电致发光器件。1985 年, Vanslyke 和 C. W. Tang 用真空沉积法制备了含有空穴传输层和发光层的双层结构器件, 在 20V 的电压下获得了 1700cd/m² 的绿光发射^[11]。1987 年, C. W. Tang 与 S. A. Van Slyke 发表了关于有机电致发光器件的文章^[12], 制备了基于 8-羟基喹啉铝 (Alq₃) 发光的双层 OLED 器件, 器件结构为 ITO/Diamine/Alq₃/MgAg, 使器件的驱动电压降到 10V 以内, 亮度超过 1000cd/m², 器件最大外量子效率超过 1%。这种以有机材料制作光电器件的方法点燃了全球科研工作者对有机光电器件的研究热情, 同时期, 有机聚合物材料在光电器件领域的性能也引起了人们的重视, 使用有机聚合物材料制作的电致发光器件 (PLED) 也取得了重大的进步。1990 年, A. B. Holmes 等成功地用溶液法制备了 PLED^[13]。1994 年, UNIAX 公司的 I. D. Parker 和 AT&T Bell 实验室的 H. H. Kim 也共同报道了关于 PLED 的研究工作^[14]。自此以后, 有机材料在光电领域, 特别是在有机电致发光方面的研究进入了快速发展阶段, 无论是在材料合成还是在器件结构的开发方面, 经过 30 多年的发展, 有机电致发光器件的各项性能指标不断被刷新。同时, 有机材料在其他光电领域的应用也越来越受重视, 有机光伏太阳能电池 (OPV)、有机光电探测器 (OPD) 和量子点发光二极管 (QLED) 的研发已经取得了较大进展, 有机材料因其具有环保、材料来源广泛、合成简单等诸多优点而在光电领域

成为了众多科研工作者的“宠儿”。

1.2 有机光电器件的研究进展

1.2.1 有机电致发光器件的研究进展和产业化现状

在有机光电器件中有机电致发光器件发展最快，也最成熟。1992年，美国科学家 Alan Heeger 教授等在塑料衬底上沉淀了高分子聚合物制作了世界上第一种柔性可弯曲的显示器^[15]。而吉林大学马於光教授带领的研究组发现了有机重金属铱 (Os) 和铱 (Ir) 配合物的电致磷光发光现象，几乎同时这种现象也被美国 S. R. Forrest 的研究组发现^[16,17]，电致磷光的发现使 OLED 内量子效率突破了 25% 的限制，理论极限达到 100%，自此高效 OLED 的研究和开发越来越快。

早期由于有机发光材料的稳定性不好，制约了 OLED 的产业化发展。随着各种新的有机光电材料的不断涌现和新的器件结构的出现，使 OLED 分别在照明和显示领域都展现出了卓越的前景。新的材料体系和新的器件结构被开发出来，新的生产工艺被采用，新的理论被提出，其中一些代表性的研究工作如 1988 年，C. Adachi 等提出的“三明治”结构模型^[18]；1995 年，J. Kido 等报道了利用 RGB 三基色染料制作的白光 OLED (WOLED)^[19]；2000 年，比利时 J. L. Brédas 等对共轭聚合物 PLED 中单线态、三线态激子的形成机制做了研究工作^[20]；2009 年，K. Leo 等报道了采用了 p-i-n 电学掺杂技术及光取出技术的高效 WOLED^[21]；2011 年，Z. H. Lu 等报道了高性能柔性 OLED 的相关工作^[22]，Lee C. C.^[23] 和 Song J.^[24] 等也在柔性器件的研究上做了大量工作。

目前，人们对 OLED 的研究不仅仅是在科研领域，而且已经实现产业化。很多世界 500 强的化学以及电子领域的企业和一些国家政府机构都已经在 OLED 的研究领域投入了巨大的资金和人力，更加推动了 OLED 的飞速发展。产生这一局面的根本原因是市场的巨大需求，根据科尔尼管理咨询公司 (A. T. Kearney) 的统计数据，预计 OLED 市场需求在 2022 年将超过 11 亿片屏幕 (1650 万平方米)，其中手机和电视是最主要的 OLED 增长因子^[25]。

1.2.1.1 显示屏技术的发展历程

显示屏在经历了 CRT、LCD 等技术变革后，正在步入第三次技术变革热潮，如图 1-1 所示，OLED 将有望成为显示屏领域的主导技术。

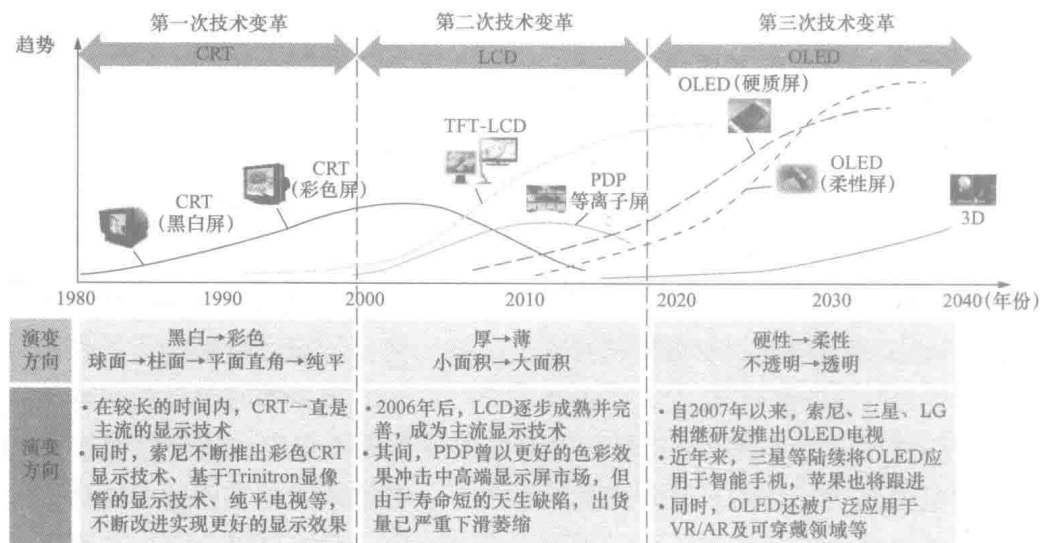


图 1-1 显示屏技术的发展历程

1.2.1.2 OLED 在显示领域的优势

如图 1-2 所示，OLED 的器件结构与发光原理与 LCD 有本质上的差异，OLED 的制作工艺比 LCD 简单，而且 OLED 是有机体自发光，这样使 OLED 具有轻薄、可柔性、响应速度快和节能环保等优点。

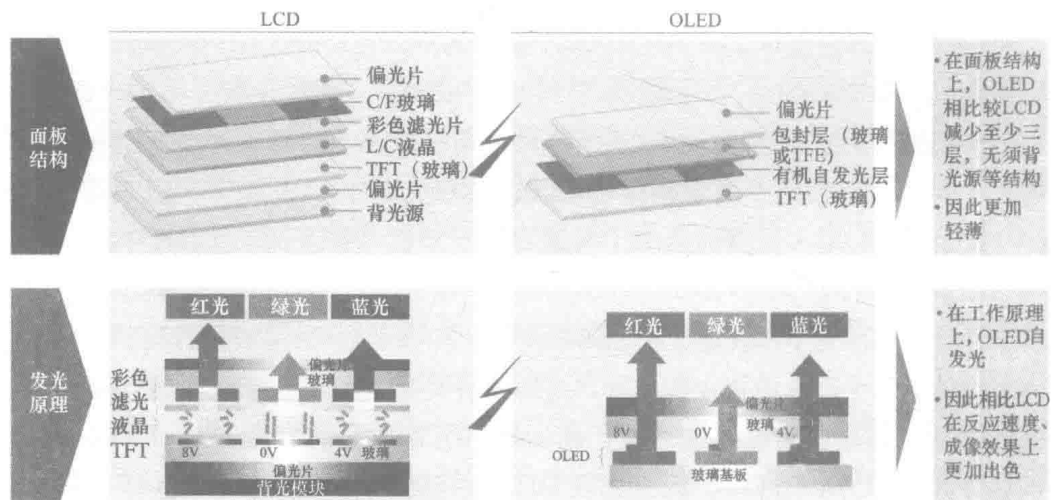
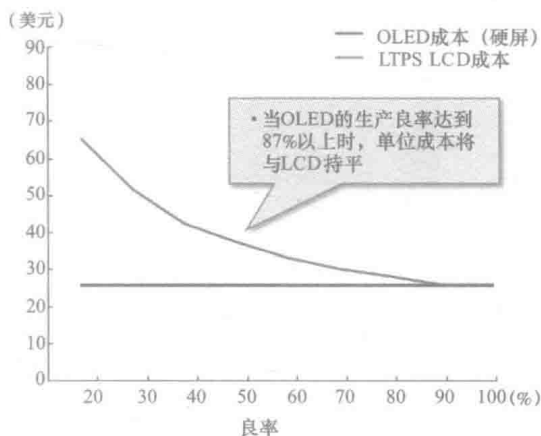
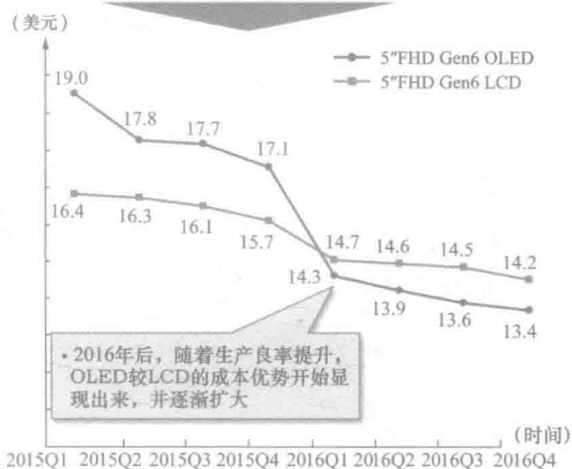


图 1-2 OLED 与 LCD 的结构与工作原理对比

随着良品率的提升，OLED 的制作成本将低于 LCD 的制作成本，量产的潜力正在加快释放。OLED 与 LCD 的生产成本与良率的关系如图 1-3 所示（数据来源于科尔尼管理咨询公司^[25]）。



(a) 单位生产成本与良率的关系曲线



(b) 单位生产成本的逐年下降趋势

图 1-3 OLED 与 LCD 的生产成本与良率的关系

由于需求量巨大，在未来五年，显示屏市场将发生结构性的变化，OLED 将赢得近 1/3 的市场份额。如图 1-4 所示，未来 OLED 将大规模投入手机、电视、可穿戴设备等下游市场。随着 OLED 屏幕的市场占有率逐渐上升，显示屏市场格局将发生结构性变化。

1.2.1.3 全球 OLED 厂商生产线布局

目前，JDI（日本显示器公司）、LG Display 和在 OLED 领域占绝对优势的三星等国际知名企业都在各地进行产线扩建或是新建产线^[26-28]。我国的一些 OLED 企业也在各地积极地进行产线建设。我国现有的和在建的生产线如表 1-1 和表 1-2 所示。

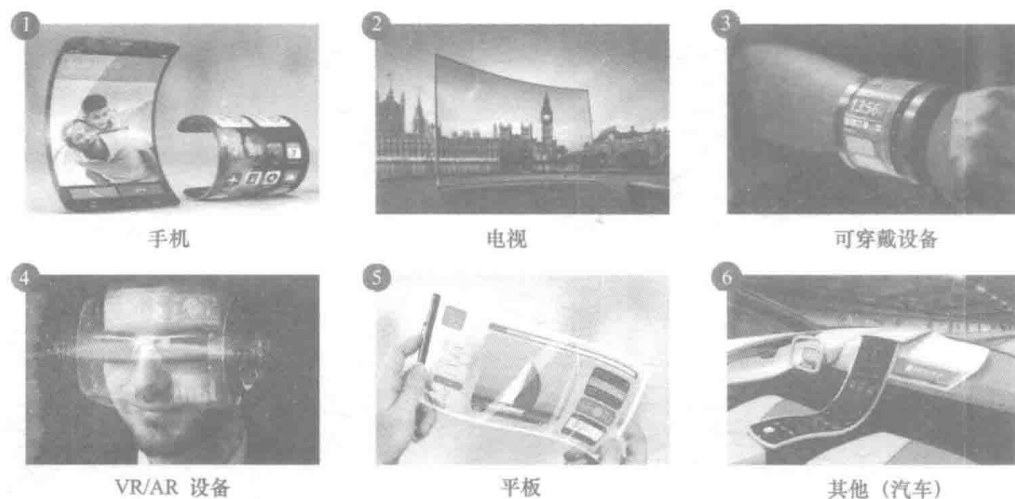


图 1-4 OLED 的各种应用

表 1-1 我国现有 OLED 产线

企业名称	产线类型	生产地点
京东方	5.5 代刚性 OLED 产线	鄂尔多斯
	8.5 代试验 OLED 产线	合肥
	5 代 OLED 产线	北京
	4.5 代 OLED 产线	成都
华星光电	刚性 OLED 产线	武汉
信利	4.5 代 OLED 产线	惠州
	6 代柔性 OLED 产线	惠州
天马	4.5 代 OLED 产线	上海
和辉光电	4.5 代 OLED 产线	上海
维信诺	5.5 代 OLED 产线	昆山
友达	3.5 代 OLED 产线	桃园
	4.5 代 OLED 产线	新加坡

表 1-2 我国在建 OLED 产线

企业名称	产线类型	生产地点	设计产能 (万片/月)
京东方	6 代柔性 AMOLED 一期产线	成都	4.8
	10.5 代 AMOLED 产线	合肥	4.5
	6 代柔性 AMOLED 二期产线	成都	4.9
	6 代柔性 AMOLED 产线	绵阳	4.8

续表

企业名称	产线类型	生产地点	设计产能 (万片/月)
华星光电	6代柔性 AMOLED 产线	武汉	4.5
信利	4.5代 AMOLED 产线一期	惠州	1.5
	5.5代 AMOLED 产线二期	惠州	3
天马	6代柔性 AMOLED 产线	武汉	3
国显光电	6代 AMOLED 产线	固安	3
和辉光电	6代 AMOLED 产线	上海	3
柔宇科技	柔性 OLED 产线	深圳	10
鸿海/夏普	4.5代 OLED 试验线	高雄	4
	6代 OLED 产线	高雄	3
	6代 OLED 产线	高雄	3

OLED 生产线的代数由基板尺寸大小界定, 5 代线、6 代线主要用于中小屏, 8 代线以上主要用于电视。OLED 生产线对应基板尺寸及应用如图 1-5 所示。

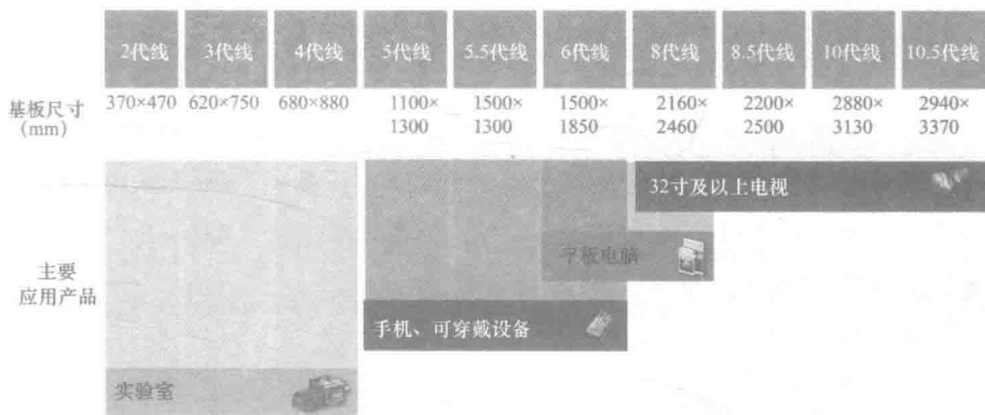


图 1-5 几种代表性 OLED 生产线对应基板尺寸及应用

注: 基板尺寸没有完全统一的标准, 不同厂商定义会略有偏差。

综上所述, OLED 以其轻薄、可柔性、面光源、低成本等优势, 受到全世界 OLED 企业的重视。我国的 OLED 企业在 OLED 科研上投入了大量资金, 在 OLED 的基础研究和产业化发展方面做了大量的工作, 而且我国在 OLED 领域还有丰富的人才储备, 相信在不久的将来一定会取得更为杰出的成绩。

1.2.2 量子点发光二极管 (QLED) 的研究进展

量子点 (Quantum Dot, QDs) 又称半导体纳米晶, 呈近似球形, 因其三维尺

寸在纳米数量级而具有明显的量子效应。量子点既可由一种半导体材料组成，也可以由两种或两种以上的半导体材料组成核/壳结构，如 CdTe/CdS^[29]、CdSe/ZnS^[30]、CdS/ZnO^[31]等。由于量子点的纳米性质使其在包括光电器件在内的许多领域都有广阔的应用前景^[33-37]。

目前，对于量子点的研究水平较高的国家有美国、日本等，我国正在努力追赶，并且已经在低维半导体物理和缺陷物理研究方面取得了突破。

1.2.2.1 量子点发光二极管 (QLED) 发展历程

近几十年来，量子点的光电特性被广大科研工作者列为研究重点之一。2000年，Bell等在激光二极管中应用量子点，提高了二极管工作电流。同年，Benjamin实现了利用量子点单光子发射加密通信。2003年，Liu等把量子点应用于红外光电探测器。2004年，Gessmann等用量子点制备了蓝色光、绿色光、紫外光以及白光发光二极管。2005年，室温下可发光的激光晶体管被Holonyak等应用量子点制备成。对于量子点发光特性，发现量子点的粒径、量子点薄膜的厚度和先后顺序都对白光质量有重大影响。2007年，Demir使用青光、绿光、黄光、红光的核壳结构CdSe/ZnS的量子点作为荧光粉，制备出了色温和显色指数不同的WLED^[38]。Kim等使用CdS:Mn/ZnS核壳量子点作为WLED的红色荧光粉，制备了补偿之后显色指数达到85的WLED^[39]。2010年，Jang等通过包裹壳层的方法制备了结构为CdSe/ZnS/CdSZnS的量子点，量子产额将近100%，绿光和红光的外量子产额更是高达72%和34%，流明效率达到了41lm/W^[40]。

1.2.2.2 量子点发光二极管 (QLED) 的优点

量子点发光二极管有以下几个优点。

- (1) QLED 激发光谱宽。
- (2) QLED 的发射光谱可通过改变它的粒径大小来调控。
- (3) QLED 具有较大的斯托克斯位移 (Stokes shift)，荧光光谱窄 (半峰宽约 15~35nm) 而且对称性好。
- (4) QLED 光稳定性和化学稳定性好。

1.2.3 有机光伏电池 (OPV) 的研究进展

在现今社会，人们对能源的需求量越来越大。现在广泛被使用的能源大多为不可再生能源，由于储量有限以及环境污染等问题^[41-44]，使人们对可再生的清洁能源越来越重视。太阳能是非常好的清洁能源，它因具备储量丰富，不存在运输问题，可以就地储存利用和环保等优点^[45]而被人们广泛应用。