

有机电致发光器件中有机薄膜的制备方法

张新稳¹, 吴朝新², 任兆玉¹, 侯 洵²

(1. 西北大学光子学与光电技术研究所, 陕西 西安 710069;

2. 西安交通大学陕西省信息光子技术重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要:有机电致发光器件中有机薄膜的制备方法非常重要,不同方法制备的薄膜质量不同,这直接影响着器件的效率;制备方法直接影响到产业化中的器件制备成本。根据材料的不同,有机小分子常用真空蒸镀的方法,而高分子材料常用旋涂的方法制备薄膜。随着有机电致发光器件制备工艺的发展,相继出现了其他的制备工艺,如:有机蒸汽喷印(organic vapor jet printing)、有机气相沉积(organic vapor phase deposition)、丝网印刷(screen printing)和喷墨打印(ink jet printing)技术等,这对有机电致发光显示器产业化发展具有巨大的推动作用。文章综述了这些制备方法,比较了它们的优缺点,以及这些工艺对产业化的影响。

关键词:有机电致发光;有机薄膜;制备方法

中图分类号:O469

文献标识码:A

Depositions of Organic Thin Film in Organic Light Emitting Devices

ZHANG Xin-wen¹, WU Zhao-xin², REN Zhao-yu¹, HOU Xun²

(Institute of Photonics & Photo-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

Key Laboratory of Photonics Technology for Information, Shanxi Province, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The deposition of organic thin film is very important in organic light emitting devices, which directly affects the quality of thin film, efficiency and cost of device. The depositions of organic thin films in organic light-emitting devices are introduced, such as the vacuum thermal evaporation, spin coating, ink jet printing, screen printing, organic vapor phase deposition, and organic vapor jet printing. The merits and shortcoming of these depositions are discussed.

Keywords: organic light emitting; organic thin film; methods of deposition

引言

有机电致发光的研究开始于 20 世纪 60 年代。最早关于有机电致发光的研究论文发表于 1963 年, pope 等人^[1]在蒽单晶片的两侧加直流电压, 首次观察有机化合物的 EL 现象。但直到 1987 年, 美国柯达公司 C.W.Tang^[2]用 8-羟基喹啉铝(Alq_3)作为发光层, 制成了高亮度 ($>1,000\text{cd/m}^2$), 高效率 (1.5lm/W) 绿色有机电致发光薄膜器件, 其驱动电压降到了 10V 以下, 从而取得了有机薄膜发光器件研究史上划时代的进展, 引起了人们对有机电致发光研究的关注^[3-4]。

有机 EL 器件存在巨大的吸引力在于它具有以下的特点^[5]: (1) 采用有机物, 材料选择范围宽, 可实现从蓝光到红光的任何颜色的显示; (2) 驱动电压低, 只需 3~10V 的直流电压; (3) 发光亮度和发光效率高; (4) 全固化的主动发光; (5) 视角宽, 响应速度快; (6) 制备过程简单, 费用低; (7) 超薄膜, 重量轻; (8) 可制作在柔软衬底上, 器件可弯曲、折叠。因此有机电致发光显示器作为继 CRT 和液晶显示器之后的第三代显示器, 被认为是最有可能替代液晶显示器的技术。近几年来, 有机电致发光显示技术在应用需求的推动下取得了迅猛的发展, 在发光亮度、发光效率和使用寿命等方面均已接近和达到实际应用的需要。现在市场上已经出现了有机屏幕的 MP3 和手机等电子产品, 世界许多研究单位和著名的电子公司都投入到了有机电致发光显示器的研究和开发生产之中。

由于有机电致发光显示器具有巨大的应用前景, 要实现产业化就要求其制备工艺要简单, 以降低生产成本, 这就促进人们对其制备工艺的研究。有机电致发光器件的制备中有机薄膜的制备是十分关键的, 薄膜质量的好坏直接影响着器件的效率和亮度。根据材料的不同, 有机电致发光材料可分为两大类: 有机小分子和有机高分子。有机小分子常用真空蒸镀的方法, 而高分子材料常用旋涂的方法制备薄膜。随着有机电致发光器件制备工艺的发

展, 相继出现了其他的制备工艺, 如: 有机蒸汽喷印^[6-9] (organic vapor jet printing)、有机气相沉积^[10-19] (organic vapor phase deposition)、丝网印刷^[20-25] (screen printing) 和喷墨打印^[26-33] (ink jet printing) 等技术, 这对有机电致发光显示器产业化发展具有巨大的推动作用。

1 真空蒸发镀膜

真空蒸发镀膜常用来制备有机小分子电致发光器件, 其成膜质量均匀致密。真空蒸镀是把待镀的基片或工件置于高真空室内, 通过加热使蒸发材料气化(或升华)而淀积到某一温度的基片或工件的表面上, 从而形成一层薄膜^[34]。真空蒸发沉积薄膜具有简单便利、操作容易、成膜速度快、效率高等特点, 是薄膜制备中使用最为广泛的技术。真空蒸发沉积过程有三个步骤组成^[35]: (1) 蒸发原材料由凝聚相转变成气相; (2) 在蒸发源与基片之间蒸发粒子的输运; (3) 蒸发粒子到达基片后凝结、成核、长大、成膜。真空蒸发镀膜的真空度要求比较高, 当真空腔体内气体分子很少的时候, 不会使加热到高温的有机材料被氧化, 同时保证大部分有机分子在飞往基片表面的过程中不碰到其他气体分子而保持直线运动, 最后沉积到基片表面。真空度对成膜的影响非常大, 从而影响发光器件的性能。在其他条件相同的情况下, 真空度越高成膜质量越好, 薄膜中材料的纯度越高, 缺陷越少。

我们实验室用的是高真空多元蒸发镀膜机, 共有八个蒸发源, 各个蒸发源可以独立控制, 互不影响, 可以同时工作。每个蒸发源都有挡板, 可以随时控制蒸发源的开关。在基片的旁边有膜厚监测仪, 进行动态的膜厚实时监控。由于有机材料蒸汽压高, 蒸发温度低, 许多有机材料在蒸发温度高时可能产生分解, 因此必须对蒸发温度进行精确控制。另外蒸发速率也对成膜质量有很大的影响, 由于温度的变化将引起蒸发速率的显著变化, 要控制蒸发速率, 也要精确控制蒸发温度。特别是对掺杂的样品, 必须严格控制主体材料和客体材料的蒸发速

度。合适的蒸发速率是得到较高质量薄膜的前提,过快的蒸发速率容易导致分子排列的缺陷,易使薄膜产生针孔。

2 旋涂

旋涂是旋转涂布的简称,又称甩胶或匀胶。它是最早的一种薄膜制备工艺,在半导体工业等领域有着广泛的应用,是实验室薄膜制备的一种常用手段。聚合物电致发光器件的典型结构是单层薄膜夹心式结构,它是在导电玻璃ITO上先制备一层聚合物薄膜,再在其上真空蒸镀金属阴极。其中聚合物薄膜一般采用旋涂的方法来制备,这种方法制备聚合物薄膜具有工艺简单、成本低廉、便于操作等优点。

旋涂是将一滴提前配好的待涂聚合物溶液滴在基片的中央,高速旋转基片,大部分的溶液在离心力的作用下分散到基片的边缘,最后将大部分的溶液甩出,留下一层薄膜覆盖在基片上。旋涂一般包括三个步骤^[39]:配料、高速旋转、溶剂挥发成膜。配料又可分为:静态配料和动态配料。静态配料是直接把溶液滴于基片的中央,可根据溶液的浓度和基片的面积确定所滴溶液的量;动态配料是在基片低速旋转的同时滴下溶液,该方法可利用旋转将材料涂满基片,并且不需要事先将基片整体浸润而可以节省材料。配料完成后即可开始加速至相当高的转速,使涂层变薄以达到所需要的厚度。高速旋转后通常要把薄膜在真空条件下进行干燥,蒸发出薄膜内部残留的溶剂,增加薄膜的物理强度。

聚合物薄膜的厚度对聚合物电致发光器件的发光效率和驱动电压等光电性能具有很大的影响,控制好聚合物薄膜的厚度是很重要的。影响旋涂成膜厚度的因素很多:溶剂的类型、溶液的浓度、旋涂转速、旋涂时间等。关于旋涂成膜工艺已有很多文献报道^[37-43],从动力学分析到实验研究,对于不同的聚合物材料得出了一些经验公式^[39-39]。旋涂在制备单层聚合物电致发光器件发挥出他独特的优势,但在聚合物多层电致发光中却遇到一定的问题,在旋涂次层

聚合物层时很可能把前一层溶解。解决的办法就是选择不同的有机溶剂,次层聚合物的有机溶剂不溶或难溶前层聚合物。

3 有机蒸汽喷印

有机蒸汽喷印(简称OVJP)最早是在2004年美国普林斯顿大学的Forrest^[6-8]等人报道的。有机蒸汽喷印是一种直接、高效和快速沉积有机半导体薄膜的新方法,有机分子在高温的腔室内升华,从腔外注入热的情性传输气体(如: N_2 等),在腔内形成高温高压的有机分子和情性气体的混合气体。有机分子气体在情性传输气体的带动下通过微型喷嘴喷涂到腔外温度较低的基片上,有机气体分子遇冷很快凝聚形成一层有机分子薄膜。有机蒸汽喷印制备有机半导体薄膜工艺简单,与真空蒸发镀膜和旋涂制膜相比更节省原材料。与喷墨印刷相比它是一种干法气相制膜过程,用情性传输气体代替了液体溶剂,直接把有机气体分子喷涂到基片上。有机分子和溶剂的不相容性和其他问题限制了喷墨打印的应用,这种新的制备薄膜的方法避免了这个问题。有机气相喷印可以直接喷印图案,不需要掩模板。

薄膜的厚度和面积可以通过调节腔外的喷嘴直径、喷嘴距基片的距离、腔内外的压强差和有机分子和传输气体分子的质量比来控制^[6]。这些因素直接影响着薄膜的厚度和大小,其他条件不变的情况下,大的喷嘴直径得到的薄膜厚度和宽度较大;喷嘴离基片的距离越小薄膜的均匀性越好,边界影响越小。Forrest小组2005年报道的用有机气相喷印制备的荧光OLED器件^[8],NPD为空穴传输层, Alq_3 为电子传输层和发光层,其结构为ITO/60nm NPD/60nm Alq_3 / 0.8nm LiF / 60nm Al,器件的外量子效率达到 $0.84 \pm 0.03\%$,与真空蒸发制备的器件外量子效率是一致的。有机气相喷印不仅用于OLED的制备,也可以用于有机薄膜晶体管、有机薄膜太阳能电池等有机薄膜的制备,其专利技术由美国普林斯顿大学的Forrest等人掌握^[9]。

4 有机气相沉积

有机气相沉积最早的文献报道是在大气压下沉积有机盐 DAST 非线性光学薄膜^{[10-11][14]}。它是一种经济、快速、可大面积生长小分子和聚合物有机薄膜的方法,适合于制备有机电致发光器件、有机薄膜晶体管、有机异质结和低浓度掺杂的有机分子激光器等^{[12-13][15-16][18-19]}。沉积薄膜原理与有机气相喷印有些相似,有机分子在高温的腔室内升华,从腔外注入热的情性传输气体(如: N_2 等),情性传输气体把有机蒸汽分子传输到较冷的旋转基片上,有机气体分子遇冷沉积成薄膜。接近升华点有机材料的蒸汽压随温度变化很快,改变蒸发源的温度来精确控制有机气体分子的传输率是很困难的。如果蒸发源温度控制在一定的范围之内,可以精确控制情性气体的流量来改变有机分子气体在气流中的含量。

在有机气相沉积中影响薄膜厚度的因素主要有:蒸发源温度、腔内蒸汽压、情性传输气体的流量、基片温度和基片距蒸发源的距离等。1997 年 Forrest 等人用低压有机气相沉积制备出结构为:ITO/TPD/Alq₃/Mg:Ag/Ag 电致发光器件^[12],其启亮电压 $V_f=6V$,外量子效率为 $0.40 \pm 0.05\%$,与蒸镀法制备的器件相比,其启亮电压高出 2V,外量子效率基本一样。有机气相沉积已经成功用于制备有机小分子荧光和磷光掺杂电致发光器件^{[15][18]},2005 年报道磷光材料 Ir(ppy)₃ 掺杂有机电致发光小分子器件最大外量子效率已达到 $7.0 \pm 0.1\%$ ^[19]。从制备工艺上来看,有机气相沉积效率更高,可大面积沉积,尤其在低掺杂有机小分子薄膜中可精确控制掺杂比例。有机气相沉积克服了真空蒸发镀膜的一些不足,有望成为小分子电致发光器件产业化生产的理想制备工艺。

5 丝网印刷

丝网印刷是广泛用于印刷工业的一种印刷工艺,后来应用到印刷电路、太阳能电池、碳纳米管的

制备等。由于旋涂法制备聚合物薄膜时大部分材料被浪费掉了,而丝网印刷克服了旋涂工艺中有机材料利用率低的缺点,成为聚合物电致发光器件制备工艺的一大发展。丝网印刷首先要选择合适的丝网制备网版,根据印刷浆料来选择丝网材料、厚度和目数,在有机电致发光器件中丝网材料必须要耐有机溶剂。丝网的厚度和目数直接决定着所印有机薄膜的厚度和图案精度,丝网的直径不超过所印最细线条宽度的 $1/3$,丝网的开孔至少为浆料介质中颗粒尺寸的 2.5 倍,以保证印刷浆料的良好通透性和附着均匀性。制版是在丝网上涂感光胶,掩模、曝光等获得所需要的印刷图案。浆料的配制也是很关键的,合适粘度的浆料是得到均匀薄膜的前提条件之一。

丝网印刷是一种控制流体运动的技术。印刷前,由于浆料的粘度较大,置于丝网上的浆料并不会自动漏过丝网。开始印刷时,在刮板的作用力下,浆料流过图案时,就自动透过图案的开孔,在基底上获得所需图案。印刷时,由于网孔很小,浆料粘度大,其表面张力大于重力,只有当刮板把浆料压入网孔,在刮板和丝网的作用下,浆料受到很大的切应力而粘度迅速下降,这时浆料才流过网孔。此时丝网也与基板相接触。当刮板刚掠过,丝网依靠其张力立即恢复同时脱离基板。在丝网与基板接触时,浆料受到本身重力、基板和丝网粘附力的作用,此时由于浆料粘度很低,丝网对其作用力要比基板的作用力小得多,因此,丝网回弹过程中流过图案开孔的浆料就附在了基板上。

要想印刷出高质量有机薄膜,除刚才提到的丝网和浆料外,在印刷过程中需要注意的因素很多,如:刮板的速度、角度和力度;丝网的张力和洁净度;刮板到丝网之间的距离;基片的平整度等。2000 年美国的 Jabbour 教授等人采用该技术制备了有机电致发光器件^[20],器件结构 ITO/TPD:Poly-carbonate/Alq₃/Mg:Ag,最大外量子效率达到 0.91%,而同样结构的用旋涂方法制备的器件最大外量子效率为 0.87%。用丝网印刷技术制备的绿光器件,亮度达到 $10,000 \text{ cd/m}^2$ ^[22]。丝网印刷突破了不能印刷纳米量级薄膜的说法,印刷的超薄膜厚度

小于 15nm, 表面平整度低于 1.5nm^[23-24], 并实现了彩色显示^{[21][25]}。

6 喷墨打印

在聚合物电致发光器件制备技术中, 喷墨打印无需掩模板, 可以非接触式打印图案, 费用低, 效率高。与旋涂相比喷墨打印技术则大大提高原材料利用率, 且能打印成图案, 实现全彩显示, 适合发展大尺寸显示器。为了实现全彩显示, 人们设计制造了专门的喷墨打印设备, 并采用相应的工艺制备了使用的 PLED 打印机。喷墨打印原理是墨水喷头在打印信号的驱动下, 墨滴由小孔直接喷射到基片表面的特定位置而实现字符和图形的打印。在喷墨打印过程中, 控制溶剂的挥发是非常重要的, 它直接影响着薄膜的均匀性。由于尺寸效应, 喷墨微滴的挥发机制和宏观液体完全不同, 喷墨微滴干燥的时间非常短。同时, 由于液滴与界面的接触角以及边缘与中心挥发速度的不同, 导致液滴形成的高分子薄膜厚度一致型欠佳, 人们通过制备缓冲层、多滴沉积、优化挥发条件、后续处理等方式来提高薄膜厚度的均一性。在工艺方面, 有以下几个关键技术问题: 墨水的研制、打印头与打印系统的设计、溶剂蒸发的

控制等^[36]。

1998 年美国的 Yang Yang 等人用喷墨打印技术制备了结构为 ITO/PEDOT/MEH-PPV/Ca 聚合物电致发光器件^[26], 器件在 5V 时的亮度达到 200cd/m²。同年普林斯顿大学的研究小组用喷墨打印的方法制备了掺杂聚合物电致发光器件^[27], 在具有空穴传输功能的聚合物 PVK 中掺杂荧光染料 C6、C47 和 Nile red, 其发光性能与同样结构用旋涂方法制备的器件相似。喷墨打印技术不仅用在聚合物电致发光器件的制备当中^{[28][33]}, 在有机薄膜晶体管 (OTFT) 中也得到了广泛的应用^{[29][30-31]}。用喷墨打印技术制备的 N 型有机半导体薄膜 NTCDA 经热退火处理后, 其电传导率达到了 10⁻⁴S/cm 的数量级, 比用真空蒸镀得到的效果还好^[32]。目前喷墨打印技术制做高分子电致发光显示器件已成为新型制备方法研究的主流, 被认为是最有可能的实现全彩 PLED 量产的技术, 也是唯一成功开发全彩 PLED 显示器原型的 PLED 制备技术^[36]。

结束语

有机电致发光显示器具有巨大的应用前景, 要实现产业化就要求其制备工艺简单, 降低生产成本。

表 1 有机薄膜制备工艺的比较

Table 1. Compare of deposition techniques on organic thin film

制备方法	优点	存在的问题
真空蒸镀	沉积的薄膜均匀致密, 可实现彩色显示	设备和工艺复杂, 材料利用率低, 大面积制备时薄膜不均匀
旋涂	制备工艺简单, 便于操作, 成本低, 可制备聚合物和掺杂聚合物薄膜	材料利用率低, 不能实现彩色图案, 制备多层薄膜有困难, 不适合大面积制备
有机蒸汽喷印	直接喷印图案, 无需掩模板, 效率高, 节省材料, 可实现彩色显示	喷印图案时, 边缘厚度不均匀
有机气相沉积	费用低, 效率高, 掺杂浓度可精确控制, 可大面积生长, 可实现彩色显示	基片需要水冷, 用掩模板时材料利用率低
丝网印刷	工艺简单, 效率高, 适合大面积制备, 可实现彩色显示	薄膜较厚, 有针孔, 制备过程中薄膜容易被污染
喷墨打印	效率高, 费用低, 无需掩模板, 非接触打印图案, 可实现彩色显示, 可大面积制备	薄膜厚度均匀性差, 有针孔, 对高分子墨水要求较高

在传统的制备工艺当中, 真空蒸镀小分子薄膜需要较高真空度的真空设备, 实现彩色显示还需要光刻、掩模等技术, 制备工艺复杂, 这就增加了生产成本。制备聚合物电致发光器件的旋涂技术虽然工艺简单, 但不能实现全彩显示, 而且材料利用率低。有机蒸汽喷印技术不需要掩模板, 可进行直接喷印图案, 效率高, 节省原材料, 是小分子电致发光器件较理想的制备技术, 也是最有可能替代真空蒸镀实现小分子器件产业化的制备技术。聚合物电致发光器件的制备工艺目前研究较多是喷墨打印技术, CDT 和 Seiko-Epson 公司从 1997 年开始合作进行 PLED 生产设备的开发, 结合两者在材料和喷墨打印技术上的优势, 发展起喷墨打印技术。2000 年 6 月, Seiko-Epson 与 CDT 利用喷墨技术制成了高分子全彩 PLED 显示板。2004 年 5 月发表了 40inPLED 显示器^[36]。喷墨打印技术制做高分子电致发光显示器件已成为新型制备方法研究的主流, 被认为是最有可能的实现全彩 PLED 量产的技术。总之, 随着各种制备工艺的不断完善, 机电致发光器件必将走向产业化, 成为新一代显示器有力的竞争者, 其发展前景非常广阔, 我们期待它的到来。

参考文献:

- [1] M Pope, H P Kallmann, P Magnante. Electroluminescence in organic crystals [J]. J. Chem. Phys, 1963, 38: 2042-2044.
- [2] Tang C W, Vanslyle S A. Organic electroluminescent diodes [J]. Appl. Phys. Lett, 1987, 51 (12): 913-915.
- [3] Adachi C, Tsutsui T, Saito S, et al. Electroluminescence in organic thin film with three layer structure [J]. Japan. J. Appl. Phys, 1988, 27(2): L269-271.
- [4] Vanslyke S A, Chen C H, Tang C W. Organic electroluminescence diodes with improved stability [J]. Appl. Phys. Lett, 1996, 69 (15): 2160-2162.
- [5] 黄春辉, 李富友, 黄岩谊. 光电功能超薄膜 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 239.
- [6] Max Shtein, Peter Peumans, Jay B Benziger, et al. Direct mask-free patterning of molecular organic semiconductors using organic vapor jet printing [J]. J. Appl. Phys, 2004, 96: 4500-4507.
- [7] Max Shtein, Peter Peumans, Jay B. Benziger, et al. Direct mask-and Solvent-Free Printing of Molecular Organic Semiconductor [J]. Adv. Mater, 2004, 16: 1615-1620.
- [8] Yiru Sun, Max Shtein, Stephen R Forrest. Direct patterning of organic light-emitting devices by organic-vapor jet printing [J]. Appl. Phys. Lett, 2005, 86: 113504-1~113504-3
- [9] Max Shtein, Stephen R Forrest, Joe Michels. Method and apparatus for depositing material [P]. US Patent: 20050087131A1, 2005-04-28.
- [10] P E Burrows, S R Forrest, L S Sapochak, et al. Organic vapor phase deposition: a new method for the growth of organic thin films with large optical non-linearities [J]. Journal of Crystal Growth, 1995, 156: 91-98.
- [11] S R Forrest, P E Burrows, A Stroustrup, et al. Intense second harmonic generation and long-range structural ordering in thin films of an organic salt grown by organic vapor phase deposition [J]. Appl. Phys. Lett, 1996, 68(10): 1326-1328.
- [12] M A Baldo, V G Kozlov, P E Burrows, et al. Low pressure organic vapor phase deposition of small molecular weight organic light emitting device structures [J]. Appl. Phys. Lett, 1997, 71(21): 3033-3035.
- [13] Marc Baldo, Miriam Deutsch, Paul Burrows, et al. Organic Vapor Phase Deposition [J]. Adv. Mater, 1998, 10: 1505-1514.
- [14] M Deutsch, M C Gerstenberg, H F Gossen-

- berger, et al. Macroscopically ordered thin films of an organic salt grown by low-pressure organic vapor-phase deposition [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, 203: 412-420.
- [15] Max Shtein, Herman F. Gossenberger, et al. Material transport regimes and mechanisms for growth of molecular organic thin films using low-pressure organic vapor phase deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89: 1470-1476.
- [16] Max Shtein, Jonathan Mapel, Jay B. Benziger, et al. Effects of film morphology and gate dielectric surface preparation on the electrical characteristics of organic-vapor-phase-deposited pentacene thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81: 268-270.
- [17] Max Shtein, Peter Peumans, Jay B Benziger, et al. Micropatterning of small molecular weight organic semiconductor thin films using organic vapor phase deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93: 4005-4016.
- [18] Theodore X Zhou, Tan Ngo, Julie J Brown, et al. Stable and efficient electrophosphorescent organic light-emitting devices grown by organic vapor phase deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: 021107-1-021107-3.
- [19] C Himcinschi, S Hartmann, A Janssen, et al. Thin organic heterostructures deposited via organic vapor phase deposition: spectroscopic ellipsometry characterization [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275: e1035-e1040.
- [20] Dino A Pardo, Ghassan E Jabbour, Nasser Peyghambarian. Application of Screen Printing in the Fabrication of Organic Light-Emitting Devices [J]. *Adv. Mater.* 2000, 12: 1249-1252.
- [21] Hsin-hua Chang, Chung-chih Wu, Cheng-chung Yang, et al. Multicolor organic LEDs processed by integration of screen printing and thermal transfer printing [J]. *Display Technologies*, 2000, 4079: 127-134.
- [22] J Birnstock, J Bl?ssinga, A Hunzea, et al. Screen-Printed Passive Matrix Displays based on light-emitting polymers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78: 3905-3907
- [23] Ghassan E Jabbour, Rachel Radspinner, Nasser Peyhambarian. Screen-Printing for the Fabrication of Organic Light-Emitting Devices [J]. *Organic Field Effect Transistors*, 2001, 4466: 72-79.
- [24] Ghassan E Jabbour, Rachel Radspinner, Nasser Peyghambarian. Screen Printing for the Fabrication of Organic Light-Emitting Devices [J]. *JOURNAL ON SELECTED TOPICS QUANTUM ELECTRONICS*, 2001, 7: 769-772.
- [25] J Birnstock, J Bl?ssinga, A Hunzea, et al. Screen-Printed Passive Matrix Displays and Multicolor Devices [J]. *Organic Light-Emitting Materials and Devices*, 2002, 4464: 68-75.
- [26] Jahesh Bharathan and Yang Yang. Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. polymer light-emitting logo [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72: 2660-2662.
- [27] T R Hebner, C C Wu, D Marcy, et al. Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72: 519-521.
- [28] Kateri E Paul, William S Wong, Steven E Ready, et al. Additive jet printing of polymer thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83: 2070-2072.

- [29] Julian C Carter, Anja Wehrum, Mark C Dowl-ing, et al. Recent development in materials and processes for ink jet printing high reso-lution polymer OLED displays [J]. Organic Light-Emitting Mterials and Devices, 2003, 4800: 34-46.
- [30] A C Arias, S E Ready, R Lujan, W S Wong, et al. All jet-printing polymer thin-film transis-tor active-matrix backplanes [J]. Appl. Phys. Lett, 2004, 85: 3304-3306.
- [31] Takeo Kawase, Tatsuya Shimoda, Christopher Newsome, et al. Inkjet printing of polymer thin film transistors [J]. Thin Solid Films, 2003, 438-439: 279-287.
- [32] Yuming Ai, Yi Liu, Tianhong Cui, et al. Thin film deposition of an n-type organic semi-conductor by ink-jet printing technique [J]. Thin Solid Films, 2004, 450: 312-315.
- [33] B Ballarin, A FRALEONI-Morgera, D Fras-caro, et al. Thermal inkjet microdeposition of PEDOT: PSS on ITOcoated glass and char-acterization of the obtained film [J]. Synthetic Metals, 2004, 146: 201-205.
- [34] 王力恒, 黄运天, 郑海涛. 薄膜技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 1.
- [35] 郑伟涛等. 薄膜材料与薄膜技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 47.
- [36] 黄春辉, 李富友, 黄维, 有机电致发光材料与器件 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2005: 57-61.
- [37] DAVID B HALL, PATRICK UNDERHILL and JOHN M TORKELESON. Spin Coating of Ul-trathin Polymer Films [J]. POLYMER ENGI-NEERING AND DECEMBER, 1998, 38: 2039-2045.
- [38] Michael Pannek, Thomas Dunkel, Dirk W Schubert. Effect of bell-shaped cover in spin coating process on final film thickness [J]. Mat. Res. Innovat, 2001, 4: 340-343.
- [39] Dirk W Schubert, Thomas Dunkel. Spin coat-ing from a molecular point of view: its con-centration regimes.influence of molar mass and distribution [J]. Mat. Res. Innovat, 2003, 7: 314-321.
- [40] DUNBAR P BIRNIE. Surface Skin Develop-ment and Rupture During Sol-Gel Spin-Coating [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2004, 31: 225-228.
- [41] Chen Liu, Xuecheng Zou, Sheng Yin, et al. in-fluence of spin methods on the performance of polymer light-emitting devices [J]. Thin Solid Films, 2004, 466: 279-284.
- [42] Chao-Ching Chang, Chia-Ling Pai, Wen-Chang Chen, et al. Spin Coating of Polymers for electronic and optoelectronic applications [J]. Thin Solid Films, 2005, 479: 254-260.
- [43] P Yimsri, M R Mackley. Spin and dip coat-ing of light-emitting polymer solutions: Matching experiment with modeling [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 3496-3505.
- [44] 刘陈, 邹雪城等. 微细加工技术在有机电致发光器件中的应用[J]. 现代显示, 2003(5): 33-38.
- [45] 郑立行. 有机电致发光器件发展状况[J]. 现代显示, 1995(1): 57-60.
- [46] 张志林. 有机电致发光与有机半导体的发展[J]. 现代显示, 2006(11): 24-31.
- [47] 刘欢等. 交流驱动对有机电致发光器件性能的影响[J]. 现代显示, 2006(9): 47-50.
- [48] 张步新等. 彩色有机薄膜电致发光器件及显示技术[J]. 现代显示, 2000(4): 44-51.
- 作者简介: 张新稳(1978-), 男, 河南驻马店人, 西北大学光子所在读硕士研究生, 目前主要从事有机电致发光器件的研究工作, E-mail: zxwn-wu2004@sina.com。