激光辅助MicroLED巨量转移技术进展

孙宁宁, 杨彪, 陈福荣, 胡金龙, 余海洋, 卞敬, 段永青*, 黄永安*

华中科技大学机械科学与工程学院, 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074

* E-mail: duanyongqing@hust.edu.cn; yahuang@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-06-07; 接受日期: 2021-08-10; 网络版发表日期: 2022-02-17

国家自然科学基金项目(批准号: 51635007)、湖北省自然科学基金项目(编号: 2020CFA028)和数字制造装备与技术国家重点实验室开放课题(编号: DMETKF2021010)资助

摘要 巨量转移是将几百万甚至上千万颗微米尺度的MicroLED芯片从源基板精准转移到显示基板上的制造技术, 在转移良率、精度和速率等方面存在诸多挑战, 成为制约新一代显示产品的技术瓶颈. 基于激光-材料界面的相互作用已经发展了多种激光辅助转移技术, 该技术具有对器件损伤小、高度可选择性、响应快速高效等优势, 目前成为极具潜力的巨量转移解决方案. 本文首先介绍了巨量转移目前的技术实现方式和技术难点, 随后评述了基于激光辅助的超薄微器件转移技术的最新进展, 包括激光辅助的基本原理、转移工艺过程和目前达到的技术水平, 最后探讨了在MicroLED芯片巨量转移领域的发展前景及挑战.

关键词 微型发光二极管, 巨量转移, 激光辅助转移, 激光剥离, 动态释放层

1 引言

微型发光二极管(MicroLED, μ LED)是将传统LED的像素点从毫米级降低至微米级, 并在单个芯片上将驱动电路与像素点高度集成的新一代无机自发光显示技术^[1], 其像素尺寸通常不超过100 μm 或50 μm , 每一个像素都能独立定址和单独发光. MicroLED的概念最早由Jiang等人^[2]提出, 相比LCD与OLED显示器, MicroLED具有分辨率更高、功耗更低、寿命更长、响应快速和高可靠性等优势^[3], 在高分辨率显示^[4]、可穿戴/可植入光电设备^[5]、光通信^[6]、生物医学检测^[7]等许多领域具有广泛的应用前景.

根据应用场景的不同, MicroLED显示器件的制造^[8]可分为两大路线: 单片集成^[9]和巨量转移^[10]. 单片集成即通过键合的方式将源基板上的芯片一次性集成到驱动器背板上, 仅限于应用在近眼显示器、智能手表等高分辨率微显示器领域^[9]. 巨量转移是将微芯片与源基板分离并批量拾取, 然后单独或成组转移到显示基板对应的像素电极上^[10], 可应用于不同尺寸、不同材质显示基板的场合, 由于工业化生产要求巨量转移良率不低于99.9999%^[11], 芯片转移误差不超过 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ ^[12], 转移效率大于50~100 M/h^[1], 传统的芯片转移、封装等技术手段无法达到工业需求^[13], 巨量转移技术成为制约MicroLED显示量产的技术瓶颈. 针对

引用格式: 孙宁宁, 杨彪, 陈福荣, 等. 激光辅助MicroLED巨量转移技术进展. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 513–528

Sun N N, Yang B, Chen F R, et al. Advances in laser-assisted mass transfer of microLED (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 513–528, doi: 10.1360/SST-2021-0234

MicroLED芯片高精度高效率巨量转移的应用需求, 目前已经发展了精准拾取转移技术^[14-17]、自对准滚轮转印技术^[18]、自组装转移技术^[19]、激光辅助转移技术^[20,21]等多种巨量转移技术, 技术对比如表1所示, 其中激光辅助转移技术利用界面区域材料吸收光束能量引起快速物理变化或化学反应产生驱动力来调控界面状态, 以克服表层材料与MicroLED的黏附力, 在合适

的工艺参数下可达到较高的良率、精度和转移速率, 成为巨量转移MicroLED极具潜力的技术方案之一。

本文首先介绍了激光辅助转移技术的原理, 然后根据界面现象的不同将技术分为三类, 分别综述了这些技术的工艺原理、转移过程和目前转移达到的技术水平, 最后对这些技术应用于MicroLED转移的发展前景及挑战进行了探讨。

表 1 巨量转移现有技术对比

Table 1 The comparison of existing mass transfer technologies

转移方法	原理图	芯片尺寸	转移效率 (M/h) ^{a)}	芯片间距	可扩展性	成本	技术特点	参考文献
范德华力		~nm	1	中	低	低	控制速率调控界面; 作用力调控困难; 操作简单; 选择性好; 表面平整度要求极高	[15,16]
精准拾取转移		1 μm	12	大	低	中	静电易损坏芯片; 芯片制造要求高	[14]
电磁力		10 μm	0.9	大	低	中	芯片掺磁影响发光; 磁材料均匀性影响吸附; 电磁模块设计复杂	[17]
自对准滚轮转印		10 μm	3.6	中	高	低	需要严格控制辊的压力; 辊与传送带运动需同步	[18]
流体自组装转移		10 μm	50	小	高	低	选择性差; 技术难度较高	[19]
激光辅助转移		1 μm	100	小	高	高	响应快速; 高度可选择性; 需要精准控制激光参数	[20,21]

a) M/h表示百万个每小时

2 激光辅助转移原理概述

激光具有方向性强、单色性好、相干性高等性能, 在进行加工时容易获得超短脉冲和小尺寸光斑, 产生极高的能量密度和功率密度, 已经得到了越来越广泛的应用^[22,23]. 用于微薄器件转移的激光工艺是基于激光穿过透明基板作用于响应层材料, 在光热或光化学反应下产生某种界面现象, 使得黏附在响应层材料之上的微器件克服黏附力转移至目标基板. 根据激光参数和响应层材料的不同, 产生的界面现象可分为三类, 如图1所示: (1) 直接分解, 响应层材料(如GaN材料^[24])从界面处吸收激光能量发生反应并完全分解, 器件与界面的黏附力减弱而得以转移; (2) 形成鼓泡, 响应层材料(如金属薄膜^[25]、聚合物^[26]、热释放胶层^[27]) 在界面处烧蚀一定深度, 其瞬时产生的气体产物形成鼓泡, 其上附着的器件由于界面隆起表面接触面积减小, 芯片从响应层脱落并转移至接收基板; (3) 应力辅助, 响应层材料(如PDMS^[28]、SMP^[29])吸收激光能量后产生热膨胀效应, 在热应力或剪切应力作用下产生形变, 界面裂纹扩展使得芯片转移至目标基板. 这些转移技术虽然基于不同的界面现象, 但本质都是利用激光脉冲来控制激光响应层材料和微器件的界面黏附力以使芯片脱落达到转移目的, 其中激光参数(如激光波长^[30]、能量密度^[31]、脉宽^[32]、重复频率^[33]、光斑

大小^[34]等)、响应层材料^[35]和转移间距^[36]等工艺参数是影响转移结果的重要因素.

界面现象的产生和利用主要取决于激光的特性参数: (1) 激光波长, 特定波长的激光入射时能够作用于响应层材料而不被透明基板吸收, 取决于激光与这两种材料的带隙不连续性^[30]: $\tilde{E}_{\text{透明}} > \tilde{E}_{\text{光}} > \tilde{E}_{\text{响应层}}$, 其中 $\tilde{E}_{\text{透明}}$ 是透明基板材料的带隙, $\tilde{E}_{\text{光}} = h\nu$ 是入射激光的光子能量, $\tilde{E}_{\text{响应层}}$ 是响应层材料的带隙. 这一条件适用于线性光学响应, 当采用飞秒激光时, 入射的光子能量低于响应层带隙, 即 $\tilde{E}_{\text{光}} < \tilde{E}_{\text{响应层}}$, 此时超短脉冲时间下光子跃迁到高激发态发生非线性光学响应, 在这种条件下高密度光子是通过多重光子吸收机制被响应层材料吸收^[37]. (2) 激光能量密度, 激光能量密度是决定转移良率工艺窗口的重要因素, 不同能量的激光会使得作用区域产生热致局部变形^[38]、热诱导相变^[39]、热化学分解^[40]等现象, 需要控制合适的值以避免过低能量导致的反应不完全而无法转移, 或者过高能量产生的冲击力和热作用对器件造成不可逆的损伤. (3) 激光脉宽, 激光脉宽决定了激光热作用对芯片产生的热效应, 这种热效应通常用热扩散长度^[41] $l_{\text{热扩散}} = (2kt_{\text{脉冲}})^{1/2}$ 表征, 其中 k 为热扩散系数, $t_{\text{脉冲}}$ 为激光的脉冲持续时间, $l_{\text{热扩散}}$ 代表了激光辐照时间中的能量(热量)传导距离, 脉宽越短, 激光热作用效应则越小, 对所作用材料及其周围的热影响区将会减小, 从而降低对器件的损伤^[32]. (4) 激光脉冲重复频率, 重复频率与接收基板的扫描路径^[42]相配合可实现不同的累积照射次数, 从而在界面产生物理/化学效应累积以达到实现转移功能所需的界面条件^[33]. 在累积照射次数不变的条件下, 重复频率越高, 单位时间内转移次数越高, 相应的转移效率越高. (5) 激光光斑, 在满足转移能量阈值的条件下, 光斑作用区域越大, 单次可转移芯片的数量越多^[36]. 通常情况下, 固体激光器发出点光斑, 通过振镜扫描^[43]的方式实现大面积阵列化芯片转移; 而准分子激光器产生的较大尺寸光斑, 需要经过光路系统的整形、匀束、图案化^[44]等处理, 再通过光学透镜对激光聚焦后进行转移, 其中聚焦作用一方面用于调控激光光斑的大小; 另一方面可保证转移过程中光斑处于照射材料的统一深度, 从而保证芯片的均匀转移.

图1 (网络版彩图) (a) 激光辅助转移原理图, 界面现象分为三类: 直接分解(b), 产生鼓泡(c), 应力辅助(d)

Figure 1 (Color online) (a) Schematic diagram of laser-assisted transfer, including three kinds of interface phenomena: direct decomposition (b), bubble generation (c), and stress-assisted transfer (d).

响应层材料和转移间距等也会显著影响转移结果。(1) 响应层材料, 响应层材料在转移前需要提供足够的黏附力以确保芯片可靠拾取, 这种黏附力包括范德华力^[28]、胶层黏附力^[26]、机械拾取力^[45]等, 在转移过程中激光作用产生上述界面现象以克服甚至消除上述黏附力使得芯片足以克服表面力转移至接收基板。(2) 转移间距, 非接触激光辅助式转移技术可以不受限于接收基板的平整度, 但芯片从响应层材料脱落后下落飞行的距离(即转移间距)直接影响了转移良率和精度^[36]。当转移间距过小、两个基板靠得很近时会产生挤压膜效应^[34](squeeze-film effects), 吸收芯片下落的动能导致脱黏失效; 但间距过大时芯片在转移过程中容易出现翻转或横向偏移。

3 激光照射界面烧蚀分解的转移技术

在MicroLED制程中, 蓝宝石衬底因其价格低廉且可生长高质量的GaN外延层, 常作为MicroLED芯片的生长基底^[46]。巨量转移时, 为获得方便拾取的芯片, 通常采用激光剥离(LLO)技术将源基板上的芯片转移到临时基板或目标基板上。激光剥离技术是一种典型的激光照射界面分解的转移技术, 该技术诞生于1997年^[47], 通过将激光器发出的紫外激光透过蓝宝石基材作用在衬底界面处, GaN在激光作用下烧蚀分解, 使界面间的黏附强度降低, 实现了界面的分离, 其作用机理^[48]如图2(a), 界面处发生的分解反应可表示为

图 2 (网络版彩图) (a) 激光剥离GaN原理图^[48]; (b) 选择性激光剥离GaN示意图^[50]; (c) SLLO技术用于MicroLED转移的流程图^[49]; (d) SLLO技术黏附强度与激光能量密度的关系图^[51]; (e) 两种激光扫描方法示意图^[54]; (f) SLLO技术转移MicroLED结果及验证^[51]

Figure 2 (Color online) (a) Schematic diagram of laser lift off of GaN [48]; (b) diagram of selective laser lift off of GaN [50]; (c) the process of MicroLED transferred by SLLO technology [49]; (d) relationship between adhesion intensity and laser energy density of SLLO technology [51]; (e) diagram of two kinds of laser scan methods [54]; (f) microLEDs transferred by SLLO technology [51].

在巨量转移中, 需要将芯片从源基板分离后转移至中间基板, 然后再从中间基板将芯片选择性转移至显示基板, Kim等人^[49]在激光大面积剥离Ga₂N工艺的基础上, 发展了选择性激光剥离(SLLO)工艺, 以期直接将源基板的芯片单点可控地选择性转移至临时基板或接收基板上. 选择性激光剥离转移原理如图2(b), Bornemann等人^[50]使用520 nm波长的飞秒激光转移特定区域的Ga₂N LED, 由于光子能量低于Ga₂N带隙, 线性吸收非常少, 在短脉冲下高功率激光触发Ga₂N层双光子吸收、自聚焦等非线性过程, 将光束聚焦到20 μm , 在振镜扫描的方式下以图2(b)所示的图案化路径, 可实现Ga₂N LED的选择性转移. SLLO技术流程如图2(c)所示, 首先将MicroLED键合至临时基板, 然后使用激光聚焦光束作用在尺寸为100 μm ×100 μm 的单个Ga₂N基LED上, 以散焦光束扫描的方式将LED剥离并转移至热释放胶带. 该技术的核心是需要严格控制LED和基板之间的黏附力. Park等人^[51]研究了不同激光功率密度下黏附力的变化关系, 如图2(d)曲线图所示, 发现由Ga₂N的热分解引起的Ga析出和由蓝宝石的热损伤引起的粗糙化界面是界面断裂的两个竞争机制: 以较高的功率密度来分解足够的Ga, Ga析出越厚, 黏附强度越低, 器件越容易分离; 而当功率过高时, 由热损伤引起的粗糙表面会增加接触面积, 增加了材料之间的摩擦力和附着力, 提高了黏附强度, 器件很难实现分离, 通过改变激光功率密度可以合理调控二者的竞争机制.

因此, 激光参数工艺调控是决定能否成功剥离以及剥离后器件表面质量的核心环节, 具体包括激光能量密度^[52]、激光扫描方式^[53]、激光器参数^[54]等. 其中合适的能量阈值是剥离是否成功的关键参数, 为扩大能量阈值工艺窗口, Tang等人^[52]在蓝宝石衬底上制备Ga₂N薄膜时在界面间插入由InN/InGa₂N超晶格组成的牺牲层, 制备了更宽厚度及更低缺陷的Ga₂N膜, 减少了激光的损伤. 激光扫描方法也会影响Ga₂N薄膜的性能^[53]. Delmdahl等人^[54]使用两种激光扫描方法即线形扫描法(线光斑)和分步式重复扫描法(矩形点光斑), 如图2(e)所示, 发现采用线形扫描法比分步式重复扫描法对Ga₂N薄膜造成的损伤更小. 目前可以使用多种激光器来完成剥离, 波长包括194^[55], 248^[56], 266^[49], 308^[57], 355^[47], 532^[58]和1030 nm^[48]等.

目前, 选择性激光剥离技术实现了图案化的LED

芯片转移, 并经过探针点亮证明器件的功能不受影响, 转移结果如图2(f)所示. 选择性激光剥离技术在LLO技术的基础上实现了选择性转移, 可适用于高产量的MicroLED转移, 也可以为彩色MicroLED集成和MicroLED显示器修复提供新的途径, 并将加速MicroLED显示器的商业化. 但是该工艺由于需要定向转移或剥离, 要求激光剥离技术在实现微米量级光斑尺寸的条件下还需控制激光能量的均匀输出, 才能完成微小器件的选择性精准剥离. 由此可见, 为实现激光剥离在MicroLED技术中的应用, 如何降低激光剥离损伤缺陷与实现高精度选择性批量剥离仍是未来研究需探索的问题.

4 激光照射界面形成鼓泡的转移技术

4.1 激光诱导前向转移技术

激光诱导前向转移(LIFT)是一种高分辨率的单步转移技术, 可以实现通过固体或液体材料的部分沉积实现表面微图案化, 并广泛用于电子设备的选择性转移^[59]. LIFT技术是1986年由Bohandy等人^[60]提出, 激光脉冲透过透明基板作用于源基板界面材料, 使其发生熔融或者烧蚀, 产生的蒸汽压力将材料及其上附着的器件转移至目标基底. 用于微器件转移的激光诱导前向转移技术是在透明基板和微器件之间添加牺牲层^[61](通常称为动态释放层, DRL), 激光通过透明基板作用在DRL上, 界面处DRL浅层区域吸收能量烧蚀分解, 其余部分保持完整, 生成的气体产物被限制在未分解的薄膜内, 当气体压力在受限薄膜层产生的应力超过薄膜的屈服极限时薄膜发生变形并形成鼓泡. 随着鼓泡体积增加, 气体的压力会下降直至达到稳定状态. 鼓泡在器件转移中一方面曲率变化降低了器件与牺牲层界面的黏附力, 另一方面瞬间冲击提供了芯片转移的动能, 使得芯片得以转移, 图3(a)为激光诱导前向转移原理. 应用于巨量转移时, 需要先通过激光剥离或化学剥离等方式将源基板上的MicroLED整体拾取到临时基板, 激光诱导前向转移技术用于实现从临时基板至目标基板的选择性释放过程.

DRL的选取是该技术的核心, 既需要提供器件的黏附作用以便拾取, 同时还需要满足激光作用下充分发生反应以产生鼓泡冲击. 最简单的DRL材料是单层金属薄膜^[25,62], 其中典型工作是通过Au-DRL转移磷光

图3 (网络版彩图) (a) 激光诱导前向转移原理图^[59]; (b) PI烧蚀模型示意图^[65]; (c) 激光烧蚀PI生成鼓泡原理示意图^[65]; (d) 双层DRL结构^[74]; (e) MPLET技术多光束转移工作原理^[20]

Figure 3 (Color online) (a) Schematic diagram of laser induced forward transfer [59]; (b) diagram of PI ablation model [65]; (c) schematic diagram of bubble generation by laser ablation of PI [65]; (d) the double layer structure of DRL [74]; (e) multi beam transfer principle of MPLET [20].

体粉末以制造磷光屏^[63]。但由于金属DRL不可避免会导致熔融碎片随器件一起转移,使器件表面残留DRL材料,造成对器件的污染。换用挥发性分解产物的单层聚合物材料如光分解三氮烯聚合物^[64](TP)或者聚酰亚胺^[65](PI),可最大程度地减少这一问题。TP在激光波长为266^[64]、248^[66]和308 nm^[66]时具有高吸收峰,辐照后分解成挥发性产物,产生的冲击可实现器件的转移^[67]。Fardel等人^[26]通过沉积TP作为牺牲层成功转移了OLED像素,但同时发现消融产生的冲击波会使器件从接收基板发生碰撞,可能造成器件受损。Shaw-Stewart等人^[68]进一步研究了工艺参数对TP烧蚀行为和激光产生的飞行物体动力学的影响,实验表明在较小的间隙和负压条件(低于大气压)下可以极大地改善转移效果。

PI是另一种常用的DRL聚合物材料,Bian等人^[65]研究了PI的起泡机制,烧蚀模型如图3(b)所示,发现PI在吸收激光后伴随着热传导,界面处的局部高温使得与玻璃相邻的PI薄层变成熔融状态,随着温度的进一步升高,化学键被热解导致PI分解产生气体产物^[65](c)。由于PI在紫外光下的吸收深度较浅(约为0.2~0.5 μm),使得气体产物能够被剩余的PI包裹生成泡罩。由于反应迅速,激光烧蚀过程中产生的化学能将转化

为用于推进的器件的机械能,可达到良好的转移效果。另外,PI的低热扩散率可避免对泡罩外部附着的器件造成热损伤。该技术通过精确控制入射激光能量、光斑尺寸和材料膜厚等参数,可实现仅受激光重复率限制的高效率、高精度的巨量转移^[69]。

该技术用于微器件转移的效果得到了实验验证。Karlitskaya等人^[70]成功转移了尺寸为300 μm×300 μm的硅片,在接收间距为195 μm下转移后的硅片95%的旋转角度在9°误差范围内;Miller等人^[35]提出了热机械选择性激光辅助模具转移,通过设置双层DRL,新增一层黏附层以提供拾取芯片所需的黏附力,如图3(d)所示,在接收间距为195 μm时转移了680 μm×680 μm×65 μm的硅片,转移良率为64%,而转移旋转和释放角度误差平均值分别为3.5°和14°。为了优化转移效果,Hong等人^[71]研究了鼓泡冲击时基板/聚合物界面的裂纹扩展动态过程,发现鼓泡高度和裂纹长度对激光能量密度这一参数敏感。较高的激光能量密度更容易产生较高的鼓泡;当激光能量密度大于临界激光能量密度时,裂纹将扩展,从而芯片得以脱落。为了进一步揭示芯片在飞行中的转移机理,通常使用时间分辨成像技术直接观察转移过程,可分为泵探针成像技术^[72]和高速拍摄观测^[73],该方式是揭示LIFT机制的

本质和有效观测芯片转移复杂过程的重要实验手段. 2013年, Uniqarta在LIFT技术的基础上, 引入了大规模并行激光使能传输(MPLET)技术^[20,74], 其工作原理如图3(e)所示, 使用衍射光学元件将单个激光束衍射成多个子光束, 其数量取决于激光能量密度, 每个子光束对应一个MicroLED的转移, 大大缩短了单光束扫描转移的过程, 目前, MPLET技术用于大型面板的转移速度可以达到100 M/h, 而小型面板的传输速度可以超过500 M/h, 传输精度为 $\pm 1.8 \mu\text{m}$.

激光诱导转移技术具有精准的转移选择性, 有利于实现高分子聚合物小尺寸图形和微结构的转移; 非接触式作用过程消除了接收基板对转移的影响, 允许器件在任意接收基板上转移, 被广泛应用于多元件的图案化精密沉积、转移等. 但这种转移方式依赖于激光作用薄膜层或聚合物吸收层的蒸发或熔化, 由于激光的局部快速热传递可能会导致转移系统中的温度升高(几百摄氏度), 因而要求待转移的电子元件有极好的耐热性. 此外, 界面损伤是永久性的^[75], 因此这种转移技术需要不断更换响应层.

4.2 激光热致起泡转移技术

在巨量转移中, 拾取时需要较强黏附力以保证拾取可靠; 放置时黏附力则需要尽可能小以实现转移, 因此技术的核心在于提高黏附力切换比. 罗鸿翔等人^[76]已经综述了多种用于器件转移的界面调控机理, 如制备微纳结构^[77]表面可以实现微弱的黏附力(约为

平整表面的1/40), 也可通过仿生壁虎纤毛结构^[78]实现较强的黏附力(约为平整表面的12倍). 在这些方法中, 激光的快速、局部热传递在界面产生的凸起或微隆起等起泡结构具备单独可寻址、较高的黏附切换能力, 已被广泛尝试应用于选择性地转移微器件^[27,79,80], 本文将这一类技术统称为激光热致起泡转移技术. 应用于巨量转移时, 首先利用图章的范德华力或黏性层的黏附力实现将MicroLED从源基板或临时基板上整体拾取至图章上, 激光热致起泡转移技术用于实现将MicroLED从图章上选择性释放至目标基板.

Luo等人^[79]基于Pick-Place工艺研究了一种新型激光辅助的转印技术, 巧妙应用力学设计在图章中引入腔壁附着金属层的空气微空腔, 并使用微结构薄膜对空气微空腔进行封装, 获得了在较低温度下界面黏附可调的弹性图章. 用于转移的过程如图4(a)所示, 将印模移动至微器件表面, 保持界面处平整并与器件接触; 随后移动至接收基板上方并与指定位置对准后, 该图章在激光束的作用下, 空腔壁面上附着的金属层吸热, 导致空腔内的空气迅速温升发生膨胀, 微结构薄膜形成凸起降低黏附, 器件被转移至基板. 为了量化腔体内的膨胀压力和膜的挠度随温度升高的关系, 建立了理论力学模型, 发现随着温度的升高, 起泡高度会随之增加, 这减小了接触面积并因此降低了界面黏附力, 当温度升高到100°C时可提供最高达1000倍的强弱黏附比转换能力. 通过将尺寸为 $400 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的LED芯片转移至不同显示基板上, 验证了应用于MicroLED

图4 (网络版彩图) (a) 激光辅助微空腔转移技术流程^[79], (b) 嵌入式微球鼓泡示意图^[80], (c) 热释放胶带用于批量转移微器件的示意图^[27]

Figure 4 (Color online) (a) The process of laser assisted microcavity transfer technology^[79]; (b) schematic diagram of embedded microsphere bubbling^[80]; (c) schematic diagram of batch transfer through heat release tape^[27].

转移应用的可行性。

为获得较大的黏附力切换比, Wang等人^[80]在黏合层中嵌入可膨胀微球, 如图4(b)。拾取时, 小尺寸的嵌入式可膨胀微球可确保黏性层表面平整, 对黏合层的强黏合力影响可忽略不计; 转移时, 通过激光加热系统(波长为808 nm, 光斑直径为350 μm)产生90°C的外部热刺激作用于黏性层, 快速的局部热传递导致包裹在内部的微球迅速膨胀, 使得平整表面发生变形而产生一种分层的微隆起结构, 显著降低表面黏附力, 实现了可靠的释放。关键挑战在于选择合适的激光功率以使嵌入式微球达到热刺激温度, 同时还要避免由于温度过高而导致微器件性能下降。为进一步证明该方法适用于MicroLED的转移, 将10×10的MicroLED阵列从热释放胶(TRT)压模上选择性转移到临时PDMS接收基板上, 证明了在巨量转移中的可行性。

为实现大批量转移, TRT压膜被用于转移。Yan等人^[27]研究了TRT转移微器件的原理, 成功转移取决于TRT与功能器件之间的黏附力从强到弱的转变(由温度参数决定, 如图4(c)), 当温度低于临界温度 T_c 时, TRT/功能器件的能量释放率大于功能器件/源基板的临界能量释放率, 裂纹倾向于在前者界面处传播, 使得器件可以从源基板上拾取下来; 当转移时, 激光加热使得温度高于临界温度 T_c , TRT/功能器件的能量释放率小于功能器件/接收基板的临界能量释放率, 功能器件得以转移到目标基板上。

激光热致起泡转移技术在拾取时具有稳固的附着力, 放置时通过外部热刺激提供弱的附着力以将微器件成功释放到各种接收基材上, 可在较低的温度下实现转移, 不会对器件和图章造成损伤。通过对激光束的编程控制可以将微米尺度的芯片可控地集成在任意基底上。该技术已证明可用于转移数百微米的组件, 但它可能难以转移较小的功能组件, 其分辨率取决于可膨胀微球的大小。然而, 对于该种微结构的制备, 其要实现纳米或者微米级(如5 μm)制备, 制备工艺复杂, 价格昂贵, 可转移的微器件尺寸有限, 增加了MicroLED转移成本。

5 激光诱导界面应力辅助的转移技术

5.1 激光驱动微转移放置技术

目前巨量转移研究较为广泛的另一种技术是图章拾取微转印工艺^[14-17], 通过控制图章速度或制备图章

表面微结构来调节黏附能, 从而实现拾取和放置, 但该方式必须保证器件和接收基板的表面形成良好的接触。为了使转移过程不再受接收基板的特性、几何形状等的限制, Saeidpourazar等人^[81]引入了一种基于激光引起的印模热应力响应失配的转移技术——激光驱动微转移放置(LMTP)技术, 其原理是特定波长的激光穿过透明图章作用在器件上, 微器件(Si或者GaAs)吸收激光能量引起自身温度升高, 由于图章导热系数低, 于是在器件-图章界面附近形成了局部热区, 而图章热膨胀系数(CTE)较大, 受微器件和周围未加热图章的约束, 在应力作用下接触界面处将形成局部界面剪切力, 同时会产生弯曲或凸起, 这种弯曲应变能产生的驱动力使能量释放速率超过了器件-图章界面的黏附功, 微器件周边的分层裂纹向内扩展^[82], 从而达到微器件转移释放的目的。当图章界面的温度下降后又能恢复到原先的状态, 可实现重复利用。

激光驱动微转移放置技术用于转移微器件的具体工艺流程^[83]如图5(a), 首先将PDMS图章移动至生长基板上方, 对准待转移的微器件后选择性拾取, 然后将带有微器件的图章移动到接收基板目标位置的上方, 红外脉冲激光通过图章作用在器件-图章界面, 由于图章(PDMS)与器件的热力学性质(如弹性模量、热传导系数、热膨胀系数等)的差异, 在器件-图章界面形成极大的失配应变导致局部弯曲变形, 以此实现器件转移, 最后移除图章。应用于巨量转移时, 该技术可以实现从源基板上的选择性拾取以及到目标基板的选择性释放。

为确定关键工艺参数(如激光参数、材料系统参数、转移间距等), 相关研究者建立了热力学模型^[28], 并采用有限元方法获得了温度分布和临界界面能量释

放率的关系: $\frac{t_{\text{delamination}}}{t_0} = f\left(\frac{q_{\text{total}}}{q_0}, \frac{L_{\text{silicon}}}{L_0}\right)$, 脱离时间只

取决于热量和硅片长度这两个参数。激光参数和转移间距(即芯片或图章与接收基板之间的距离)是转移微器件的重要工艺参数, 此外, 还需要选择合适的图章材料, 一方面需要保证图章材料可对某种波长的激光透明, 以保证激光可以作用于器件-图章界面; 另一方面需要保证CTE具有较大的不匹配, 以引起基于热应变失配形成的热应力驱动。Saeidpourazar等人^[83]选用了波长为805 nm, 脉冲4 ms的IR激光器作为作用源, 使用PDMS图章拾取并转移了尺寸为100 μm ×100 μm

图 5 (网络版彩图) (a) 激光转移放置步骤的示意图^[74,83]; (b) 应用LMTP转移微器件示例的显微照片^[74,83]: (1) $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ 硅芯片转移至印有金属引线的硅基底上, (2) 转移同等规格方形硅堆叠成三维金字塔结构, (3) 硅基底上的 InGaN LED, (4) 点亮转移至硅衬底的 InGaN LED

Figure 5 (Color online) (a) Schematic diagram of laser transfer and placement technology [74,83]; (b) microdevices transferred by LMTP [74,83]: (1) the silicon chip ($100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$) is transferred to the silicon substrate printed with metal leads; (2) the silicon chip is transferred and stacked into a three-dimensional pyramid structure; (3) the InGaN LED on the silicon substrate; (4) the lighted InGaN LED transferred to the silicon substrate.

$\times 3\ \mu\text{m}$ 的硅片至硅平面、陶瓷球面等不同基底上, 如图 5(b), 实验证明, 将激光输出功率逐渐增加, 直到功率达到 2.5 W 时硅芯片成功转移, 此外, 设置接收基板和器件之间的距离从 $5\ \mu\text{m}$ 增加到 $300\ \mu\text{m}$, 在低于 $20\ \mu\text{m}$ 的转移间距下转移误差在实验观察的分辨率范围内可忽略不计。最后, 使用同样的装置成功无损转移 μLED 至硅基板上, 验证了该方法在巨量转移方面的可行性。

激光驱动微转移放置技术的核心挑战是控制所涉及的图章、器件之间的热力学性质和界面热应力引起的变形和裂纹扩展行为, 通过调节激光能量和转移间距等工艺参数, 实现误差较小、成功率较高、可重复利用的非接触式转移。此外, 由于该工艺是通过增加激光功率提高芯片界面温度, 以增加应变能释放速率, 对图章界面或器件可能会造成热损伤。目前该技术只实现了有限个 MicroLED 的成功转移, 为应用于巨量转移, 还需研究芯片间距、光斑阵列化的转移效果。

5.2 激光驱动形状记忆聚合物转移技术

在巨量转移中常采用 PDMS 作为转移头, 虽然图章在受压时可以很好地适应复杂几何形状的微器件, 但去除压缩预紧力后会快速弹性重构, 无法长期保型, 这就要求微器件的接触上表面必须有较大的平整区域以保证有效接触并拾取。为了克服弹性体 PDMS 图章的上述局限性, 形状记忆聚合物(SMP)被用于适应不同表面形貌微器件的转移印刷^[84]。SMP 是利用外部刺

激如光^[85]、温度变化^[86]触发形状变化特性, 基于温度变化的 SMP 在高于形状记忆转变温度 T_g 时, 施加一定的外部压力使 SMP 产生形变, 与器件接触成为拾取形状, 然后将其冷却到低于 T_g 的温度, 去除外部压力保持其变形形状。在用于转移时, 温度高于 T_g 后, 由于形状记忆效应, SMP 将恢复到原始未变形的状态, 用于解除拾取力, 其形状记忆转变流程如图 6(a) 所示。

激光驱动 SMP 转移技术使用激光脉冲加热 SMP, 通过控制激光参数来控制温度变化从而控制 SMP 的变形转换。典型的激光驱动式 SMP 转移技术工艺过程如图 6(b) 所示, 首先将 SMP 压模均匀加热至 T_g 并压在基板上的微型器件上, 在预紧力下将 SMP 压模变形且冷却到室温, SMP 压模保持拾取形态; 然后将拾取有器件的 SMP 压模移动至接收基板上方, 通过施加一定负载使器件键合至指定位置, 然后通过激光束照射 SMP 界面使受热区域中的变形恢复到其原始状态, 释放微器件。应用于巨量转移时, 该技术从源基板或临时基板上整体拾取而后选择性释放至目标基板, 其核心是通过温度调控图章变形, 由于形变引起界面黏附力的强弱转换, 从而实现拾取和释放。

为了更好地调节黏附力, 可通过改进图章变形形状或改善温度调控的方法来实现更好的效果转移。在改进变形形状方面, 一些 SMP 图章制备了棱锥^[88]、圆锥形^[89]的微结构, 如图 6(b) 和 (c), 初始状态下只有锥尖大小的接触面积, 而在变形后会产生更大的表面接触面积, 提供了可靠的黏附拾取力, 恢复原状后, 在表面积减小和弹性体的回复力作用下, 器件得以转移。为了

图6 (网络版彩图) (a) SMP形状记忆转变流程图^[76,86]; (b) 激光驱动SMP转移技术工艺过程^[76,87]; (c) SMP椎尖结构^[88]; (d) SMP抓手结构^[45]; (e) 嵌入炭黑的SMP结构^[29]; (f) 图案化硅片的并行转移结果^[29]; (g) 图案化LED转移结果^[45]

Figure 6 (Color online) (a) Transformation of SMP [76,86]; (b) laser driven SMP transfer technology [76,87]; (c) vertebral apex structure of SMP [88]; (d) gripper structure of SMP [45]; (e) SMP filled with carbon black particles [29]; (f) parallel transfer results [29]; (g) pattern transfer results [45].

处理更加复杂表面的微器件, Linghu等人^[45]提出如图6(d)所示抓手结构, 在拾取时主要通过刚度变化诱导变形, 以嵌入微器件从而形成机械手结构, 增大了拾取可靠性而不依赖于界面黏附力。但在释放时, 微器件由于尺寸减小, 表面的黏附力在转移过程中起着非常重要的作用, 可以通过表面处理或增加粗糙度以降低黏附力, 提高转移可靠性。在改善温度调控方面, Eisenhaure等人^[29]在图章与微器件接触表面内嵌入炭黑颗粒, 如图6(e), 该颗粒具有很强的近红外吸收性, 使用近红外激光对SMP图章进行局部加热, 这种复合

炭黑-SMP(CBSMP)可以增强材料对激光的吸收, 大大扩展可用的材料种类, 优化了温度调控方式。为验证该技术用于微器件转移的实用性, 在弯曲的玻璃基板上转移硅片, 如图6(f), 成功实现了单个硅片的串行转移和图案化硅片的并行转移。Linghu等人^[45]使用 20×8 阵列的LED($167 \mu\text{m} \times 167 \mu\text{m} \times 95 \mu\text{m}$)成功转移了图案, 如图6(g), 转移后的LED通过点亮及伏安特性曲线验证, 器件性能未受影响。基于SMP的激光辅助转移使用具有可逆黏附力的聚合物印模作为操纵器, 通过激光在其玻璃化转变温度对其进行加热保形并冷却, 而提供

的SMP压模的动态刚度控制,可在器件拾取过程中显著提高附着力。此外,SMP材料的形状固定和恢复特性使图章设计具有相当大的自由度(如更复杂的表面图案和异质表面特征等),从而进一步降低了释放过程中的黏附力。这种基于激光的加热方法具有优越的速度和便捷性,它们可以精确地对准需转移的材料。

6 结论与展望

激光辅助转移技术由于转移速度快、可靠性高且选择性好,可应用于任何尺寸面板的转移,且相对其他技术而言在修复方面具有优势,可以与坏点剔除工艺相匹配,对于提高良率具有很大的作用,在未来的巨量转移技术中占有极高的技术优势。本文综述了MicroLED巨量转移发展现状,重点分析了具有重要潜在应用价值的激光辅助转移技术,分别从技术原理、目前进展和面临的挑战等方面进行阐述,所述激光转移方法总结如表2。

虽然目前各种巨量转移技术都取得了显著进步,但是在这些技术成为MicroLED工业化制造的候选之前,仍在技术机理、工艺和实用性等方面存在诸多问题有待解决。

需要深入揭示界面作用力的选择性与黏附力强弱调控机理以提高转移可靠性。对于精准拾取技术,基于范德华力、静电力、电磁力等力学原理产生对芯片的拾取放置的界面调控力,通过转移头来满足选择性操作,但该技术的界面调控大多对芯片有掺磁、电介质涂覆、弱连接生长等特殊要求,芯片的发光特性会受到一定的影响。滚轮转印技术和自组装技术虽然可实现芯片的转移操控,但作用力的选择性差,带来坏点剔除与缺陷修复等方面的困难。而激光辅助巨量转移技术由于独特的激光作用区域高度局部性的特点,通过将激光光斑聚焦至微纳尺寸,调控工艺参数可用于选择性转移MicroLED,被普遍认为是最有能力实现巨量转移的技术,但激光作用力容易对器件带来损伤(光热损伤和光化学冲击损伤),该问题一方面可以通过光

表 2 激光转移方法技术对比

Table 2 The comparison of laser transfer technologies

方法名称	界面现象	界面	作用原理	激光	转移对象	转移结果	参考文献
选择性激光剥离	界面烧蚀分解	蓝宝石-GaN	GaN分解为Ga和N ₂ 界面黏附强度降低	266 nm 固体激光器	100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ GaN LED	实现单个 LED 到柔性基板的剥离	[50]
激光诱导前向转移		石英-DRL		355 nm Nd:YAG 激光器	680 $\mu\text{m} \times 680 \mu\text{m} \times 65 \mu\text{m}$ 硅片	良率: 64% 偏角: 3.5°	[35]
		石英-双层DRL	DRL受限烧蚀形成鼓泡冲击	1064 nm Nd:YAG激光器	300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ 硅片	精度: $\pm 35 \mu\text{m}$, 速度: 100个/s	[70]
		透明基板-DRL层		UV激光器	50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ μLEDs	精度: $\pm 1.8 \mu\text{m}$, 速率: >100 M/h	[74]
激光辅助微空腔转移	界面形成鼓泡	弹性图章-空气	封闭空腔受热膨胀,表面接触面积减少降低界面黏附	808 nm 光纤激光器	400 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ LED	低温非接触转移MicroLED到不同基底	[79]
激光驱动微结构转移		弹性图章-黏性层微球	热作用导致包裹在黏性层内部的微球迅速膨胀,平整表面发生变形而在界面产生鼓泡,显著降低表面黏附	808 nm 光纤激光器	285 $\mu\text{m} \times 285 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$ LED 10 $\times$ 10 阵列	提供>1000的强弱黏附比,成功转移MicroLED至不同基板	[80]
激光驱动微转移放置	界面应力辅助	弹性图章-微器件	界面热失配形成局部剪切力	805 nm 红外激光器	100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 的硅片	硅片成功拾取并释放	[83]
激光驱动SMP转移		形状记忆聚合物-微器件	转移时激光热作用使SMP回复,从而释放机械应力	808 nm 光纤激光器	167 $\mu\text{m} \times 167 \mu\text{m} \times 95 \mu\text{m}$ LED	在介观尺度实现复杂形状元件的转印	[45]

路整形系统提供均匀的能量输出, 提高转移损伤可控性; 另一方面可以通过改变响应层材料或者结构体系, 采用如牺牲层等中间结构作为激光作用力的缓冲层, 降低损伤缺陷提高转移良率.

需要优化扩展单点或有限阵列转移工艺以实现巨量并行转移. 对于精准拾取技术而言, 通过拓展转移头将其阵列化实现并行转移, 但由于产生电磁、静电的装置使其单个转移头很难做小、图章的凸台在接触转移时容易塌陷等原因, 阵列化转移头适用的芯片间距很大, 制约了转移效率, 可通过进一步优化转移头结构来克服这方面的问题. 而激光辅助转移技术的单次转移时间由激光与物质作用特性确定, 使得转移速率极大地受限于光斑的移动速度或者单次光斑可作用芯片的数目, 可通过振镜扫描的方式提高光斑移动速度(高速振镜可实现每秒上万次扫描), 也可以通过光学投影掩膜、光学空间调制的方式增加光斑阵列(如超高DMD可调制光斑阵列达2560×1600个), 详细技术描述可见表3^[90~92].

需要结合工艺上下游及成本等实际生产问题以推

动产业化应用. 当前转移技术原理实现方案较少考虑芯片正倒装结构的引脚朝向对产业化工艺复杂度的影响, 如激光剥离技术可直接从源基板上将MicroLED转移至目标基板; 而其他技术则需要先去除源基板, 将器件拾取至中间基板的激光响应层上, 再转移至目标基板, 增加了工艺复杂性; 其次, 技术所需成本的考量也是产业化应用的关键因素, 如激光转移常用的准分子激光器设备相对其他种类的激光器成本高(如准分子激光及其光路系统设备成本约达数百万), 可考虑低成本激光器的适用机理开发, 此外激光响应层材料发生烧蚀分解后往往无法重复利用, 这势必会增加一定的耗材成本, 可探索开发可重复使用的激光响应层.

总之, MicroLED器件的显示性能在当前其他技术中处于领先优势, 而巨量转移技术是解决MicroLED制造的必然发展趋势, 相信随着研究人员对激光与材料的相互作用、光路整形、精度调控等方面内容的深入了解, 必将攻克巨量转移技术的难点, 推动MicroLED产业发展.

表 3 激光光斑阵列方法
Table 3 The laser spot array methods

方法	光路原理图	技术原理	作用	巨量特性	参考文献
光学投影		光掩模投影阵列化聚焦光斑	增加单次光斑转移芯片数量	光斑尺寸受掩模板加工精度影响; 改变光斑图案需更换掩模板; 通过移动平台拓展加工面积区域	[90]
空间调制器		计算机预编调控DMD生成任意图案的阵列光斑	增加单次光斑转移芯片数量	DMD适用的激光波长有限; 可通过计算机更改光斑图案; 通过移动平台拓展加工面积区域	[91]
振镜扫描		振镜扫描系统移动单个激光源动态扫描形成任意图案的阵列光斑	提高光斑移动速度	振镜扫描范围有限; 可通过计算机随时更改光斑图案; 通过移动平台拓展加工面积区域	[92]

参考文献

- 1 Virey E H, Baron N. 45-1: Status and prospects of microLED displays. *SID Symposium Digest Tech Papers*, 2018, 49: 593–596
- 2 Jiang H X, Jin S X, Li J, et al. III-nitride blue microdisplays. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 1303–1305
- 3 Wu T, Sher C W, Lin Y, et al. Mini-LED and micro-LED: Promising candidates for the next generation display technology. *Appl Sci*, 2018, 8: 1557
- 4 Choi H W, Jeon C W, Dawson M D. High-resolution 128×96 nitride microdisplay. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25: 277–279
- 5 Lee H E, Lee D, Lee T-I, et al. Wireless powered wearable micro light-emitting diodes. *Nano Energy*, 2019, 554: 54–62
- 6 Lan H Y, Tseng I C, Lin Y H, et al. High-speed integrated micro-LED array for visible light communication. *Opt Lett*, 2020, 45: 2203–2206
- 7 Lee H E, Shin J H, Park J H, et al. Micro light-emitting diodes for display and flexible biomedical applications. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1808075
- 8 Paranjpe A, Montgomery J, Lee S M, et al. 45-2: *Invited Paper*: Micro-LED displays: Key manufacturing challenges and solutions. *SID Symp Digest Tech Papers*, 2018, 49: 597–600
- 9 Zhang L, Ou F, Chong W C, et al. Wafer-scale monolithic hybrid integration of Si-based IC and III-V epi-layers-A mass manufacturable approach for active matrix micro-LED micro-displays. *Jnl Soc Info Display*, 2018, 26: 137–145
- 10 Ding K, Avrutin V, Izyumskaya N, et al. Micro-LEDs, a manufacturability perspective. *Appl Sci*, 2019, 9: 1206–1221
- 11 Paranjpe A, Montgomery J, Lee S M. 16.5: *Invited Paper*: Manufacturing solutions for micro-LED displays. *SID Symp Digest Tech Papers*, 2019, 50: 169–172
- 12 Liu X, Tong C, Luo X, et al. P-6.8: Study of mass transfer for micro-LED manufacturing. *SID Symp Digest Tech Papers*, 2019, 50: 775–778
- 13 Val R M, Orven S, Yuriy A, et al. Laser-assisted ultrathin bare die packaging: A route to a new class of microelectronic devices. *Proc SPIE*, 2013, 8608: 86080L1–8608015
- 14 Bibl A, Higginson J A, Law H, et al. Micro device transfer head heater assembly and method of transferring a micro device. US Patent, 8349116, 2013-01-08
- 15 Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp. *Nat Mater*, 2006, 5: 33–38
- 16 Zhou H L, Qin, W Y, Yu Q M, et al. Transfer printing and its applications in flexible electronic devices. *Nanomaterials*, 2019, 9: 283–311
- 17 Wu M H, Fang Y H, Chao C H, et al. Electric-programmable magnetic module and picking-up and placement process for electronic devices. US Patent, 9607907, 2017-05-28
- 18 Choi M, Jang B, Lee W, et al. Stretchable displays: Stretchable active matrix inorganic light-emitting diode display enabled by overlay-aligned roll-transfer printing. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1606005
- 19 Sasaki K, Schuele P J, Ulmer K, et al. System and method for the fluidic assembly of emissive displays. US Patent, 20170133558, 2017-05-11
- 20 Marinov V R. 52-4: Laser-enabled extremely-high rate technology for μ LED assembly. *SID Symp Digest Tech Papers*, 2018, 49: 692–695
- 21 Henley F J. 52-3: *Invited Paper*: Combining engineered EPI growth substrate materials with novel test and mass-transfer equipment to enable microLED mass-production. *SID Symp Digest Tech Papers*, 2018, 49: 688–691
- 22 Yeo J, Hong S, Kim G, et al. Laser-induced hydrothermal growth of heterogeneous metal-oxide nanowire on flexible substrate by laser absorption layer design. *ACS Nano*, 2015, 9: 6059–6068
- 23 Jin H M, Lee S H, Kim J Y, et al. Laser writing block copolymer self-assembly on graphene light-absorbing layer. *ACS Nano*, 2016, 10: 3435–3442
- 24 Tong X L, Li L, Zhang D S, et al. The influences of laser scanning speed on the structural and optical properties of thin GaN films separated from sapphire substrates by excimer laser lift-off. *J Phys D-Appl Phys*, 2009, 42: 045414
- 25 Zergioti I, Mailis S, Vainos N A, et al. Microdeposition of metals by femtosecond excimer laser. *Appl Surf Sci*, 1998, 127-129: 601–605
- 26 Fardel R, Nagel M, NuEsch F, et al. Laser-induced forward transfer of organic LED building blocks studied by time-resolved shadowgraphy. *J Phys*, 2010, 114: 5617–5636
- 27 Yan Z, Pan T, Xue M, et al. Thermal release transfer printing for stretchable conformal bioelectronics. *Adv Sci*, 2017, 4: 1700251
- 28 Li R, Li Y, Lü C, et al. Axisymmetric thermo-mechanical analysis of laser-driven non-contact transfer printing. *Int J Fract*, 2012, 176: 189–194
- 29 Eisenhaure J, Kim S. Laser-driven shape memory effect for transfer printing combining parallelism with individual object control. *Adv Mater*

- [Technol](#), 2016, 1: 1600098
- 30 Buerle D W. Laser Processing and Chemistry. 2nd ed. Dordrecht: Springer Heidelberg, 1996. 457–475
- 31 MacCarthy N, Wood T, Ameri H, et al. A laser release method for producing prototype flexible retinal implant devices. [Sens Actuat A-Phys](#), 2006, 132: 296–301
- 32 Lee C H, Sang J K, Ohet Y, et al. Use of laser lift-off for flexible device applications. [J Phys D](#), 2010, 108: 1269
- 33 Kim S J, Lee H E, Choi H, et al. High-performance flexible thermoelectric power generator using laser multiscanning lift-off process. [ACS Nano](#), 2016, 10: 10851–10857
- 34 Holmes A S, Saidam S M. Sacrificial layer process with laser-driven release for batch assembly operations. [J Microelectromech Syst](#), 1998, 7: 416–422
- 35 Miller R, Marinov V, Swenson O, et al. Noncontact selective laser-assisted placement of thinned semiconductor dice. [IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol](#), 2012, 2: 971–978
- 36 Karlitskaya N S, Lange D, Sanders R, et al. Study of laser die release by Q-switched Nd:YAG laser pulses. [Proc SPIE Int Soc Opt Eng](#), 2004, 5448: 935
- 37 Yulianto N, Kadja G T M, Bornemann S, et al. Ultrashort pulse laser lift-off processing of InGaN/GaN light-emitting diode chips. [ACS Appl Electron Mater](#), 2021, 3: 778–788
- 38 Al-okaily A M, Rogers J A, Ferreira P M. Characterization of delamination in laser microtransfer printing. [J Micro Nano Manuf](#), 2014, 2: 011002
- 39 In J B, Lee D, Fornasiero F, et al. Laser-assisted simultaneous transfer and patterning of vertically aligned carbon nanotube arrays on polymer substrates for flexible devices. [ACS Nano](#), 2012, 6: 7858–7866
- 40 Le Drogoff B, Cui B, Veres T. Fast three-dimensional nanostructure fabrication by laser-assisted nanotransfer printing. [Appl Phys Lett](#), 2006, 89: 113103
- 41 Matthias E, Reichling M, Siegel J, et al. The influence of thermal diffusion on laser ablation of metal films. [Appl Phys A](#), 1994, 58: 129–136
- 42 Huang L, Li B, Ren N. Enhancing optical and electrical properties of Al-doped ZnO coated polyethylene terephthalate substrates by laser annealing using overlap rate controlling strategy. [Ceramics Int](#), 2016, 42: 7246–7252
- 43 Piqu A, Mathews S A, Pratap B, et al. Embedding electronic circuits by laser direct-write. [MicroElectron Eng](#), 2006, 83: 2527–2533
- 44 Mathe V K, Sood D K, Hayes J P. Laser patterning of thin films of TiNiPd deposited on silicon substrate. [Proc SPIE](#), 2004, 5276: 36–46
- 45 Linghu C, Zhang S, Wang C, et al. Universal SMP gripper with massive and selective capabilities for multiscaled, arbitrarily shaped objects. [Sci Adv](#), 2020, 6: 5120
- 46 Chen M, Zhang B P, Cai L E, et al. Auto-split laser lift-off technique for vertical-injection gan-based green light-emitting diodes. [IEEE Photonics J](#), 2013, 5: 8400407
- 47 Kelly M K, Ambacher O, Dimitrov R, et al. Optical process for liftoff of group III-nitride films. [Phys Stat Sol \(A\)](#), 1997, 159: R3–R4
- 48 Voronenkov V, Bochkareva N, Gorbunov R, et al. Laser slicing: A thin film lift-off method for GaN-on-GaN technology. [Results Phys](#), 2019, 13: 102233
- 49 Kim J, Kim J H, Cho S H, et al. Selective lift-off of GaN light-emitting diode from a sapphire substrate using 266-nm diode-pumped solid-state laser irradiation. [Appl Phys A](#), 2016, 122: 305
- 50 Bornemann S, Yulianto N, Spende H, et al. Femtosecond laser lift-off with sub-bandgap excitation for production of free-standing GaN light-emitting diode chips. [Adv Eng Mater](#), 2020, 22: 1901192
- 51 Park J, Sin Y G, Kim J H, et al. Dependence of adhesion strength between GaN LEDs and sapphire substrate on power density of UV laser irradiation. [Appl Surf Sci](#), 2016, 384: 353–359
- 52 Tang L, Wang Y, Cheng G, et al. Free standing GaN nano membrane by laser lift-off method. [MRS Proc](#), 2012, 1432: 53–58
- 53 Delmdahl R. Fabricating the flexible future. [Opt Photon](#), 2016, 11: 28–30
- 54 Delmdahl R, Ptzel R, Brune J, et al. Line beam processing for laser lift-off of GaN from sapphire. [Phys Status Solidi A](#), 2012, 209: 2653–2658
- 55 Kang T S, Wang X T, Lo C F, et al. Simulation and experimental study of ArF 193 nm laser lift-off AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. [J Vacuum Sci Tech B Nanotechnol MicroElectron-Mater Proce Measure Phenomena](#), 2012, 30: 011203
- 56 Wong W S, Sands T, Cheung N W. Damage-free separation of GaN thin films from sapphire substrates. [Appl Phys Lett](#), 1998, 72: 599–601
- 57 Lee S H, Park S Y, Lee K J. Laser lift-off of GaN thin film and its application to the flexible light emitting diodes. [Proc SPIE](#), 2012, 8460: 11–17
- 58 Ho H P, Lo K C, Siu G G, et al. Raman spectroscopy study on free-standing GaN separated from sapphire substrates by 532 nm Nd:YAG laser

- lift-off. In: Proceedings of the 2002 IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting. Hong Kong, 2002. 111–115
- 59 Delaporte P, Alloncle A P. Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology. *Opt Laser Tech*, 2016, 78: 33–41
 - 60 Bohandy J, Kim B F, Adrian F J. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser. *J Appl Phys*, 1986, 60: 1538–1539
 - 61 Banks D P, Grivas C, Mills J D, et al. Nanodroplets deposited in microarrays by femtosecond Ti: Sapphire laser-induced forward transfer. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 193107
 - 62 Sano T, Yamada H, Nakayama T, et al. Experimental investigation of laser induced forward transfer process of metal thin films. *Appl Surf Sci*, 2002, 186: 221–226
 - 63 Fitz-Gerald J M, Piqué A, Chrisey D B, et al. Laser direct writing of phosphor screens for high-definition displays. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 1386–1388
 - 64 Fardel R, Nagel M, Nüesch F, et al. Laser forward transfer using a sacrificial layer: Influence of the material properties. *Appl Surf Sci*, 2007, 254: 1322–1326
 - 65 Bian J, Chen F, Yang B, et al. Laser-induced interfacial spallation for controllable and versatile delamination of flexible electronics. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 54230–54240
 - 66 Lippert T, Wokaun A, Stebani J, et al. Triazene polymers designed for excimer laser ablation. *Angew Makromol Chem*, 1993, 206: 97–110
 - 67 Xu J, Liu J, Cui D, et al. Laser-assisted forward transfer of multi-spectral nanocrystal quantum dot emitters. *Nanotechnology*, 2006, 18: 025403
 - 68 Shaw-Stewart J, Chu B, Lippert T, et al. Improved laser-induced forward transfer of organic semiconductor thin films by reducing the environmental pressure and controlling the substrate-substrate gap width. *Appl Phys A*, 2011, 105: 713–722
 - 69 Marinov V, Swenson O, Miller R, et al. Laser-enabled advanced packaging of ultrathin bare dice in flexible substrates. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol*, 2012, 2: 569–577
 - 70 Karlitskaya N S, Meijer J, Lange D, et al. Laser propulsion of microelectronic components: Releasing mechanism investigation. *Proc SPIE*, 2006, 6261: 62612P
 - 71 Hong J. Thermo-mechanical analysis of blister formation on a rigid substrate in blister-actuated laser-induced forward transfer. *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, 2020, 10: 637–643
 - 72 Papakonstantinou P, Vainos N A, Fotakis C. Microfabrication by UV femtosecond laser ablation of Pt, Cr and indium oxide thin films. *Appl Surf Sci*, 1999, 151: 159–170
 - 73 Zergioti I, Mailis S, Vainos N A, et al. Microdeposition of metal and oxide structures using ultrashort laser pulses. *Appl Phys A-Mater Sci Proce*, 1998, 66: 579–582
 - 74 Bian J, Zhou L, Wan X, et al. Laser transfer, printing, and assembly techniques for flexible electronics. *Adv Electron Mater*, 2019, 5: 1800900
 - 75 Young D, Auyeung R, A Piqué, et al. Plume and jetting regimes in a laser based forward transfer process as observed by time-resolved optical microscopy. *Appl Surf Sci*, 2015, 197: 181–187
 - 76 Luo H Y, Linghu C H, Song J Z. Recent advances on mechanics of transfer printing for flexible and stretchable electronics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 094610 [罗鸿羽, 令狐昌鸿, 宋吉舟, 等. 可延展柔性无机电子器件的转印力学研究综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 094610]
 - 77 Park J B, Choi W S, Chung T H, et al. Transfer printing of vertical-type microscale light-emitting diode array onto flexible substrate using biomimetic stamp. *Opt Express*, 2019, 27: 6832–6841
 - 78 Kim S, Jiang Y, Thompson Towell K L, et al. Soft nanocomposite electroadhesives for digital micro- and nanotransfer printing. *Sci Adv*, 2019, 5: eaax4790
 - 79 Luo H, Wang C, Linghu C, et al. Laser-driven programmable non-contact transfer printing of objects onto arbitrary receivers via an active elastomeric microstructured stamp. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 296–304
 - 80 Wang C, Linghu C, Nie S, et al. Programmable and scalable transfer printing with high reliability and efficiency for flexible inorganic electronics. *Sci Adv*, 2020, 6: eabb2393
 - 81 Saeidpourazar R, Sangid M D, Rogers J A, et al. A prototype printer for laser driven micro-transfer printing. *J Manufact Processes*, 2012, 14: 416–424
 - 82 Li R, Li Y, Lü C, et al. Thermo-mechanical modeling of laser-driven non-contact transfer printing: Two-dimensional analysis. *Soft Matter*, 2012, 8: 7122–7127

- 83 Saeidpourazar R, Li R, Li Y, et al. Laser-driven micro transfer placement of prefabricated microstructures. *J Microelectromech Syst*, 2012, 21: 1049–1058
- 84 Zhao Q, Qi H J, Xie T. Recent progress in shape memory polymer: New behavior, enabling materials, and mechanistic understanding. *Prog Polym Sci*, 2015, 49-50: 79–120
- 85 Iqbal D, Samiullah M H. Photo-responsive shape-memory and shape-changing liquid-crystal polymer networks. *Materials*, 2013, 6: 116–142
- 86 Eisenhaure J D, Sang Il Rhee J D, Al-Okaily A M, et al. The use of shape memory polymers for microassembly by transfer printing. *J Microelectromech Syst*, 2014, 23: 1012–1014
- 87 Eisenhaure J D, Xie T, Varghese S, et al. Microstructured shape memory polymer surfaces with reversible dry adhesion. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5: 7714–7717
- 88 Huang Y, Zheng N, Cheng Z, et al. Direct laser writing-based programmable transfer printing via bioinspired shape memory reversible adhesive. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 35628–35633
- 89 Kim S, Wu J, Carlson A, et al. Microstructured elastomeric surfaces with reversible adhesion and examples of their use in deterministic assembly by transfer printing. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 17095–17100
- 90 Hung Y H, Chien H L, Lee Y C. Excimer laser three-dimensional micromachining based on image projection and the optical diffraction effect. *Appl Sci*, 2018, 8: 1690
- 91 Auyeung R C Y, Kim H, Mathews S, et al. Laser forward transfer using structured light. *Opt Express*, 2015, 23: 422
- 92 Pena A, Wang Z, Whitehead D, et al. Direct writing of micro/nano-scale patterns by means of particle lens arrays scanned by a focused diode pumped Nd:YVO₄ laser. *Appl Phys A*, 2010, 101: 287–295

Advances in laser-assisted mass transfer of MicroLED

SUN NingNing, YANG Biao, CHEN FuRong, HU JinLong, YU HaiYang, BIAN Jing,
DUAN YongQing & HUANG YongAn

State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Mass transfer is a key technology for accurately transferring tens of millions of micrometer-scale MicroLED from the source substrate to the donor substrate. Major challenges, including transfer yield, transfer accuracy, and transfer efficiency, have impeded the manufacture of MicroLED displays. Various laser-assisted transfer technologies have been developed based on the interaction of the laser-material interface. These technologies have become an excellent transfer solution with significant potential owing to their advantages of minimal device damage, high selectivity, and fast as well as efficient response. This article first introduces current technologies, difficulties, and challenges of mass transfer, and further reviews the latest developments review laser-assisted transfer technologies ultrathin microdevices, including the basic principles of laser interaction, transfer process, and currently attained level. Finally, the prospects and challenges of mass transfer for different MicroLED applications are discussed.

MicroLED, mass transfer, laser-assisted transfer, laser lift off, dynamic release

doi: [10.1360/SST-2021-0234](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0234)