

文章编号: 1001-3806(2018)04-0440-06

应用于柔性电子领域的激光剥离技术进展

黄御¹, 梁勛^{2*}, 朱能伟², 潘宁², 林颖², 方晓东^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230029; 2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 合肥 230031)

摘要: 柔性电子是可穿戴设备、物联网等应用发展的重要研究方向。激光剥离技术是一种利用激光能量来分离玻璃基板与柔性衬底的技术, 具有作用光波长可选、作用时间短、热影响区域小的优点, 是目前实现柔性电子器件的最重要技术之一。介绍了激光剥离的主要技术特点, 分析其在不同的柔性电子领域的应用, 讨论了应用过程中的主要工艺和作用, 并总结了激光剥离技术未来的发展趋势。激光剥离技术的快速发展, 会对柔性电子行业的研究和发展形成强力支持。

关键词: 激光技术; 激光应用; 柔性电子; 激光剥离; 柔性衬底

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10. 7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2018. 04. 002

Development of laser lift-off technology used in the field of flexible electronics

HUANG Yu¹, LIANG Xu², ZHU Nengwei², PAN Ning², LIN Ying², FANG Xiaodong^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China; 2. Hefei institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: Flexible electronic is an important research direction for the development of wearable equipment, internet of things and other applications. Laser lift-off technique is a technology to separate glass substrates from flexible substrates, and one of the important technologies to realize flexible electronic devices at present with advantages of optional light wavelength, short action time, and small heat effect areas. In this paper, the main technical characteristics of laser lift-off were introduced, its application in different flexible electronic fields was analyzed, the main processes and functions in the application process were discussed. Finally, the future development trend of laser lift-off technology was summarized. The rapid development of laser lift-off technology will form a strong support for the research and development of flexible electronics industry.

Key words: laser technique; laser application; flexible electronics; laser lift-off; flexible substrate

引言

近年来, 柔性电子器件因其轻薄、耐冲击、可卷曲等特点被越来越多的人关注^[1], 在信息、能源、医疗、安全等领域具有非常广泛和良好的应用前景^[2], 但是柔性电子器件因为衬底耐温等问题不能直接使用传统工艺制作, 需要将电子器件制作在临时载体上然后剥离下来并转移到柔性衬底上^[3]。随着激光技术的发展, 激光剥离 (laser lift-off, LLO) 技术已经成为制作柔性电子器件 (柔性显示器、柔性存储器、柔性能源、柔性传感器等) 最重要的技术之一。其主要原理是将紫外准分子激光器的输出光束整形成线光束, 然后透过

玻璃基板载体, 照射在聚合物层上, 由于准分子激光的波长很短, 聚合物层材料对激光的吸收率很高, 只有紧邻玻璃基板的聚合物被蒸发, 从而实现了基板与器件的分离^[4]。

1 柔性显示器中的激光剥离

柔性面板显示器具有诸如薄、轻、不可破坏和可弯曲特性等优点^[4], 来自国际权威机构的最新市场研究报告预计, 到 2027 年, 全球印刷和柔性电子市场规模将达到 3300 亿美金, 其中柔性显示屏将作为主要的细分市场, 预计到 2024 年, 出货量会实现 43.7% 的复合增长率^[5]。

目前, 市场上的柔性显示器主要有液晶显示器 (liquid crystal display, LCD)、电子墨水和有机发光二极管 (organic light-emitting diode, OLED)^[6]。由于 LCD 面板的制作工艺需要进行真空蒸镀与刻蚀, 所以

作者简介: 黄御 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光应用技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liangxu-lx@ustc.edu.cn

收稿日期: 2017-10-26; 收到修改稿日期: 2017-12-04

基板需要耐高温和强酸碱的腐蚀,因此塑料并不适合作为 LCD 基板,玻璃基板仍然是最佳选择。但是 LCD 柔性显示仍然存在很大的技术难点,其一,玻璃基板的柔韧性并不理想且厚度达不到要求;其二,面板的弯曲会影响图像的质量;其三,背光模块设计难度大,难保证屏幕亮度均匀性^[7]。所以目前的柔性显示面板市场主要关注的是电子墨水和 OLED。

1.1 电子墨水柔性显示

制造柔性电子墨水显示的关键在于是否能将薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)驱动阵列成功地制造在塑料基板上。制造过程中不能直接使用现有的成熟工艺,原因一是现有成熟工艺需要 300℃ 的薄膜沉积,而塑料基板的耐温并不能达到此要求;二是 TFT 制造需要经过 5 道光刻工艺,塑料基板在高精度对位上很难达到要求^[6-8]。目前,塑料基板上的 TFT 制造技术主要有两种:一是 Philip 的激光剥离塑料基板电子技术(electronics on plastic by laser release, EPLaR)^[8];二是 Epson 的激光退火表面分离技术(surface free technology by laser annealing/ablation, SUFTLA)^[6]。

Philip 的 EPLaR 技术除了开始时的聚酰亚胺(polyimide, PI)薄膜涂覆和最后的激光剥离,其它工艺步骤充分利用了成熟的在刚性基板上制造 LCD TFT 阵列技术。其制造工艺步骤主要为:(1)玻璃基板清洗;(2)PI 薄膜涂覆及 SiN_x 钝化层沉积;(3)TFT 阵列驱动制造;(4)在面板上贴覆显示层;(5)连接驱动集成电路(integrated circuit, IC);(6)器件测试;(7)激光分离 PI 薄膜;(8)器件封装。

Seiko Epson 的 SURFLA 技术制作工艺过程没有有机薄膜的介入,完全来自于传统玻璃基板上的 TFT 制造技术^[6]。其制造工艺步骤主要为:(1)沉积 α -Si 牺牲层到玻璃基板并采用传统工艺制作 TFT 阵列;(2)用另一张玻璃基板作为过渡性基板,并使用水溶胶将其与 TFT 阵列基板粘接到一起;(3)使用线性准分子激光透过玻璃基板照射到牺牲层上,使 TFT 与 α -Si 牺牲层脱离;(4)使用永久性的粘接剂将 TFT 阵列与塑料基板粘接在一起;(5)将塑料基板从过渡基板上分离下来。

EPLaR 技术和 SURFLA 技术都是在现有的 TFT 阵列制造技术上发展而来, EPLaR 技术相对简单、制作成本较低,但是由于有机薄膜过早介入,会导致其不可避免的受到破坏; SURFLA 技术相对复杂、成本也较高,但是制作过程中有机薄膜没有介入,使得有机薄膜能保持良好的完整性。

1.2 OLED 柔性显示

电子墨水显示虽然比较成熟,但在显示领域目前已经达成广泛的共识, OLED 显示技术由于与液晶和电泳技术等相比拥有不可替代的优势,将广泛应用于下一代柔性显示技术,包括新型智能手机、基于物联网的可穿戴电子设备以及智能家居、智能医疗等等^[9]。

20 世纪 60 年代, POPE 等人发现了有机半导体的发光现象^[10]。1987 年,美国 Kodak 公司的 TANG 等人^[11]研制出了低电压、高亮度的有机发光二极管,展示了其广阔的前景。OLED 是全固态的薄膜器件,且采用有机、无定形材料制备,因此在柔性器件方面具有天然的优势,也使其最有可能发展为可穿戴智能设备^[12-17]。近年来,中国柔宇科技有限公司基于自主研发的技术,成功研发了厚度仅为 0.01mm 的全彩有源矩阵有机发光二极管或主动矩阵有机发光二极管(active-matrix organic light emitting diode, AMOLED)柔性显示屏,并成功与手机平台对接,完整的柔性显示屏的厚度仅约为 10 μ m,几乎是头发丝的 1/5,由于其超薄的厚度,柔性显示屏的弯折半径可以小到 1mm,甚至比笔芯更小,而且,在弯折 5 万次~10 万次后依然可以实现高质量的显示效果^[5]。

柔性 OLED 显示器制造的一个关键问题是开发坚固的柔性基板^[12]。柔性基板应具有高柔软性、热稳定性、表面光滑、不渗透性以及与常规显示技术的兼容性等特性,目前已有薄玻璃、聚合物、钢基材 3 种柔性基材,但仍存在许多未解决的问题^[18]。薄玻璃可弯曲,但韧度低;聚合物基材的热稳定性较低且吸水性较高;钢基材的表面粗糙度高,且目前尚未开发出令人满意的用于大量生产钢基材的平面化方法。最重要的问题是,柔性基材由于其柔性而不能使用传统的大规模生产设备,衬底的柔性使其在运输、对准、图案化和沉积过程中存在许多严重的问题,而解决这些问题最有效的方法就是激光剥离技术^[19]。图 1 为柔性 OLED 激光剥离装置的示意图。主要由激光器、光学系统、反射镜、聚焦镜和工作台组成,其主要目的是将激光器输出的激光束整形为线性光束,对工作台上的样品进行扫描,从而实现样品的均匀有效剥离。

柔性 OLED 制造工艺步骤为:(1)将分离层沉积在母玻璃上;(2)将作为柔性基板的 PI 涂覆在其上并进行退火;(3)通过在衬底上的封装来制造和密封底部阻挡层和器件;(4)将激光束整形为线性光束,并且垂直地照射在运动的基板上,使得 PI 膜上的器件从玻璃基片上剥离下来。整个柔性器件的制造过程就完成

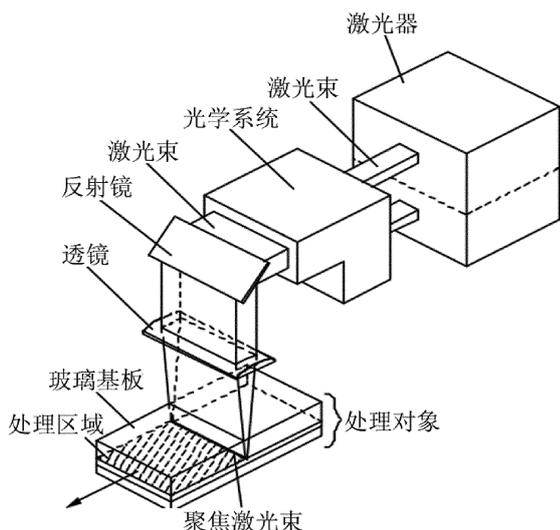


图1 激光剥离装置示意图^[20]

了^[19]。

三星 Galaxy Round, Note Edge 和 LG G Flex 在智能手机产品内部配有柔性 AMOLED 面板, 这些商业柔性 AMOLED 面板都是通过激光剥离技术制造出来的。激光剥离工艺不但需要考虑 PI 膜对激光源的吸收光谱, 而且激光的波长和脉冲持续时间也会影响激光剥离的结果^[9]。2014 年, KIM 等人^[18]开发了一种新的 $\alpha\text{-GaO}_x$ 结构牺牲层, 通过控制 $\alpha\text{-GaO}_x$ 的原子结构, 使得牺牲层材料能最大化地吸收激光, 能以较低的激光能量消融 $\alpha\text{-GaO}_x$ 牺牲层后, 使得刚性载体基板与 OLED 承载膜能够完全分开, 并且柔性基板没有发生破裂现象且柔性 OLED 没有发生光降解现象。2017 年, KOEZUKA 等人^[20]开发了一种新颖的分离层结构, 主要特点是在玻璃基板和 PI 薄膜之间插入特殊的缓冲层, 其厚度只有 $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$, 然后采用了用于低温多晶硅生产线的结晶工艺的准分子激光线性照射装置进行 PI 分离, 降低了生产成本、提高了生产效率和激光剥离良品率。

2 柔性能量装置中的激光剥离

能量收集装备可以从温度、生物力学振动、风和声波等环境资源中产生电能, 能对各类型电子设备的进行持续能源供应^[21-22], 有望应用在更小、更快、更有效率的电源系统中^[23]。

目前, 已有相关机构使用 LLO 技术制造出了一种高效、轻便、大面积、柔性的钙钛矿薄膜纳米电池^[24-25], 其主要步骤是将 XeCl 准分子激光照射到基板的背面, 将原本需要高温(约 650°C)处理的高压电溶胶——凝胶锆钛酸铅压电陶瓷 (piezoelectric ceramic

transducer, PZT) 层从刚性透明的蓝宝石基板上剥离下来, 并转移到聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 膜上, 从而完成柔性电池器件的制作^[25-26]。

但是, 在进行 LLO 之前, 器件的制造温度不能超过 500°C , 因为过高的制造温度会加速剥离层 ($\alpha\text{-Si:H}$) 的脱水, 造成用于分层能量的氢的缺乏, 进而导致激光剥离期间器件层分层失败。为了克服这个限制, 2016 年, KIM 等人^[24]通过一种丝网印刷技术 (screen printing technology, SPT) 和能量密度为 $700\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、脉冲频率为 20Hz 的 XeCl 激光多扫描工艺 (laser multi-scanning, LMS) 研制出了柔性热发电机 (flexible thermoelectric generators, f-TEG)。在整个剥离过程中, 多次的激光照射使得脱水剥离层 ($\alpha\text{-Si}$) 发生了完全的反应, 进而使得 $\alpha\text{-Si}$ 层聚集, 柔性 TEG 器件层得到完全的分层, 且没有热损伤现象。激光多扫描工艺能够在器件制造过程中使用超过 700°C 的高温退火工艺, 大大提高了器件的性能。图 2 是采用 $700\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的高能量密度和 20Hz 的脉冲频率的两个连续的紫外 (ultraviolet, UV) 准分子激光通过石英衬底的背面照射到 $\alpha\text{-Si}$ 层时的有限元模拟结果图^[24]。图 2a 基于激光多重扫描剥离的 f-TEG 的激光剥离过程示意图。每个激光扫描后, 显示详细的表面状态。图 2b 显示了在高能量密度 $700\text{mJ}/\text{cm}^2$ 和脉冲频率 20Hz 的两次连续激光照射后, 通过有限元法传热模式计算的温度分布。图 2c 显示了在 LMS 工艺之后石英衬底上整个 TEG 器件的计算温度分布。

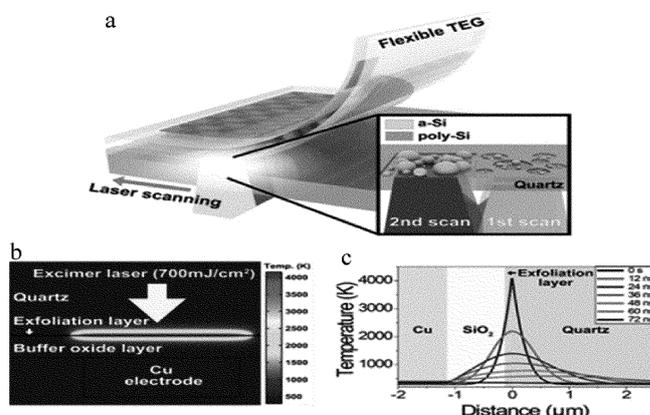


图2 有限元模拟结果^[24]

3 柔性传感器中的激光剥离

柔性显示屏因为轻薄、耐冲击、可卷曲等优点已经受到越来越多的关注, 而作为触摸屏的输入设备, 柔性触摸传感器是必不可少的。目前, 应用于传统平板电

子的触摸传感器主要有电阻式和电容式两种类型^[27],但在柔性装置中任然存在很多问题,主要因为柔性触摸传感器会经历频繁的弯曲和触摸,并且需要区分弯曲和多点触摸运动等因素。例如,在电阻型中,由于两个金属层在弯曲期间可能彼此接触,所以弯曲可能会导致未触动区域产生信号;而电容型难以识别触摸和弯曲,因为触摸传感器难以区分弯曲引起的静电场变化和触摸感应场变化。压电材料最有可能会发展成为下一代触摸传感器,因为其产生与压力成正比的电压信号,不会受到表面的异物(包括灰尘和水泡)的影响,同时具有能够检测复杂的变形和潜在的高分辨率应用的能力^[28]。

诸如 $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (PZT) 的陶瓷压电材料 (PET) 的压电应变常数 d_{33} 值大约为 400pC/N , 因此可以获得高的触摸灵敏度^[26]。然而, PZT 的高压电常数需要材料退火温度高于 600°C , 因为强电解效应需要高结晶度^[29-30]。该加工温度高于聚四氟乙烯 (poly tetra fluoroethylene, PTFE) (260°C)、聚偏氟乙烯 (poly vinylidene fluoride, PVDF) ($40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$)、乙烯-四氟乙烯共聚物 (ethylene-tetra-fluoro-ethylene, ETFE) ($50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$) 或聚酰亚胺 (350°C) 等多数柔性基材的熔点, 这使得柔性传感器的制作相当困难, 而 LLO 是解决这一问题最有效的方法。

LLO 主要工艺步骤为: 首先, 将柔性聚酰亚胺 (PI) 衬底放置器件的顶部; 之后, 在蓝宝石衬底的背面照射 KrF 准分子激光脉冲 ($\lambda = 248\text{nm}$, 能量密度为 $350\text{mJ}/\text{cm}^2$)。在激光辐射下, PZT 薄膜牺牲层和蓝宝石衬底之间的界面处的温度迅速升高并熔化界面; 最后将多层 (Pt 层、功能层 PZT, Pt, Ti 和牺牲层) PZT 器件转移到 PI 衬底上。功能性 PZT 薄膜在 100°C 和 $100\text{kV}/\text{cm}^2$ 条件下极化, 达到足够强的压电响应^[29]。基于压电陶瓷的柔性触摸传感器具有独特的优势, 包括可扩展的制造、快速响应时间、耐用性和自供电, 基于 LLO 的柔性压电陶瓷制作满足其生产和应用需求是柔性电子发展的一个方向。

4 柔性存储中的激光剥离

柔性电阻式存储器是标准作业程序 (standard operation procedure, SOP) 应用的一个重要组成部分, 在数据处理, 存储和与外部设备的通信中起着至关重要的作用^[31]。许多研究小组已经研究了各种基于有机的柔性存储器, 包括闪存、铁电存储器和电阻存储器, 其方法是在相对较低的温度下使用旋涂、卷对卷等工

艺在柔性基板上直接制造。虽然这些基于有机的柔性存储器已经成熟, 能够以高性价比的方式在大面积上实现柔性, 但是在开发具有高性能的高密度柔性存储器方面仍然存在许多问题, 主要因为由固有材料性质引起的性能不足和与金属氧化物半导体 (metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺的不兼容性造成的^[32]。

为了解决这些限制, 并保留刚性基板上高温处理的无机材料的优异性能, 需要将印刷的无机材料转移到柔性基板上。近年来, 已经研究了一些新颖的方法, 例如晶片的化学/机械变薄, 外延层转移和应力控制剥离等, 能够实现机械灵活性、高性能、纳米尺度对准和多功能性^[33]。尽管这些产品已经在高性能柔性存储器中取得了一定的发展, 但依然存在许多问题, 如工艺的复杂性、有限的适用性、高成本和传输静止不可预测性。2014 年, KIM 等人^[34] 提出了通过 LLO 工艺在塑料衬底上采用一个选择器-电阻 (1 selector-1 resistance, 1S-1R) 横杆结构制造柔性存储器的方法。其制作工艺为使用常规 CMOS 工艺在刚性玻璃基板上使用激光剥离制造 1k 位柔性存储器的 32×32 1S-1R 横向存储器阵列, 然后通过 LLO 工艺转移到柔性基板。该 LLO 技术通过选择适合于工艺温度的无机剥离层和基材, 即使在高达 1000°C 以上的温度下也能够保证进一步的工艺稳定性。LLO 过程中, 缓冲氧化物层通过补偿内部应力来支持上部器件层, 并能阻止在激光诱导的剥离过程中产生的热流。除了控制激光照射的持续时间之外, 缓冲氧化物层的厚度是 LLO 过程中减小对器件层的热损伤的重要因素。 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的能量密度和 30ns 的持续时间的激光照射在剥离层上产生的热流可以被 $1.1\mu\text{m}$ 厚度的缓冲氧化物层阻挡。图 3 是通过 LLO 技术在塑料基板上制造柔性 1S-1R 阻变式存储器 (resistive random access memory, RRAM) 的工艺步骤。首先, 将设备制作在玻璃基板上; 之后, 线性激

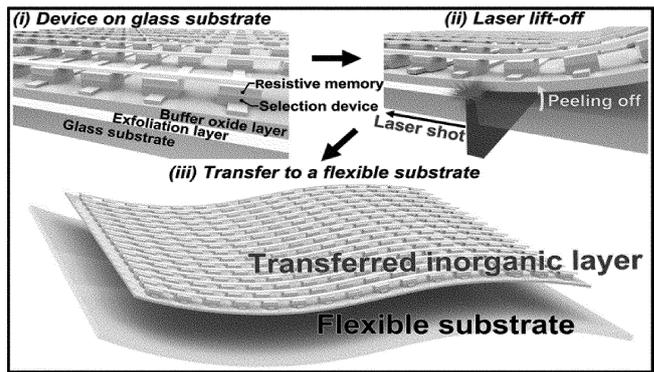


图 3 激光剥离柔性存储器示意图^[34]

光从玻璃基板背部照射破坏去角质层,将设备从玻璃基板分离下来;最后将剥离下来的设备固定到柔性基板上,整个制作过程完成。

5 结束语

柔性电子是可穿戴设备、物联网等应用发展的重要研究方向,传统工艺通常无法直接应用其中。基于激光的剥离技术由于光波长可选、作用时间短、热影响区域小等因素而非常适合于柔性器件的制作,目前在柔性显示器、柔性能量装置、柔性传感器、柔性存储器等方面均有研究和应用,虽然具有生产良率高、剥离速度快和有大批量生产潜力等特点,但在大面积生产、进一步提高产品良率和降低成本等方面还有很多的问题,需要进一步的发展研究。

另一方面,随着激光技术的发展,目前激光剥离常用的大功率准分子激光有可能逐步被成本和使用成本均较低的固体以及光纤等激光器所取代。目前 TRUMPF 公司、PI 公司已推出成熟的较大功率的紫外波段激光产品,IPG 公司也推出紫外段光纤激光产品。这些激光产品目前主要集中在 343nm、355nm 波段,有可能替代一些 308nm 准分子激光的传统应用,但还存在激光波长不够短、脉冲能量不够大等等问题需要进一步解决。

总之,激光剥离技术将会在材料科学、激光技术等支持下逐步发展,拓展应用范围、降低使用成本、提高产量和良率,对柔性显示和柔性电子行业的研究和发展形成强力支持。

参 考 文 献

- [1] TAN H B. Flexible display technology[J]. Recording Media Technology, 2010(5): 61-64(in Chinese).
- [2] LIU X, LÜ Y J, WANG L F, *et al.* Research progress of stretchable and flexible electronic Technology [J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(3): 161-166(in Chinese).
- [3] DELMDAHL R. The excimer laser; precision engineering[J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 286-286.
- [4] HSIEH K L, CHENG K N, WANG P F, *et al.* P-50: Application of high temperature debonding layer in the fabrication of flexible AMOLED displays[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 1324-1327.
- [5] LÜ Sh G, DENG W, X F. Royole echnology: leading the global "flexible display" [J]. Invention & Innovation, 2016(9): 36-37 (in Chinese).
- [6] ZHANG X. Laser technology in flexible displays[J]. Light Electrical and Mechanical Information, 2008, 25(11): 11-14(in Chinese).
- [7] LI T H. Brief introduction to key issues of flexible display technology [J]. Video Engineering, 2009, 33(8): 25-29 (in Chinese).
- [8] YANG Zh, HU W B. Developments of microcapsule electrophoretic display[J]. Vacuum Electronics Technology, 2012(6): 59-64 (in Chinese).
- [9] CHEN G K J, CHEN J. Handbook of visual display technology[M]. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2016: 1359-1376.
- [10] LI Ch, HUANG G M, DUAN L, *et al.* Recent advances in organic light-emitting diodes for flexible applications [J]. Material China, 2016, 35(2): 101-107.
- [11] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. Applied Physics Letters, 1987, 51(12): 913-915.
- [12] BOLAND J J. Flexible electronics: within touch of artificial skin [J]. Nature Materials, 2010, 9(10): 790-792.
- [13] GATES B D. Flexible Electronics [J]. Science, 2009, 323(5921): 1566-1567.
- [14] NOMURA K, TAKAGI A, KAMIYA T, *et al.* Amorphous oxide semiconductors for high-performance flexible thin-film transistors [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(5): 4303-4308.
- [15] CHIRILA A, BUCHELER S, PIANEZZI F, *et al.* Highly efficient Cu (In, Ga) Se₂ solar cells grown on flexible polymer films [J]. Nature Materials, 2011, 10(11): 857-861.
- [16] YOO J S, JUNG S H, KIM Y C, *et al.* Highly flexible AM-OLED display with integrated gate driver using amorphous silicon TFT on ultrathin metal foil [J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(11): 565-570.
- [17] CRAWFORD G P. Flexible flat panel displays[M]. Rhode Island, USA: John Wiley & Sons, 2005: 2-6.
- [18] KIM K, KIM S Y, LEE J L. Flexible organic light-emitting diodes using a laser lift-off method [J]. Journal of Materials Chemistry, 2014, C2(12): 2144-2149.
- [19] TSUJIMURA T, FUKAWA J, ENDOH K, *et al.* Development of flexible organic light-emitting diode on barrier film and roll-to-roll manufacturing [J]. Journal of the Society for Information Display, 2014, 22(8): 412-418.
- [20] KOEZUKA J, IDOJIRI S, SHIMA Y, *et al.* 24-1: Invited paper: flexible OLED display using c-axis-aligned-crystal/cloud-aligned composite oxide semiconductor technology and laser separation technology [J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 329-332.
- [21] SELVAN K V, ALI M S M. Micro-scale energy harvesting devices: Review of methodological performances in the last decade [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1035-1047.
- [22] MITCHESON P D, YEATMAN E M, RAO G K, *et al.* Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices [J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(9): 1457-1486.
- [23] ERICKSON E M, MARKEVICH E, SALITRA G, *et al.* Development of advanced rechargeable batteries: a continuous challenge in the choice of suitable electrolyte solutions [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2015, 162(14): A2424-A2438.
- [24] KIM S J, LEE H E, CHOI H, *et al.* High-performance flexible thermoelectric power generator using laser multiscanning lift-off process [J]. American Chemical Society Nano, 2016, 10(12): 10851-10857.
- [25] JOE D J, KIM S, PARK J H, *et al.* Laser-material interactions for flexible applications [J]. Advanced Materials, 2017, 29(26): 1606586.

- [26] PARK K I, SON J H, HWANG G T, *et al.* Highly-efficient, flexible piezoelectric PZT thin film nanogenerator on plastic substrates. [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(16):2514-2520.
- [27] ROSENBERG I, PERLIN K. The UnMousePad: an interpolating multi-touch force-sensing input pad [J]. *ACM Transactions on Graphics* 2009, 28(3):65.
- [28] DIETZ P, LEIGH D. DiamondTouch: a multi-user touch technology [C]//*Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2001: 219-226.
- [29] NOH M S, KIM S, HWANG D K, *et al.* Self-powered flexible touch sensors based on PZT thin films using laser lift-off[J]. *Sensors and Actuators*, 2017, A261:288-294.
- [30] LI W. Preparation and properties of high d_{33} PLZT/PVDF piezoelectric composites [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016:4-10 (in Chinese).
- [31] JI Y, ZEIGLER D F, LEE D S, *et al.* Flexible and twistable non-volatile memory cell array with all-organic one diode-one resistor architecture [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(4): 2707 (2013).
- [32] KIM S J, LEE J S. Flexible organic transistor memory devices [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(8): 2884-2890.
- [33] MENARD E, LEE K J, KHANG D Y, *et al.* A printable form of silicon for high performance thin film transistors on plastic substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(26):5398-5400.
- [34] KIM S, SON J H, LEE S H, *et al.* Flexible crossbar-structured resistive memory arrays on plastic substrates via inorganic-based laser lift-off [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(44): 7480-7487.