

文章编号 1004-924X(2024)09-1360-11

Micro-LED 芯片激光去除机理及工艺参数优化

乔健^{1,3}, 吴振铎¹, 彭信翰², 冉雨宣¹, 杨景卫^{1*}

(1. 佛山科学技术学院 广东省工业智能检测技术重点实验室, 广东 佛山 528000;

2. 深圳市海目星激光智能装备股份有限公司, 广东 深圳 518000;

3. 季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘要:为提高面板级 Micro-LED 显示面板的制造质量,需要对不良 Micro-LED 芯片进行原位去除与修复,利用 COM-SOL 建立激光双温烧蚀模型,开展了 Micro-LED 不良芯片激光去除机理和工艺参数的优化。通过单脉冲激光对 Micro-LED 芯片烧蚀所形成表面光斑的直径平方来推算 Micro-LED 的烧蚀阈值,拟合出激光参数与烧蚀深度的关系,并对双温烧蚀模型的准确性进行验证;分析了激光光斑重叠率、能量密度和不同扫描路径下对应芯片的烧蚀特征及去除机理,结合双温烧蚀模型完成了激光扫描路径及对应工艺参数的优化。结果表明,飞秒激光烧蚀模型对 Micro-LED 芯片激光烧蚀加工的最大分析误差为 9.28%,优化的激光去除模式实现了 1 秒/颗的快速精准剥离和焊盘表面的高质量整平修复,对大幅面 Micro-LED 显示面板规模化生产中不良芯片的快速修复具有重要的指导作用。

关键词:飞秒激光;原位去除;微发光二极管显示器;不良芯片

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243209.1360

Mechanism for laser-induced damage bad chip of Micro-LED and optimization of processing parameters

QIAO Jian^{1,3}, WU Zhenduo¹, PENG Xinhao², RAN Yuxuan¹, YANG Jingwei^{1*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Industrial Intelligent Inspection Technology,

Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Shenzhen Hymson Laser Intelligent Equipments Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

3. Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

* Corresponding author, E-mail: mejwyang@fosu.edu.cn

Abstract: To improve the manufacturing quality of Micro-LED display panels, it is crucial to perform in-situ removal and repair of defective chips. This study introduces a laser two-temperature ablation model developed with COMSOL to explore the mechanisms and process parameters for eliminating defective chips using a laser. Initially, the ablation threshold of the Micro-LED was identified by measuring the square diameter of the surface spot created by a single-pulse laser ablation. A fitting analysis was then carried out to determine the relationship between laser parameters and ablation depth, confirming the accuracy of the two-temperature ablation model. An extensive analysis was also conducted to examine the laser spot over-

收稿日期:2024-02-02;修订日期:2024-02-29.

基金项目:深圳市科技计划资助项目(No. KJZD20231023092302006);广东省重点建设学科科研能力提升项目(No. 2022ZDJS042)

lap rate, laser fluence, ablation characteristics, and removal mechanisms for different scanning paths on the affected chips. Utilizing the two-temperature ablation model, the laser scanning path and process parameters were optimized. The findings reveal that the femtosecond laser ablation model for Micro-LED has a maximum analytical error of 9.28%. The optimized laser removal method allows for rapid and precise removal at a rate of 1 s/chip, while ensuring high-quality repair of pad surfaces. This provides essential guidance for efficient repair processes in large-scale production environments of large-format Micro-LED display panels.

Key words: femtosecond laser; in-situ removal; Micro-LED; bad chips

1 引言

Micro-Light Emitting Diode (Micro-LED) 是指尺寸规格小于 50 μm 的三色 LED 芯片排成高密度集成阵列显示技术^[1],与目前液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)和有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)相比,具有高亮度、高比度、高分辨率、快响应和低能耗等优势^[2],在巨幅大屏显示、增强现实/虚拟现实(AR/VR)近眼显示^[3]、柔性显示^[4-6]等光显示领域有着广阔的应用前景,是下一代新型显示技术的主要发展方向。然而, Micro-LED 生产制程复杂,显示面板制造工序较多,尤其受材料、设备、环境等因素影响,整个制造中不可避免地产生缺陷,无法保证面板级 Micro-LED 显示面板品质,生产成本居高不下。因此, Micro-LED 不良芯片剥离去除及修复技术是 Micro-LED 显示面板生产的关键环节,同时也是提升 Micro LED 显示屏整体良率的必备制程。为确保 Micro-LED 显示面板长时间可靠点亮, Herry 等^[7]在芯片制造过程中通过并行方式将两个量子阱连接,实现芯片的冗余备用。Liu 等^[8]提出将两个 LED 并联后与另外两个 LED 串联,解决了在短路或者开路状态下都能稳定点亮的难题,芯片冗余备份实现了 Micro-LED 芯片的持续点亮,但备用芯片占用高集成基板的电路和空间,制备过程需要将 2 倍以上良品芯片转移到显示基板,且无法满足 Micro-LED 芯片的高密度集成设计。Henley 等^[9]通过电致检测法对转移的芯片进行检测,并采用激光束寻址方式将良品芯片释放,达到精确选择性转移,实现芯片的高密度集成,但仅实现了巨量转移^[10]前芯片筛选,无法对转移过程中产生的不良芯片进行修复。

激光加工具有精度高、速度快和易控制等优势,广泛应用在金属、非金属等领域,尤其是脉冲短、峰值功率高的飞秒激光,其脉冲持续时间通常小于材料晶格的热传导时间,在激光加工过程中产生的热效应小^[11],应用在半导体等硬质材料的微纳加工中^[12]。Kamlage 等^[13]采用飞秒激光螺旋扫描模式实现了 1 mm 不锈钢板圆柱通孔及类圆柱形结构的高质量加工。Chen 等^[14]构建出基于双温模型^[15-16]的可视化烧蚀模型,准确预测出飞秒激光对单晶硅的实际加工量。Ozono 等^[17]通过飞秒激光实现了 GaN 半导体加工。WANG 等^[18]研究了飞秒激光和氮化镓的非线性演化过程,使用一步飞秒激光制造方法制备的氮化镓薄膜的内部量子效率提高了 3 倍,光致发光强度提高了 5.5 倍。研究表明,波长小于 365 nm 的紫外激光对 GaN 材料具有较高吸收率^[19],同时加工过程产生的热影响区较小,成为 Micro-LED 芯片快速去除的最优选择。因此,开展紫外飞秒激光对 Micro-LED 不良芯片的快速精准去除对 Micro-LED 芯片高密度集成、大幅面 Micro-LED 显示面板品质提升及生产成降低具有重要意义。然而,有关 Micro-LED 不良芯片剥离去除的研究均处于探索阶段,尚未形成面板级 Micro-LED 不良芯片精准剥离去除的技术方案。

本文采用热影响区较小的紫外飞秒激光开展 Micro-LED 不良芯片的激光去除技术研究,搭建出芯片激光去除实验平台,建立了激光双温烧蚀模型来探索激光烧蚀 Micro-LED 芯片的去除机理,分析优化出激光加工模式及工艺参数,解决快速精准剥离和焊盘表面高质量整平修复的技术难题,为大幅面 Micro-LED 显示面板规模化生产提供技术支撑。

2 实 验

2.1 实验材料

实验中对外延生长制备的 GaN 基 Micro-LED 芯片基板进行加工,如图 1 所示。基板芯片的主要成分为掺杂 GaN 材料,单个 LED 芯片样品的规格尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}\times 15\text{ }\mu\text{m}\times 6\text{ }\mu\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),基板电路和芯片间焊料层高度为 $3\text{ }\mu\text{m}$,通过激光回流焊方式在基板电路板上形成电气连通。

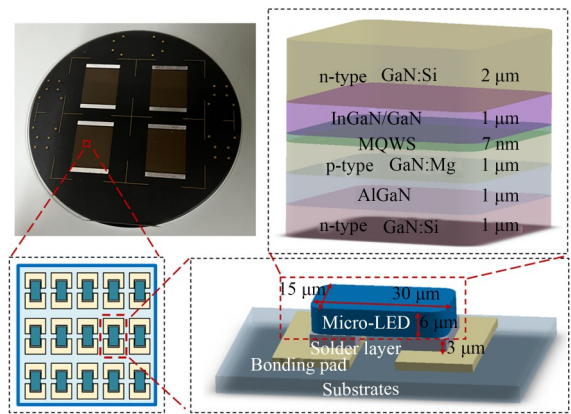


图 1 GaN 基 Micro-LED 样品结构示意图

Fig. 1 Material structure of GAN-based Micro-LED sample

2.2 实验装置

实验采用的飞秒激光加工系统主要由激光器、光束整形器、衰减器、扫描振镜、可切换物镜、Z轴升降台、XY轴移动平台以及计算机控制终端等部分组成,单轴运动精度为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,如图 2

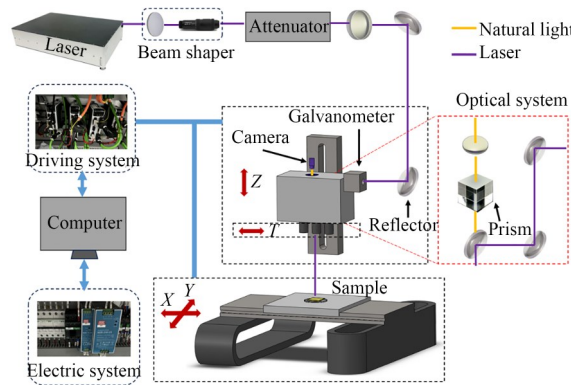


图 2 飞秒激光加工系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of femtosecond laser processing system

所示。对应激光加工的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 激光加工的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of laser processing

Parameter	Value
Wavelength/nm	355
Power/W	<10
Pulse width/fs	300
Frequency/kHz	250~5 000
Optical quality/M ²	1.3
Spot roundness	0.957

2.3 实验方法

实验中通过激光扫描全覆盖实现对 Micro-LED 芯片的烧蚀去除,对应激光焦平面光斑直径为 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 可调节。由于扫描过程中,单点光斑相互重叠面积直接影响去除深度和加工质量,因此,需要对光斑重叠率及扫描路径进行优化。同时,发射激光具有位置同步输出功能,能够实现脉冲点间距的自动调节。实验采用的扫描去除路径如图 3 所示,在扫描方向上对应重叠率计算如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{d}{2\omega_0}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: ω_0 为光束的束腰半径, d 为相邻点间距。工程中需同时兼顾芯片的去除质量和效率,通过测量每次扫描去除深度和表面粗糙度来表征芯片的准确去除率,综合评价不同路径下芯片的去除效率和去除质量。实验过程中,通过 KEYENCE VHX-1000C 激光扫描共聚焦显微镜 (LSCM) 测量烧蚀区深度及去除芯片的焊盘粗

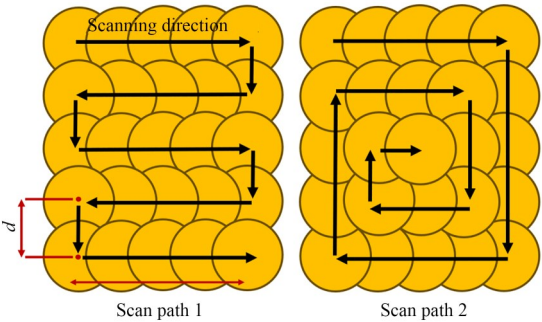


图 3 两种扫描路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two scan paths

糙度,利用 Apreo-s 型扫描电子显微镜(SEM)来表征去除焊盘的表面形貌。

3 原理和仿真

3.1 烧蚀阈值测算

为准确掌握激光加工 GaN 基 Micro-LED 芯片的烧蚀能量密度区间,通常在实验过程中采用面积推算的方法^[20]来确定烧蚀阈值能量密度 F_{th} ,相应烧蚀面积 D 与激光强度近似成对数关系:

$$F_{th} = F \cdot \exp(-D^2/2\omega_0^2), \quad (2)$$

$$F = 2P/\pi\omega_0^2 f, \quad (3)$$

其中: P 为激光平均功率, f 为脉冲重复频率。当烧蚀区域直径 D 减小到 0 时,所对应的能量密度 F 即为材料的烧蚀阈值 F_{th} 。

在激光单脉冲烧蚀阈值测算中,将波长 355 nm、脉宽为 300 fs 的激光束聚焦到 Micro-LED 芯片表面,并将光斑直径调整为 5 μm 。在同一激光参数下分别发出 3 个脉冲点进行实验,通过共聚焦显微镜测量不同烧蚀孔直径,并取平均值。单脉冲烧蚀阈值实验结果如图 4 所示,可以看出,芯片表面的烧蚀孔径平方与入射激光能量密度(对数值)呈线性关系, GaN 基 Micro-LED 的激光烧蚀阈值为 0.31 J/cm^2 。

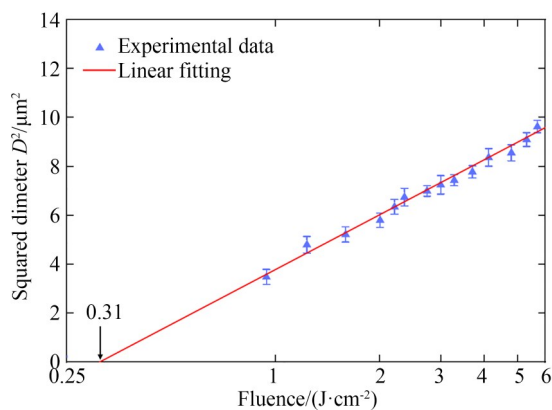


图4 表面烧蚀孔直径平方与能量密度的关系

Fig. 4 Squared diameters of ablated regions correlated with applied laser fluence

3.2 双温模型

为探索 GaN 基 Micro-LED 芯片的激光烧蚀机理,本文在烧蚀模型建立过程中考虑二维几

何-时间之间的关系以及电子-晶格的温度变化情况,提出基于 COMSOL®multiphysics 的飞秒烧蚀模型。由于飞秒激光加工中对应烧蚀过程无法用宏观热交换模型直接表征^[15-16],并且对应飞秒激光能量密度相对较小,因此,忽略对能量影响较小的载流子势能,通过扩展抛物线型双温模型^[14-16]来描述系统温度的时间演化:

$$c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) - a_k (T_e - T_l) + S(z, \omega_0, t), \quad (4)$$

$$c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) + a_k (T_e - T_l), \quad (5)$$

其中: $S(z, \omega_0, t)$ 表示包含激光吸收机制在内的激光源项, t 为作用时间, r 为从中心到烧蚀区边缘坐标, T_e 为电子系统温度, T_l 为晶格系统温度, k_e 为电子导热系数, C_e 为电子比热容, C_l 为晶格比热容, a_k 为电子-晶格耦合系数, z 为沿激光光轴方向垂直于材料表面的内部深度。式(4)和式(5)分别描述了电子系统和晶格系统的能量平衡过程。除 $S(z, \omega_0, t)$ 项外,其他参数均由材料决定。

所提模型中,假设表面热能可沉积,并通过边界热通量建模,对应内热热流密度公式为:

$$-n \cdot (-k_l \nabla T) = 2P(1-R) \cdot \exp(-r^2 / \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2) / \pi \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2, \quad (6)$$

式中: T 为温度, P 为激光平均功率, R 为材料表面反射率。随着烧蚀深度的增加,激光强度逐渐减小,对应材料内部的激光强度变化可表示为^[21]:

$$I = \frac{4P}{\sqrt{\frac{\pi}{\ln 2 t_{pf}}}} (1-R) \times \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} - (4 \ln 2) \frac{t^2}{t_{pf}^2} - \int_0^Z a dx\right), \quad (7)$$

式中: t_{pf} 为激光脉冲持续时间, Z 为到表面距离。

在飞秒激光烧蚀瞬间,材料吸收的激光能量远大于热辐射和热对流损失能量。因此,模拟过程中仅针对材料内部电子和晶格体系的热传导过程,在空间和时间上分别定义超快脉冲激光产生的点热源,并通过求解经典双温度模型中式(4)和式(5)的偏微分方程来获得电子系统和晶格系统中的温度变化。因此,以限制热传导系统与外界环境的传热关系设置为边界条件,假设

材料边界处于绝热状态,对应边界条件设为:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = 0. \quad (8)$$

3.3 烧蚀模型

在测算出烧蚀阈值后,为进一步模拟激光辐照材料后烧蚀凹坑的形状,在本模型仅模拟固相状态,假设材料表面温度不会显著超过汽化温度 T_{vap} ,在模型中通过使用对流量边界条件来表示,定义为:

$$\Phi_{\text{vap}} = h(T - T_{\text{vap}}), \quad (9)$$

其中: Φ_{vap} 为汽化通量, h 为数值参数, T_{vap} 为汽化温度。

假设固气界面能量平衡,表示为:

$$\rho L_v u_{\text{vap}} \cdot n = \Phi_{\text{vap}} \cdot n, \quad (10)$$

式中: ρ 为材料密度, L_v 为汽化潜热, u_{vap} 为物质离开界面的速度, n 为固体面的法向量,表面被认为可以自由移动,以适应物质损失而导致的几何变化。使用变形几何设置法向网格速度 v_n 为:

$$v_n = \Phi_{\text{vap}} / (\rho \cdot L_v). \quad (11)$$

3.4 汽化温度

模拟中材料参数设置为 GaN 参数,输入已测算的 GaN 基 Micro-LED 烧蚀阈值 0.31 J/cm^2 作为激光能量密度,光斑直径为 $5 \mu\text{m}$,脉宽为 300 fs。经模拟,材料表面最大温度为 2 970 K,即汽化温度为 2 970 K,如图 5 所示。

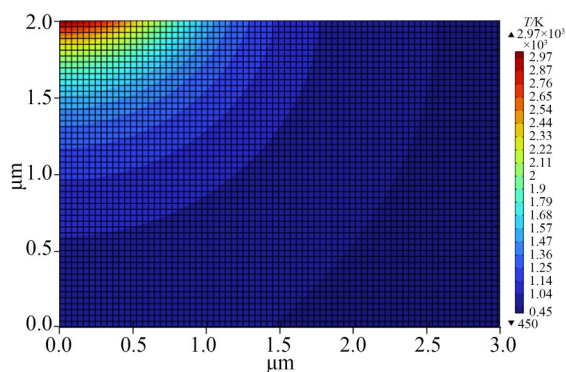


图 5 汽化温度的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of vaporization temperature

4 结果与分析

4.1 仿真结果

在 COMSOL® 多物理场的二维轴对称函数建立了几何模型,在激光波长为 355 nm、光斑直

径为 $5 \mu\text{m}$ 、脉宽为 300 fs、频率为 1 000 kHz、光照时间为 300 fs、脉冲能量密度为 2.20 J/cm^2 的条件下,飞秒激光加载烧蚀孔的三维形状如图 6(a) 所示。激光烧蚀孔深为 $0.83 \mu\text{m}$,烧蚀区域半径为 $1.26 \mu\text{m}$,相应的二维截面如图 6(b) 所示。图 6(c) 给出了晶格体系的等温线呈抛物线状,等温烧蚀孔呈碗状浅坑状。不同深处对应电子与晶格温度在材料内 4 个深度位置随时间的变化曲线如图 6(d) 所示。可以看出,电子温度在短时间内上升至最大值,随后逐渐下降,表明材料吸收层内不同位置处的最大电子温度不同;随着距离飞秒激光烧蚀表面越大,电子温度最大值越小,电子晶格的平衡温度也越小,在 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 μm 处的电子温度-晶格温度的耦合时长分别为 2.60, 2.69, 2.78, 2.87 ps, 耦合时间随深度增加呈增大趋势。

为进一步验证模拟准确性,进行了飞秒激光单脉冲烧蚀实验。将波长为 355 nm、单脉冲为 300 fs 激光聚焦到 Micro-LED 芯片表面,在光斑直径为 $5 \mu\text{m}$ 的条件下,对 5 个芯片分别进行单点烧蚀,然后用扫描电子显微镜和共聚焦显微镜观察烧蚀后对应微孔的形貌,统计出 5 个微孔深度的平均值。

图 7 给出不同能量密度下对应烧蚀深度的实验与模拟结果。可以看出,在能量密度 $1.13 \sim 3.05 \text{ J/cm}^2$ 之间,模拟结果与实验结果吻合较好,最大误差仅为 2.52%;当能量密度达 3.36 J/cm^2 时,最大误差为 6.56%,所建立的激光双温烧蚀模型能有效确定烧蚀深度与单脉冲能量的关系,并预测烧蚀点深度;当烧蚀平均深度达 $0.91 \mu\text{m}$,模拟预测深度与实验测量误差随激光能量密度的增大而增大。此时,由于单脉冲激光能量较大,对应烧蚀深度增加,产生的等离子体无法实时溅射排走,且熔融材料的流动也受到相应阻碍;尤其是激光对材料烧蚀到一定深度时,解离污染物无法及时排出,限制了激光能量在垂直方向的持续烧蚀^[22],因此,单脉冲飞秒激光在孔洞烧蚀方面存在“饱和”深度。

芯片厚度为 $6 \mu\text{m}$ 时,彻底去除需要采取多道次激光扫描方式。按照激光烧蚀模型预测出每次烧蚀的去除深度,优化出加工道次和单次加工后激光焦点的移动距离。烧蚀去除过程中,受

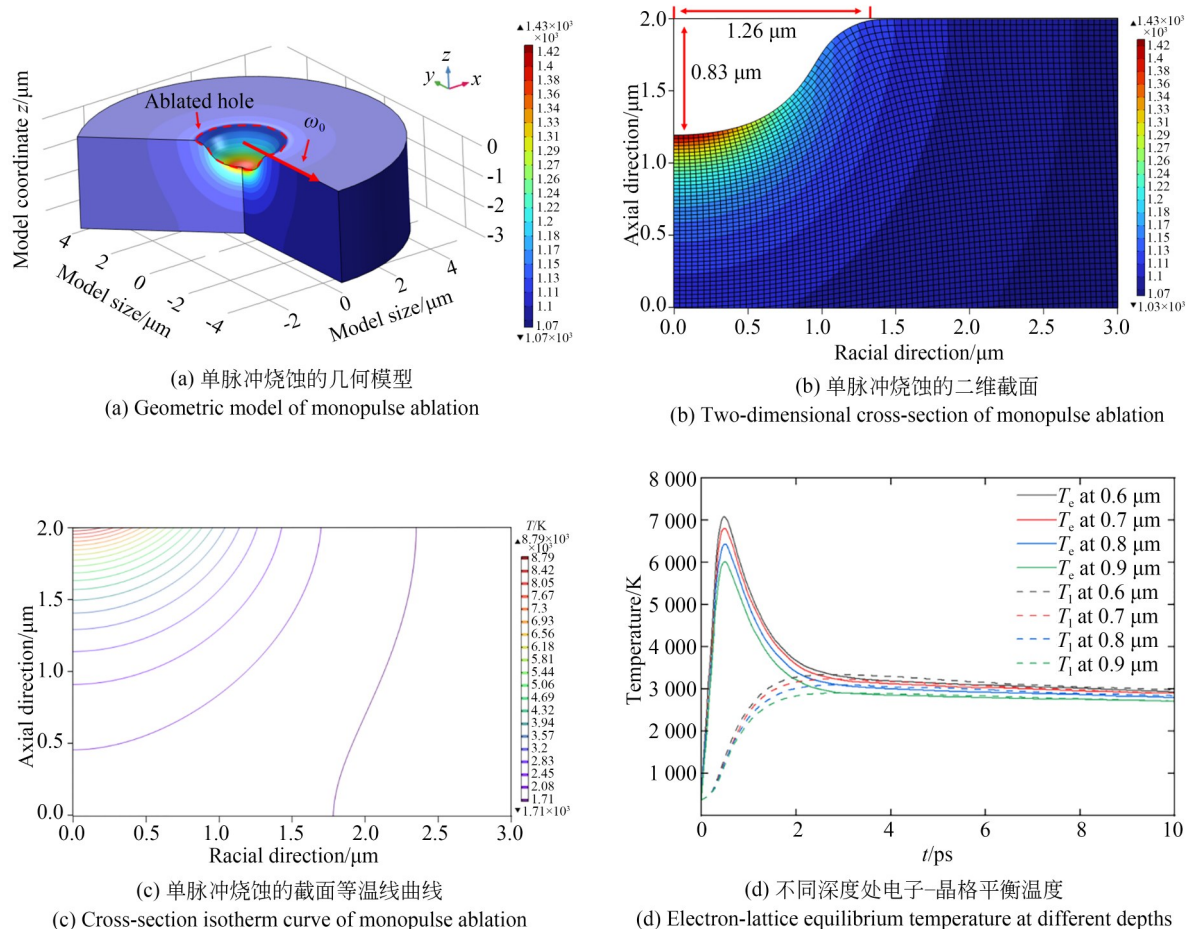


图6 单脉冲激光烧蚀仿真结果

Fig. 6 Simulation results of monopulse laser ablation

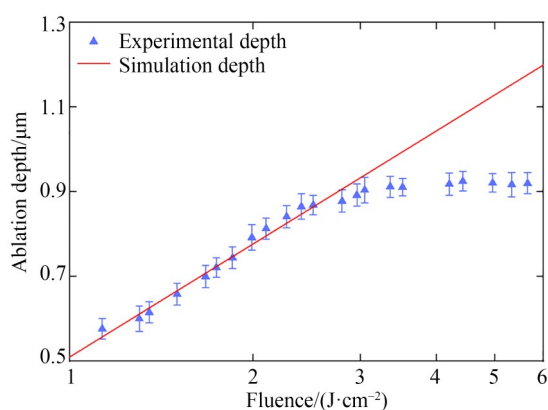


图7 烧蚀深度实验与模拟结果

Fig. 7 Results of experimental and simulation ablated depth

到激光功率、扫描方式和光斑重叠率等因素的影响,采取单因素单次扫描实验来优化加工形式,并结合激光烧蚀模型进行扫描去除实验来确定

最佳工艺参数。为提高去除效率,采用1 000 kHz激光频率、脉宽300 fs、单脉冲形式进行实验。

4.2 扫描路径对烧蚀形貌的影响

在光斑间距 $d=1\ \mu\text{m}$, $F=2.52\ \text{J}/\text{cm}^2$,扫描次数 $n=1$ 的条件下,对应扫描路径1和扫描路径2的表面形貌如图8所示。可以看出,激光烧蚀去除后在焊盘上残留飞溅颗粒,并且小光斑间距引起芯片的温度瞬间急剧上升到汽化甚至电离,熔融材料在汽化驱动力作用下产生飞溅喷射,为此工程实际中需要及时回收溅射的材料颗粒,避免污染物影响到周围芯片。去除过程中,光斑重叠通常出现热累积效应,相邻两条扫描路径和转角处均出现 $1.1\ \mu\text{m}$ 的圆弧微坑,从图8(b)可以看出,扫描方式2在中心处重叠率较高,热累积效应更为严重,对应温度梯度引起较大热应力,导

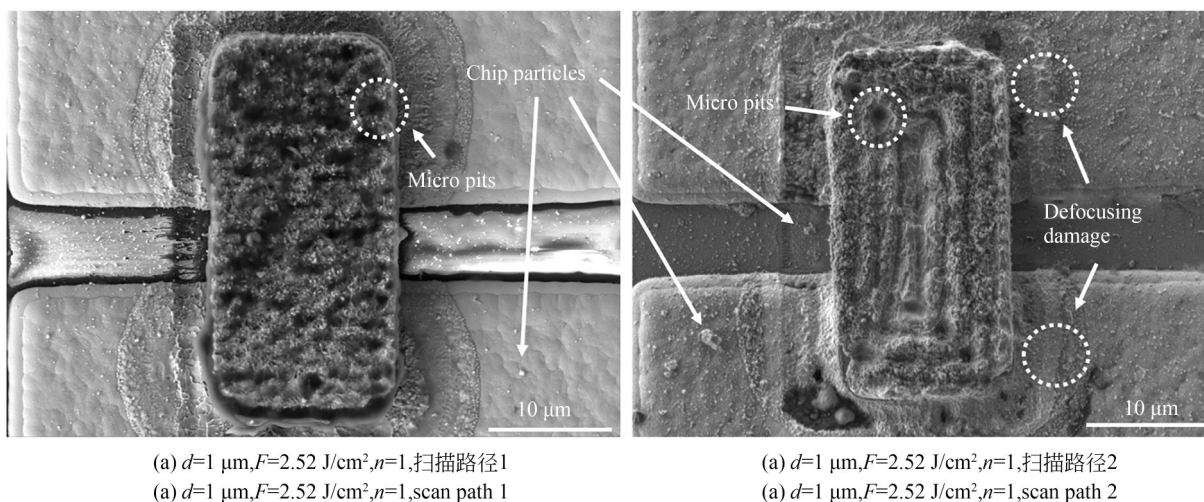


图 8 两种扫描路径的表面形貌比较

Fig. 8 Comparison of surface topography of two scanning paths

致扫描路径 2 喷溅的芯片颗粒多于扫描路径 1, 扫描路径 1 的加工表面质量明显优于扫描路径 2。在对芯片边缘进行烧蚀时, 芯片边缘漏出的离焦光斑使基板相应位置出现一定程度的烧蚀。

4.3 光斑覆盖率对烧蚀形貌的影响

通过扫描路径 1, 在 $F=1.61\ \text{J}/\text{cm}^2$ 及扫描次数 $n=1$ 的条件下, 不同光斑间距的芯片烧蚀表面形貌如图 9 所示。当光斑间距 $d=3\ \mu\text{m}$ 时, 在 LED 芯片表面可明显看到单脉冲激光烧蚀的孔及周围有熔融物质, 等离子体无法通过溅射完全去除, 烧蚀区域边缘产生再凝固现象, 并且中心

烧蚀最深。同时, 激光烧蚀时熔池材料膨胀飞溅, 较大光斑间距在重叠区域和未重叠区域之间材料的温度梯度较大, 产生的热应力使该层边缘表面破裂、撕裂, 在芯片边缘表面残留有未被烧蚀去除碎片, 从图 9(a) 可以看到应力断裂的痕迹。在光斑间距 $d=2\ \mu\text{m}$ 的条件下, 光斑重叠率增大, 激光烧蚀孔熔融物质在蒸发压力下积累, 使重叠环状凹坑被覆盖, 减小了芯片烧蚀表面的粗糙度, 如图 10 所示。在 4 种光斑间距下, 当光斑间距 $d=1\ \mu\text{m}$ 时, 单次激光扫描覆盖后芯片的表面粗糙度最小; 随着光斑重叠率的提高, 热累积效应增强, 烧蚀的最大深度由光斑中心点向光斑重叠点深度过渡, 扫描覆盖区边缘处热影响区增大, 如图 9(b) 所示; 当光斑间距 d 减小至 0.5

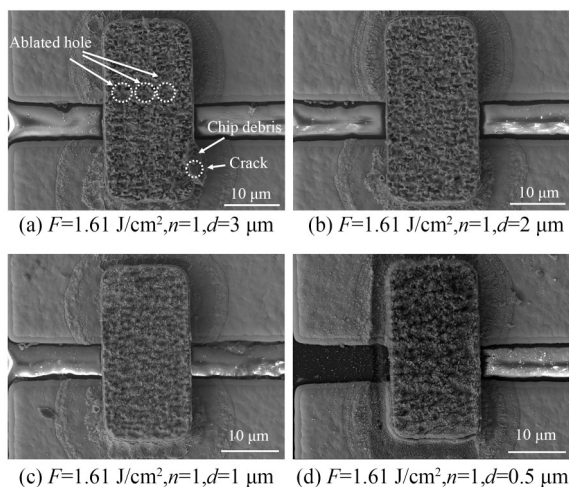


图 9 不同激光光斑间距下芯片烧蚀表面形貌

Fig. 9 Surface morphology of chip ablated under different laser spot spacing

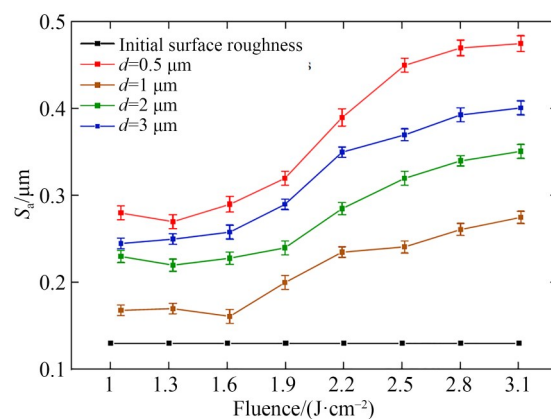


图 10 不同间距下芯片的表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness of chip under different spacings

μm 时,光斑重叠区域产生微坑,焊盘也出现了激光离焦损伤,光斑重叠点对应的烧蚀深度最大。

4.4 能量密度对烧蚀深度的影响

为进一步验证激光烧蚀模型下激光扫描覆盖烧蚀实验的准确性,选取扫描路径 1、光斑间距 $d=1\text{ }\mu\text{m}$ 进行单次扫描烧蚀实验。当能量密度在 $1.21\sim 1.65\text{ J/cm}^2$ 之间时,烧蚀深度和模拟预测误差在 $1.34\%\sim 3.57\%$ 之间,能量密度为 $1.85, 2.11$ 和 2.42 J/cm^2 时对应烧蚀深度和模拟预测误差分别为 $6.85\%, 9.28\%$ 和 8.32% ,如图 11 所示。可以看出,在该扫描路径和光斑间距下,随着能量密度的增大和相邻烧蚀区层高的降低,重叠区域热累积效应增加,原本无法溅射出的部分等离子体被释放,对应最大烧蚀深度与光斑中心

轴不重合,导致光斑重叠区域的深度最大。但随着能量密度的提升,重叠区域的加工深度接近“饱和”;当能量密度增大到 $2.42\sim 3.52\text{ J/cm}^2$,烧蚀深度和模拟预测误差逐渐减小,在达到“饱和”深度前预测深度误差为 $1.34\%\sim 9.28\%$,表明所建立双温烧蚀模型对激光覆盖扫描芯片的烧蚀深度的预测准确性较高。当能量密度超过 3.52 J/cm^2 时,因烧蚀深度达到“饱和”,预测误差增大,芯片烧蚀能量密度不超过 3.52 J/cm^2 。

4.5 工艺参数对芯片去除的影响

不良芯片去除修复时,需通过对焊盘整平工艺才能实现可靠连接,因此,不良芯片快速去除过程中需保证焊盘的残余焊料层平整度不超过 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 。

4.5.1 参数设置

由于单次扫描烧蚀无法一次精准去除 $6\text{ }\mu\text{m}$ 芯片,需采取多道次逐层扫描烧蚀方式来实现。在激光扫描速度为 100 mm/s 下,单层覆盖芯片时间为 4.5 ms ,激光层间 Z 轴移动时间为 0.15 s 。在光斑间距 $d=1\text{ }\mu\text{m}$,扫描路径 1 下,层间通过反向原路逐点模式实现去除。扫描层数 n 的选取方式如下:

$$xn=6\text{ }\mu\text{m}, \tag{12}$$

式中 x 为单层次烧蚀预测深度。利用双温烧蚀模型模拟结果,结合模拟及具体实验分析,对应实验参数下所需的加工时间如表 2 所示。

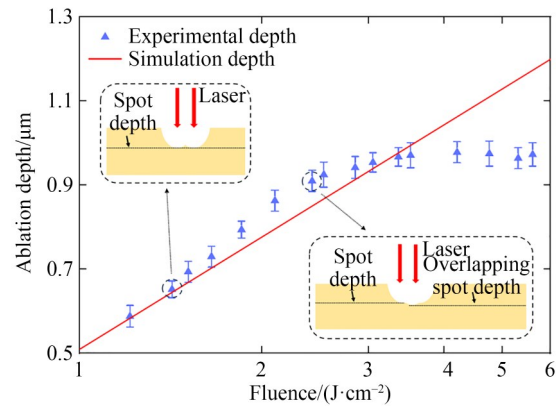


图 11 烧蚀层深度实验与模拟结果
Fig. 11 Results of experimental and simulated ablative depth

表 2 激光多层扫描去除芯片实验参数
Tab. 2 Experimental parameters of laser-induced damage bad chip

Sample No.	Fluence/(J·cm ⁻²)	Predicted ablation depth/μm	Scan times	Processing time/s
1	1.32	0.60	10	1.36
2	1.51	0.67	9	1.21
3	1.93	0.75	8	1.06
4	2.52	0.86	7	0.91

4.5.2 去除效果分析

在表 2 参数下,实验实现了芯片去除。但由于芯片正负电极设计差异导致对应焊盘表面正极焊料层均高于负极焊料层,去除后芯片的表面形貌如图 12 所示。能量密度为 1.32 J/cm^2 的第 1 组实验,正极残余焊料层高度为 $2.43\text{ }\mu\text{m}$,负极高

度为 $1.77\text{ }\mu\text{m}$;能量密度为 1.51 J/cm^2 的第 2 组实验,正极残余焊料层高度为 $2.21\text{ }\mu\text{m}$,负极高度为 $1.76\text{ }\mu\text{m}$;能量密度为 1.93 J/cm^2 的第 3 组实验,正极残余焊料层高度为 $2.13\text{ }\mu\text{m}$,负极高度为 $1.71\text{ }\mu\text{m}$;但随着能量密度的增大,光斑重叠区域对应的烧蚀深度最大,去除芯片后漏出的焊料层

高度降低。当能量密度增大到 2.52 J/cm^2 时,负极焊料层被完全烧蚀,两边焊料层平整度差 $2.41 \mu\text{m}$,超过了允许的 $0.7 \mu\text{m}$,同时在较大能量密度下多次扫描芯片烧蚀表面的平整度较差。

综合考虑表 2 给出的去除时间和正、负极焊

盘对应残余焊料层平整度不超过 $0.7 \mu\text{m}$ 的要求,能量密度为 1.93 J/cm^2 的第 3 组实验参数下芯片的去除效率最高,质量最好。因此,能量密度 F 为 1.93 J/cm^2 ,频率 f 为 $1\,000 \text{ kHz}$,光斑间距 d 为 $1 \mu\text{m}$,扫描路径 1,通过 8 次反复扫描去除,是芯片的最优去除条件。

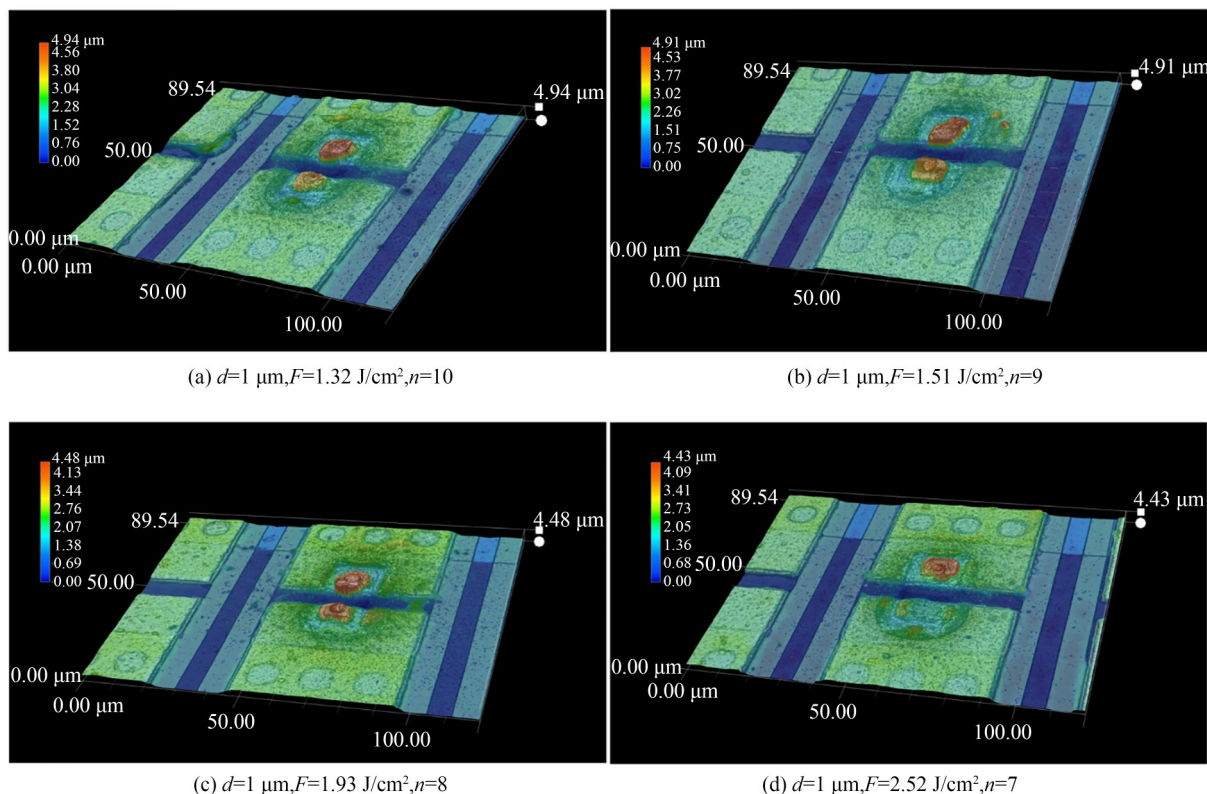


图 12 芯片去除后残留的三维形貌

Fig. 12 Three-dimensional morphology after removing chip

5 结 论

本文利用 COMSOL 建立了激光双温烧蚀模型,开展了激光烧蚀芯片的去除机理和工艺参数研究。完成了单脉冲激光对 Micro-LED 芯片烧蚀作用,通过芯片表面烧蚀光斑的直径平方来推算 Micro-LED 烧蚀阈值,拟合出激光参数与烧蚀深度的关系曲线,并验证了双温烧蚀模型的准确性;研究了不同扫描路径、光斑重叠率和能量密度对芯片的烧蚀特征及去除机理,最后,结合双温烧蚀模型对激光扫描路径和工艺参数进行优化分析。结果表明,飞秒激光烧蚀模型对芯片激

光烧蚀加工的最大分析误差为 9.28% ,可有效指导激光对芯片的去除烧蚀加工。同时,阐明了飞秒激光烧蚀去除芯片过程中热烧蚀和热应力引起的芯片去除加工机理,得出在激光能量密度为 1.93 J/cm^2 ,频率为 $1\,000 \text{ kHz}$,光斑间距为 $1 \mu\text{m}$ 的条件下,依靠扫描路径 1,通过 8 次反复扫描去除,芯片去除效果最优,达到 1 秒/颗的快速精准剥离和正、负极焊盘表面焊料层平整度小于 $0.7 \mu\text{m}$ 的高质量除晶整平。本研究对大幅面 Micro-LED 显示面板规模化生产中不良芯片的快速修复具有重要指导作用。

参考文献:

- [1] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.* Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
- [2] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light Science & Applications*, 2018, 7: 17168.
- [3] ZHANG L, OU F, CHONG W C, *et al.* Monochromatic active matrix micro-LED micro-displays with $>5,000$ dpi pixel density fabricated using monolithic hybrid integration process[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(S1): 333-336.
- [4] LEE H E, CHOI J, LEE S H, *et al.* Monolithic flexible vertical GaN light-emitting diodes for a transparent wireless brain optical stimulator [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(28): e1800649.
- [5] KANG S M, LEE H E, WANG H S, *et al.* Self-powered flexible full-color display via dielectric-tuned hybri-mer triboelectric nanogenerators [J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(11): 4097-4107.
- [6] LEE H E, LEE D, LEE T I, *et al.* Wireless powered wearable micro light-emitting diodes[J]. *Nano Energy*, 2019, 55: 454-462.
- [7] HENRY W, PERCIVAL C. ILED displays: next generation display technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 747-750.
- [8] LIU Y T, LIAO K Y, LIN C L, *et al.* PixeLED display for transparent applications[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 874-875.
- [9] HENLEY F J. combining engineered EPI growth substrate materials with novel test and mass-transfer equipment to enable MicroLED mass-production [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 688-691.
- [10] 王伟, 赵甜甜, 刘强, 等. Mini/Micro LED巨量转移技术研究与发展现状[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(2): 183-199.
- WANG W, ZHAO T T, LIU Q, *et al.* Research and development status of Mini/Micro LED mass transfer technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2): 183-199. (in Chinese)
- [11] 马玉平, 张遥, 魏超, 等. 飞秒激光抛光CVD金刚石涂层表面[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 164-171.
- MA Y P, ZHANG Y, WEI CH, *et al.* Surface polishing of CVD diamond coating by femtosecond laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 164-171. (in Chinese)
- [12] ZENG D W, LI K, YUNG K C, *et al.* UV laser micromachining of piezoelectric ceramic using a pulsed Nd: YAG laser [J]. *Applied Physics A*, 2004, 78(3): 415-421.
- [13] KAMLAGE G, BAUER T, OSTENDORF A, *et al.* Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 307-310.
- [14] CHEN C, ZHANG F, ZHANG Y, *et al.* Single-pulse femtosecond laser ablation of monocrystalline silicon: a modeling and experimental study[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 576: 151722.
- [15] MOSER R, DOMKE M, WINTER J, *et al.* Single pulse femtosecond laser ablation of silicon-a comparison between experimental and simulated two-dimensional ablation profiles [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2018, 7(4): 255-264.
- [16] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* [M]. 7th expanded ed. Oxford: Pergamon Press, 1980
- [17] OZONO K, OBARA M, USUI A, *et al.* High-speed ablation etching of GaN semiconductor using femtosecond laser [J]. *Optics Communications*, 2001, 189(1/2/3): 103-106.
- [18] WANG F F, JIANG L, SUN J Y, *et al.* One-step fabrication method of GaN films for internal quantum efficiency enhancement and their ultrafast mechanism investigation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(6): 7688-7697.
- [19] 张俊, 张为国. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 25-31.
- ZHANG J, ZHANG W G. Micro-LED laser lift-off research of GaN on AlN of sapphire substrate [J]. *Laser Technology*, 2023, 47(1): 25-31. (in Chinese)
- [20] BONSE J, RUDOLPH P, KRÜGER J, *et al.* Femtosecond pulse laser processing of TiN on silicon[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 154/155:

659-663.

- [21] CAI X T, JI C Y, WANG Z, *et al.* Ultrafast processes simulation under femtosecond laser irradiation of Gallium Nitride thin films[J]. *Computational Materials Science*, 2022, 214: 111627.

- [22] LE HARZIC R, BREITLING D, WEIKERT M, *et al.* Ablation comparison with low and high energy densities for Cu and Al with ultra-short laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2005, 80 (7) : 1589-1593.

作者简介:



乔 健(1980—),男,山西忻州人,博士,教授,博士生导师,2003年、2008年于吉林大学分别获得学士和博士学位,主要从事光学精密传动机构设计、光学精密检测技术、Micro-LED 修复技术与装备等方面的研究。E-mail: qiaojj99065@163.com

通讯作者:



杨景卫(1983—),男,河南许昌人,博士,副教授,硕士生导师,2007年于吉林大学获得学士学位,2015年于华南理工大学获得博士学位,主要从事机电一体化、焊接自动化等方面的研究。E-mail:mejwyang@fosu.edu.cn