

激光减材技术在微系统制造中的前沿应用与未来趋势

汤春江 王彦圣 刘俊夫 刘进鸿

中国电子科技集团公司第四十三研究所, 微系统安徽省重点实验室 安徽 合肥 230088

摘要: 随着科技进步, 微系统技术已成为现代制造业的重要发展方向。微系统通过微加工技术制造, 广泛应用于生物医学、智能制造、环境监测、航空航天等领域。激光减材加工技术作为微系统制造的重要手段, 利用激光束与材料相互作用实现材料去除, 具有高精度、非接触、快速加工等优势, 特别适合微系统中金属、玻璃、陶瓷等硬质材料的加工。传统加工方法面临精度和加工深度控制的瓶颈, 而激光减材加工能够解决这些问题。激光减材加工在微系统领域具有广泛应用, 未来将随着新材料和工艺的涌现, 推动微系统向小型化、智能化、多功能集成化方向发展。本文将探讨激光减材技术在金属、玻璃和陶瓷领域的应用现状与挑战。

关键词: 激光减材技术; 微系统; 金属材料; 陶瓷材料; 玻璃材料

引言

随着科技的不断进步, 微系统技术已成为现代制造业的一个重要发展方向。微系统 (MicroSystem) 通常是指通过微加工技术制造的尺寸在微米级别的系统, 涵盖了微传感器、微执行器、微机电系统 (MEMS)、微型化的集成电路等, 这些微系统被广泛应用于生物医学、智能制造、环境监测、航空航天、汽车电子等领域^[1]。特别是在微电子行业, 随着智能设备、物联网、人工智能以及自动化技术的发展, 微系统的需求急剧增加^[2]。同时, 随着新型材料和先进制造工艺的不断涌现, 微系统的应用领域也将逐步扩展, 诸如智能医疗、智慧城市、无人驾驶、虚拟现实等新兴领域, 都将为微系统提供广阔的市场空间^[3]。

随着对高性能、低功耗、高集成度和高可靠性的需求不断增长, 微系统制造的复杂性和挑战性也日益增加^[4]。传统的加工技术在精度、灵活性和适应性方面常常面临瓶颈, 以传统切削方法为例, 由于刀具摩擦导致材料形变常会使得加工深度与尺寸难以控制。这为激光减材技术提供了巨大的应用空间, 激光减材加工技术已经成为微系统制造中不可或缺的一部分^[5]。激光具有极高的能量密度和可控性, 使其在微米甚至纳米级别的加工中表现出独特的优势^[6]。激光加工技术不仅适用于金属, 还广泛应用于玻璃、陶瓷、塑料等材料, 能够满足微系统制造中对复杂形状、精密度和表面质量的高要求^[7]。

本文旨在探讨激光减材加工技术在微系统制造中的前沿应用, 特别是在金属、玻璃和陶瓷这三种材料中的实际应用与挑战, 如图1所示。本文将首先介绍激光减材加工的基本原理, 并重点分析其在金属、玻璃和陶瓷领域的应用现状。然后, 本文将探讨激光加工在这些材料

上的优势与面临的挑战。通过对激光减材加工技术在微系统制造中的研究与总结, 本文希望为该领域的技术发展与创新提供有价值的参考, 促进激光加工技术在更广泛应用中的深入研究与实践。

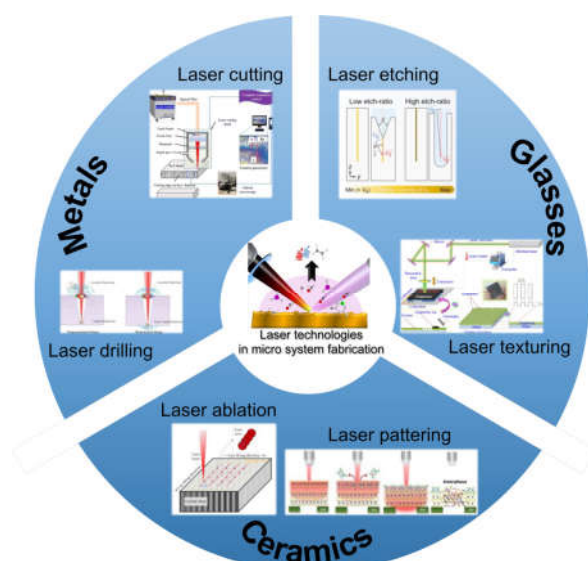


图1 激光减材技术在微系统制造中的应用

1 激光减材加工原理及优势

激光减材加工技术是一种利用高能量密度的激光束进行材料去除的加工方法。其基本原理是通过激光光束聚焦到材料表面, 利用激光与物质的相互作用产生热效应, 导致材料的局部加热、熔化或蒸发, 从而达到去除材料的目的, 在微系统制造领域具有一系列显著优势:

(1) 精密加工: 激光加工具有极高的加工精度, 能够达到微米甚至纳米级别的尺寸控制。激光束可以精确地聚焦到微小的加工区域, 避免了传统机械加工中的刀具磨损问题。

(2) 非接触加工：激光减材加工不需要与工件直接接触，避免了传统机械加工中因刀具与材料接触产生的机械应力、摩擦和磨损问题，能够有效避免材料的破损和变形。

(3) 高效能：激光减材加工过程具有较高的效率，特别是在高功率激光的应用下，能够实现高速切割和去除材料。激光束的聚焦特性使得加工热量集中在小区域，从而减少了热影响区，减少了不必要的能量损失。

2 激光减材加工在金属领域的应用

在微系统制造领域，激光减材加工技术与金属材料的结合具有广泛的应用，尤其在激光切割、打孔、修整等方面展现出独特的优势。

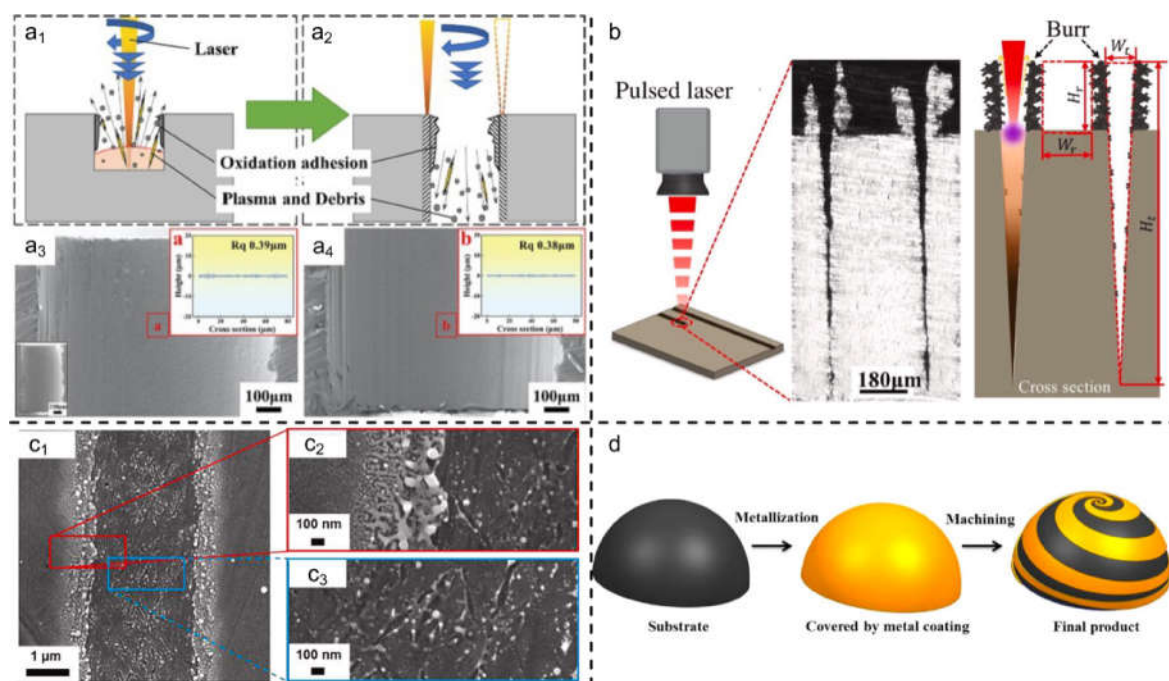
Wang等人采用飞秒激光加工1.5毫米厚的GH3044镍基高温合金，为解决微孔加工过程中侧壁粘附的问题，采用了结合旋转楔形扫描模块的螺旋钻削方法。较低的激光单脉冲能量导致烧蚀不均匀，产生垂直条纹，侧壁粗糙度约为 $R_q6\mu\text{m}$ 。对比之下，将螺旋钻削与环形钻削相结合，有助于消除侧壁上的氧化附着物和垂直条纹，将侧壁粗糙度降至 $R_q0.4\mu\text{m}$ 以下，大约为仅使用螺旋钻削时粗糙度的8%，如图2(a)所示。

Lou等人在铝板上制造了具有新型毛细引导性能的双形态混合槽（DSHG）。DSHG是一种复合结构，通过激

光刻蚀锥形槽并溅射矩形槽获得，如图2(b)所示。研究发现，DSHG的高毛细压力和高渗透性，以及双重结构内的流体相互作用，有助于改善毛细运输。因此，DSHG在85秒内的毛细上升高度达到了200毫米，在前2秒内的平均速度为24毫米/秒。DSHG的激光刻蚀-溅射方法为液体毛细设备的大规模生产提供了一个有前景的途径。

Zhao等人提出了纳秒多脉冲激光铣削技术，在工程塑料表面制造具有功能图案的金属涂层，确保图案边缘的高质量以及基材的最小化损伤，如图2(c)所示。当采用纳秒多脉冲激光加工曲线槽时，槽的横截面轮廓呈高斯形状。当一系列激光脉冲扫描某一位置时，该位置每个激光脉冲的烧蚀速率不同，并且随着时间的推移，烧蚀速率在加工的中间阶段达到最大。

Sota等人采用金属基底并涂覆薄金属膜，通过皮秒激光脉冲选择性去除膜层，成功制造了深度可控且高质量的线条。研究表明，制造的结构具有高度平坦的底面和几乎垂直于表面的侧壁，如图2(d)所示。制造的线条具有非常精确的深度，并且底部非常平坦，深度沿线中心的变化极小，这显著优于通过普通皮秒激光去除裸金属基底（没有金属膜）制造的线条。如果采用平顶光束，制造的孔和线条的形态质量可能还会进一步提高。



如图2所示

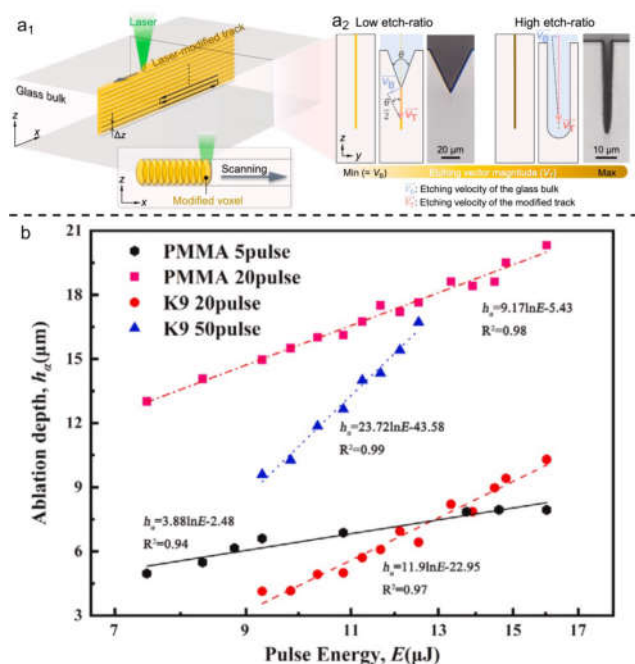
图2(a)两步钻孔过程和微孔侧壁形貌示意图：(a1)螺旋钻孔过程，(a2)环形钻孔过程，(a3)两步钻孔过程下侧壁上部形貌，(a4)两步钻孔过程下侧壁下部形貌。(b)激光刻蚀-溅射加工的DSHG示意图。(c1)制作的线条SEM图像，(c2)侧壁的放大图，(c3)底部的放大图。(d)激光铣削过程示意图。

3 激光减材加工在玻璃领域的应用

由于玻璃材料的特殊性质如脆性和透明性，激光减材加工在玻璃中的应用相比金属而言，仍处于较为有限的范围内，主要集中在精密刻蚀和表面处理等领域。

Li等人提出了一种新的激光增强刻蚀概念，称为激光引导矢量刻蚀（LGVE）。在LGVE中，材料去除速率和方向类似于一个矢量，其特征是激光修饰轨迹的大小和方向，区别于传统的玻璃各向同性湿法刻蚀，如图3(a)所示。激光修饰加速了化学刻蚀的材料去除过程，而轨迹则引导去除方向，使得其可以灵活控制表面形态的刻蚀效果，并呈现出具有锐利特征、多样形状和可调尺寸的玻璃微结构，包括分段渐变修饰线、从0°到60°的倾斜线和半径为35~50μm的弧形轨迹。

Liu等人指出，激光刻蚀由于其非线性吸收效应，被认为是制造透明材料微纳米结构的有效工具。与K9玻璃相比，PMMA的阈值能量较低，且多脉冲的阈值能量明显低于单脉冲，如图3(b)所示。同时通过同心圆旋转切割处理了200个微孔，随着点耦合率的增加，微孔深度明显增加。结果显示K9玻璃的轮廓和表面洁净度较好，而且K9玻璃的亮度均匀性为90%，高于PMMALGP的87%。



如图3所示

图3(a1)通过空间拼接多次扫描创建修改的轨迹，单独修改的体素沿x轴对齐，形成一条单一的轨迹，(a2)通过低刻蚀比控制的LGVE，(a3)通过高刻蚀比控制的LGVE。(b)K9玻璃和PMMA中Ablation坑深度与激光脉冲能量对数的关系。

4 激光减材加工在陶瓷领域的应用

相比于金属和玻璃，激光减材技术在陶瓷领域具有

更加广泛和多样化的应用实例，特别是在陶瓷材料的加工、表面处理以及微结构改造等方面，已经取得了显著的进展。

Tang等人采用皮秒激光精确地对聚合物衍生陶瓷（PDC）厚膜进行图案化，讨论了两种相反刻蚀方法在形态和元素分布上的差异。垂直刻蚀导致在一侧边缘形成微槽，并在热影响区出现密集的聚集物和类似西兰花的微观结构，如图4(a)所示，最终导致畸变甚至传感器故障。相反，平行刻蚀仅在热影响区产生了轻微的氧化和条纹，并基于此制备了一种敏感部分为3×3毫米的PDCTFHFS，展现了1.32mV/(kW/m²)的灵敏度和600毫秒的响应时间。

Li等人详细分析了在飞秒激光烧蚀过程中，多晶金刚石材料的去除机制和表面质量。动态材料去除速率（MRR）的斜率（K）显示，从0.3MHz到0.5MHz的MRR增长比从0.2MHz到0.3MHz的增长更显著，这表明在较高的重复频率下，热积累的促进效应超过了烟雾屏蔽的抑制效应。随着扫描次数的增加，加工表面从平坦转变为高斯形状，而且当高斯表面的深宽比增加时，等离子体的扩展受到限制，同时等离子体的热效应增强。这导致MRR和单脉冲去除量（MRPP）之间的差异最小化，如图4(b)所示。

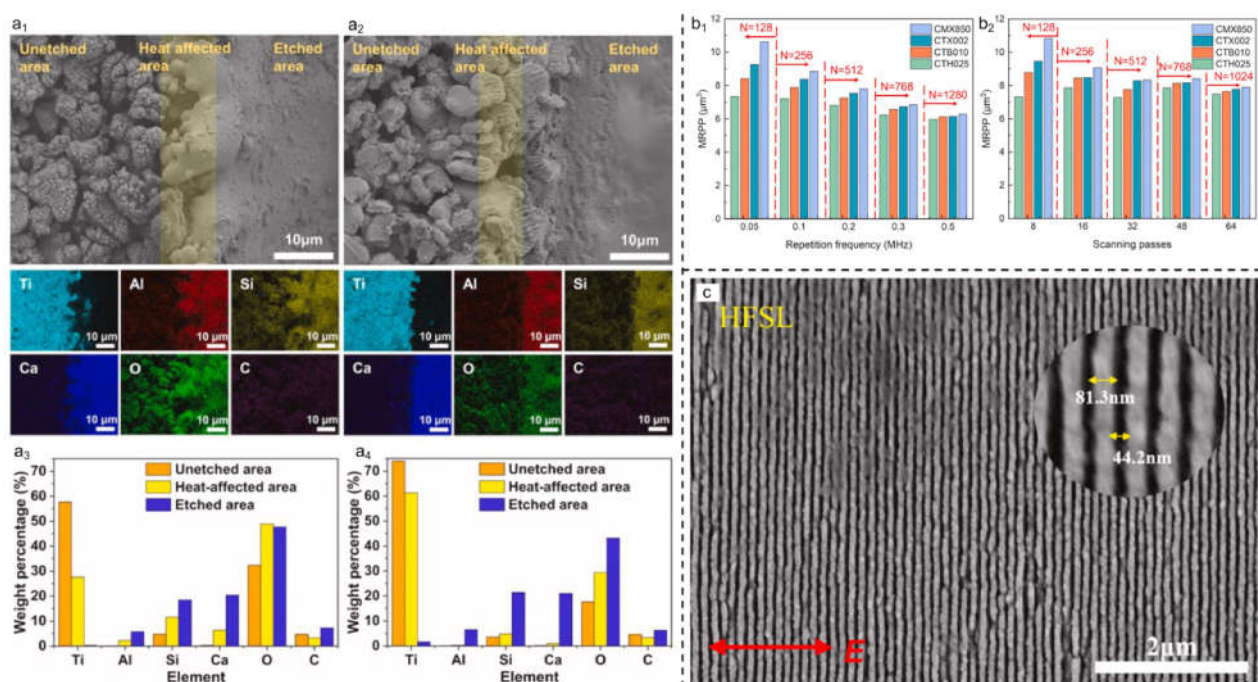
Chen等人指出，由于碳化硅（SiC）硬度过高，无法通过机械加工达到高效的去除速率和质量。对此，他们对4H-SiC表面通过飞秒激光进行了改性，成功地制造了周期性的LIPPS结构，如图4(c)所示。结果表明，飞秒激光将SiC分解为硅晶体和硅氧化物，显著降低了4H-SiC表面的硬度和杨氏模量，这有助于LIPPS的去除。有限元分析结果表明，改性表面切削时应力传递范围较小，有助于减少金刚石磨料颗粒的损失。

5 激光减材加工在微系统制造中的挑战

尽管激光减材加工技术在微系统制造中展现了巨大的潜力，但在实际应用过程中，仍面临许多技术和工程上的挑战。这些挑战主要源于激光与材料的相互作用、精度要求、加工效率、材料的特性等方面。

5.1 热影响区与材料损伤

在激光减材加工过程中，激光束的高能量密度会导致材料表面的局部加热，导致热影响区（Heat Affected Zone）的产生。对于金属、陶瓷、玻璃等不同材料来说，热影响区会引起材料的热膨胀、应力积累、裂纹生成等问题，尤其对脆性材料（如陶瓷和玻璃）而言，热应力可能导致裂纹扩展或材料破损。



如图4所示

图4(a1)垂直图案线的SEM和EDS图像,(a2)平行图案线的SEM和EDS图像,(a3)垂直图案线的重量百分比,(a4)平行图案线的重量百分比。(b1)不同重复频率下的MRPP,(b2)不同扫描次数下的MRPP。(c)经过飞秒激光辐照后SiC表面LIPPS的SEM图像。

5.2 材料的复杂热物理特性

不同材料(如金属、陶瓷、玻璃等)对激光的吸收、传导和反射能力差异较大,这使得激光与材料的相互作用变得非常复杂。对于具有高反射率的金属,尤其是铝、铜等材料,激光能量的吸收效率低,导致加工过程中能量浪费较大,且可能产生过多的热量,影响加工精度。同样,陶瓷和玻璃等脆性材料由于其低热导性和高硬度,对激光的吸收和热传导能力较差,导致热积累现象严重,从而影响加工效果。

5.3 加工精度与微细结构的制造

微系统制造中的要求通常非常严格,需要在微米甚至纳米级别实现高精度的结构加工。尽管激光减材加工具有较高的精度,但在实际操作中,微小尺寸和高复杂度的微结构加工仍然面临许多挑战。激光束的聚焦问题、光斑大小、激光脉冲宽度等因素都会影响加工精度。特别是在复杂几何形状的微型零件加工时,激光的局部加热可能导致材料形变、涂层剥离等问题,从而影响最终产品的质量。

结束语

激光减材加工技术以其高精度、非接触等优势,在微系统制造中展现出巨大潜力,尤其适用于金属、玻璃

和陶瓷的精密加工。尽管仍面临热影响控制等挑战,未来通过优化工艺和新型光源开发,该技术将推动微系统向更小型化、智能化方向发展,为新兴领域提供关键制造支撑。

参考文献

- [1]廉运河,吴超,胡南中.GNC信息处理微系统电路设计与实现[J].遥测遥控,2025,46(02):41-47.
- [2]柴昭尔,卢会湘,徐亚新,等.面向数字微系统应用的高密度陶瓷封装基板工艺[J].电子工艺技术,2025,46(01):1-3+14.
- [3]贺鹏超,边明明,李康荣,等.一种超宽带多通道射频数字一体化微系统的设计与实现[J].上海航天(中英文),2024,41(06):150-157.
- [4]陈东博,赵宇,高艳红,等.基于硅基三维异构集成技术的宽带双通道TR微系统研究[J].通讯世界,2024,31(12):1-3.
- [5]姜永霞,李隆,程雨露,等.高斯脉冲激光烧蚀钛合金热效应分析研究[J].光学技术,2025,51(02):189-195.
- [6]顾波.激光加工技术在工业制造中的最新发展和未来趋势[J].金属加工(热加工),2025,(03):1-6+16.
- [7]王新宇,周恺武,赵蕾,等.基于DBO-RF的磁场辅助镁/铝异种金属激光焊工艺[J].焊接学报,2025,46(02):72-79.