

微纳结构在曲面材料表面的制备技术与应用研究进展

游 廷

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月5日

摘 要

随着现代工程技术向高精尖、多功能、集成化方向发展, 复杂曲面材料功能化需求日益迫切, 推动微纳加工技术从传统平面加工向复杂曲面加工延伸。本文综述了曲面微纳结构的主流制备技术, 包括压印技术、掩膜转印光刻技术、电流体动力喷射技术及激光加工技术, 分析了各类技术的原理、优势、应用场景及局限性。同时, 总结了曲面微纳结构在光学、微电子器件、润湿调控、生物医学及油水分离领域应用, 凸显其突破传统器件性能的核心作用。最后, 指出当前曲面微纳结构制备技术在精度控制、高效制造等方面面临的挑战, 并展望未来通过技术融合实现跨越式发展。本文为曲面微纳结构相关领域的研究人员及产业化从业者提供参考, 助力推动该技术在高端制造等前沿领域的规模化应用。

关键词

曲面微纳结构, 制备技术, 功能应用

Research Progress on the Preparation Technology and Application of Micro-Nano Structures on the Surface of Curved Materials

Ting You

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: February 2, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 5, 2026

Abstract

With the development of modern engineering technology to the direction of high precision, multi-

function and integration, the demand for functionalization of complex surface materials is becoming more and more urgent, which promotes the extension of micro-nano processing technology from traditional plane processing to complex surface processing. In this paper, the mainstream preparation technologies of curved micro-nano structures are reviewed, including imprinting technology, mask transfer lithography technology, electrohydrodynamic jet technology and laser processing technology. The principles, advantages, application scenarios and limitations of various technologies are analyzed. At the same time, the applications of curved micro-nano structures in the fields of optics, microelectronic devices, wetting control, biomedicine and oil-water separation are summarized, highlighting its core role in breaking through the performance of traditional devices. Finally, it points out the challenges faced by the current surface micro-nano structure preparation technology in terms of precision control and efficient manufacturing, and looks forward to achieving leapfrog development through technology integration in the future. This paper provides a reference for researchers and industrial practitioners in the related fields of curved micro-nano structures, and helps to promote the large-scale application of this technology in cutting-edge fields such as high-end manufacturing.

Keywords

Curved Micro-Nano Structure, Preparation Technology, Functional Applications

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

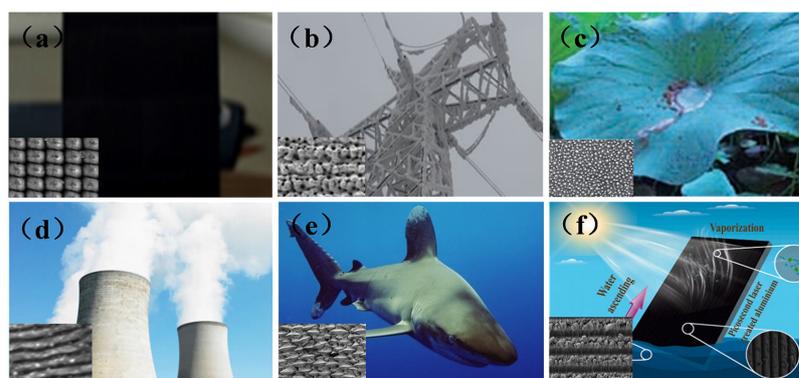
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几十年来,人们对自然界动植物微纳结构进行了深入研究,各类功能性的表面微纳结构已在光学[1]、防覆冰[2]-[4]、自清洁[5][6]、能源转换[7][8]、流体减阻[9]、海水蒸发[10]-[12]等领域被广泛应用(如图1所示)。随着现代工程技术向高精尖、多功能、集成化方向发展,复杂曲面材料功能化的需求日益迫切且广泛渗透于关键领域,这些前沿领域的需求促使微纳加工技术从传统平面加工向复杂曲面加工延伸,成为高端制造领域的重要发展方向。



(a) 光学[1]、(b) 防覆冰[4]、(c) 自清洁[6]、(d) 能源转换[8]、(e) 流体减阻[9]和(f) 海水蒸发[12]。

Figure 1. Applications of various micro-nano structures in various fields

图 1. 各种不同的微纳结构在各领域的应用

传统微纳加工技术以平面工艺为核心,光刻[13][14]、电子束刻蚀[15][16]、离子束刻蚀[17][18]等技

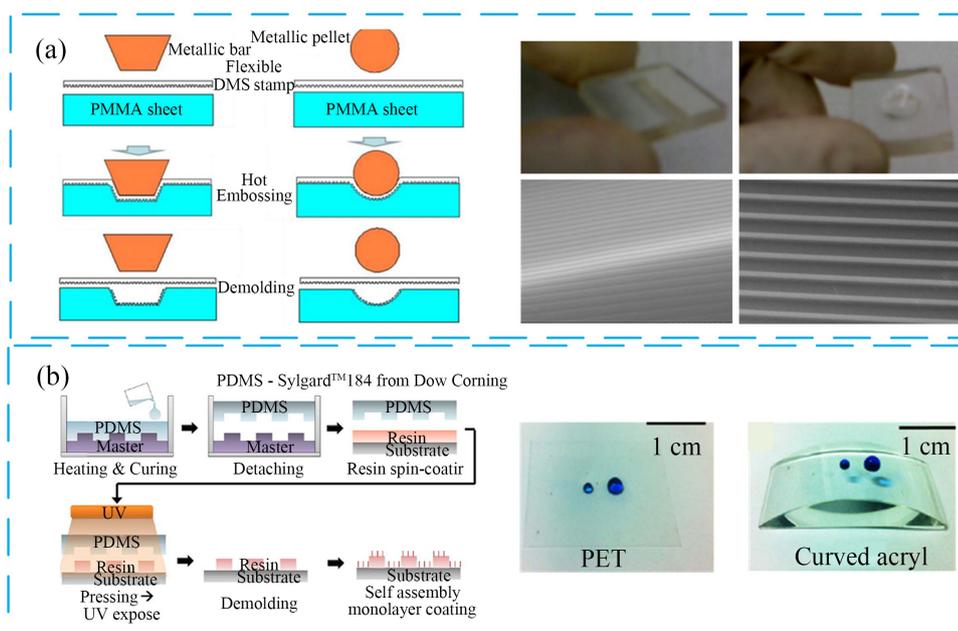
术的成熟推动了集成线路、平面光学器件等产业的爆发，形成了标准的平面加工体系，但由于其核心设计逻辑与曲面基底的几何特性存在矛盾，难以直接迁移应用，其局限性主要体现在以下几个方面。第一，对焦与对准精度的困难。第二，微纳结构完整性的保持和精度控制面临着更高的难度。第三，传统平面加工工艺在材料兼容性、成本控制和曲面加工的个性化需求之间的矛盾限制其工程化应用。

目前，研究者虽然开发出多种适合曲面微纳结构制备的方法，突破了传统技术的极限，但仍处于碎片化发展阶段。本文分类阐述了曲面微纳结构的制备技术及特点，总结曲面微纳结构在各领域的应用现状，为相关领域的研究人员及产业化从业者提供参考。

2. 曲面材料表面微纳结构制备技术

2.1. 压印技术

压印技术凭借高分辨率、低成本、工艺流程简单的优势，被逐步引入曲面材料表面微纳结构的制备，成为连接平面工艺和曲面加工的重要技术路径之一，在聚合物、金属、陶瓷等多种曲面基底上有广泛应用。



(a) 热压印工艺示意图与所制备的样品微通道和 SEM 图像[19]; (b) 黄蜻幼虫翅膀纳米级表皮浮雕整体复制过程示意图与经过紫外压印后复制的纳米级表皮浮雕结构在 PET 和弯曲丙烯酸树脂中, 蓝色液滴的状态照片[20]。

Figure 2. Imprinting technology process flow diagram

图 2. 压印技术工艺流程示意图

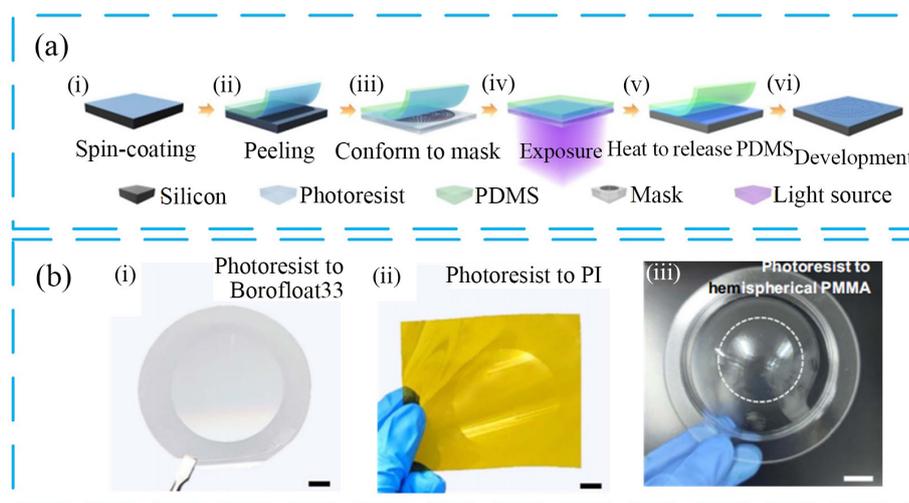
热压印技术通过高温软化基底材料和高压驱动模具图案转移的方式，实现曲面微纳结构的制备，其核心在于柔性模具与曲面基底的精准贴合和压力的协同调控。如图 2(a)，Farshchian 等[19]提出了一种基于柔性聚二甲基硅氧烷(PDMS)印章的曲面热压印方法，通过引入高柔顺性的超薄 PDMS 印章作为中间结构转移层，实现了微纳结构在非平面基底上的直接复制，成功在曲面表面复制了最小特征尺寸达 300 nm 的纳米光栅结构。紫外纳米压印技术则是通过紫外光固化树脂实现图案的快速转移，适用于对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰亚胺(PI)等对温度敏感的柔性曲面基底。如图 2(b)，Cho 等[20]以黄蜻翅膀为研究对象，通过 PDMS 和紫外纳米压印技术，成功在柔性 PET 膜、弧形亚克力板上复制了黄蜻蜓的纳米结构。然而，压印技术对模具的依赖性极强，复杂曲面模具的制备难度大、周期长、成本高，且在球面、抛物面

等非可展曲面上，易因模具与基底的应力分布不均导致结构拉伸或压缩失真，限制了其在极端复杂曲面结构制备中的应用。

2.2. 掩膜转印光刻技术

掩膜转印光刻技术是一种低成本、高效率的先进曲面微纳加工技术，其兼顾了传统光刻的工艺兼容性与曲面适配能力，实现了复杂曲面的高精度、大面积微纳结构制造。

如图3所示，Y.Z等[21]开发了一种基于可干转移光刻胶的完美共性接触光刻技术(PCCL)，成功实现掩膜和光刻胶之间的零间隙软接触，有效克服了衍射极限，降低了光学畸变并提升了图案分辨率与保真度。该技术为高精度微纳结构的大规模生产提供了有效且可扩展的解决方案，在先进光学、柔性电子及功能器件制造领域展现出巨大应用潜力。掩膜转印光刻技术虽然无需复杂加工设备，胶体颗粒成本低廉，具有显著的成本优势，但胶体颗粒自组装的均匀性易受基底表面能、溶液浓度、温度等因素影响，在非对称曲面上会存在局部团聚现象，需要通过表面改性、超声辅助自组装等方式进一步优化掩膜层质量，在极端复杂曲面上应用仍具有一定局限性。



(a) PCCL 示意图；(b) PCCL 在多种基底上的转移制备[21]。

Figure 3. Mask transfer lithography

图3. 掩膜转印光刻技术

对于上述两种接触式加工技术，曲面的高斯曲率会对加工的贴合存在影响。根据高斯绝妙定理，高斯曲率可表示为：

$$K = k_1 k_2 \quad (1)$$

其中 k_1 、 k_2 分别表示曲面任意一点处两个正交主方向的曲率，曲率正负由曲面的凹凸性决定。根据 k_1 与 k_2 ，可分为正高斯曲率曲面(k_1 、 k_2 同号)、负高斯曲率(k_1 、 k_2 异号)和零高斯曲率曲面($k_1 k_2 = 0$)。

当平面模具或掩膜与曲面基底贴合时，会因高斯曲率的差异产生不可消除的面内应变 ε ，其应变值可由下式表示：

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)\omega^2 + \frac{1}{4}k_1 k_2 \omega^4 \quad (2)$$

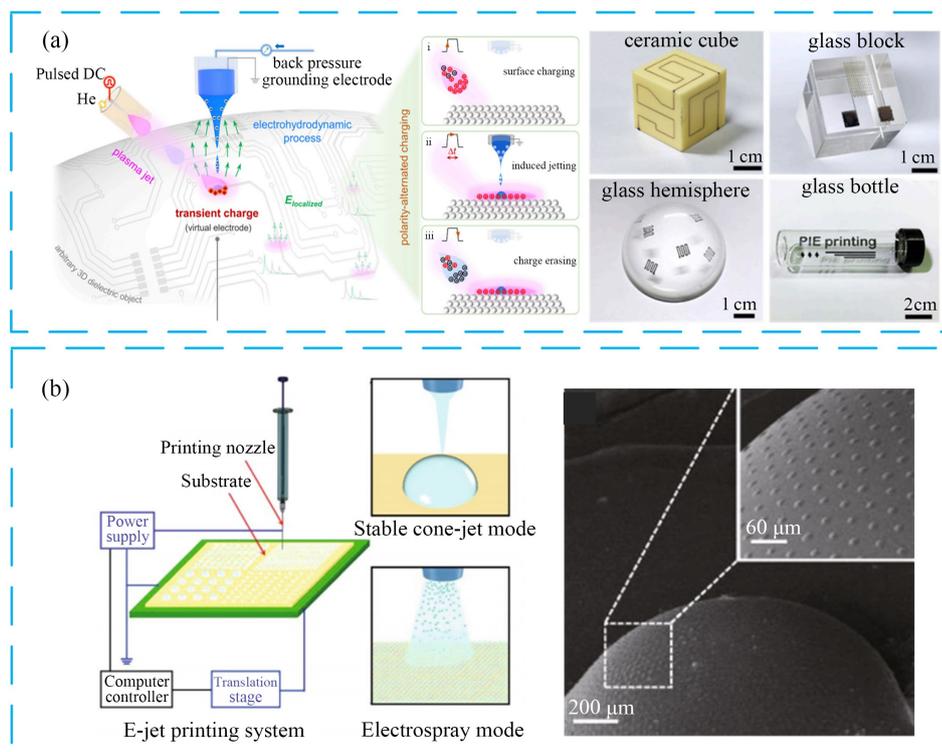
其中 ω 表示模具或掩膜的特征尺寸。由公式可知，正高斯曲率越大、加工尺寸越大、加工贴合的影响就

越明显，易造成模具或掩膜的变形；而零高斯曲率的可展曲面则能实现完美贴合，也是当前加工技术最适配的曲面类型。

2.3. 电流体动力喷射技术

电流体喷射动力技术(EHD)是一种超高分辨率的微纳加工技术，具有分辨率高、无需模具、加工灵活、适配复杂曲面与动态基底的优势，为曲面微纳结构的制备提供新路径。

如图 4(a)，Jiang 等[22]提出等离子体诱导电流体动力打印技术，通过瞬态电荷诱导局部电场驱动电流体动力喷射的创新设计，实现了亚微米分辨率、宽墨水兼容性、3D 介电基板适配性三大核心突破，解决传统技术在 3D 共形打印中的局限，为 3D 共形电子的规模化制造提供关键工具，推动数字工业打印技术向复杂 3D 结构领域发展。如图 4(b)，Zhou P 等[23]开发了电液动力喷射打印技术，在聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜上制备层级微透镜阵列(MLAs)和纳米透镜阵列(NLAs)，再利用微流控芯片调控注入液体体积，使柔性薄膜变形，成功制成了具备防水性能和可变视角(FOV)的人工复眼。EHD 技术是目前少数可实现复杂 3D 曲面制备的微纳技术之一，但其对环境敏感度极高，易受到温度湿度的干扰导致射流停顿；另外在大面积快速制造方面生产效率较低。



(a) 等离子体诱导电液动力打印工艺流程示意图与不同表面共形打印的样品[22]；(b) 电液动力喷射打印工艺流程示意图与制备的人工复眼 SEM 图像[23]。

Figure 4. Process flow diagram of electrohydrodynamic injection technology

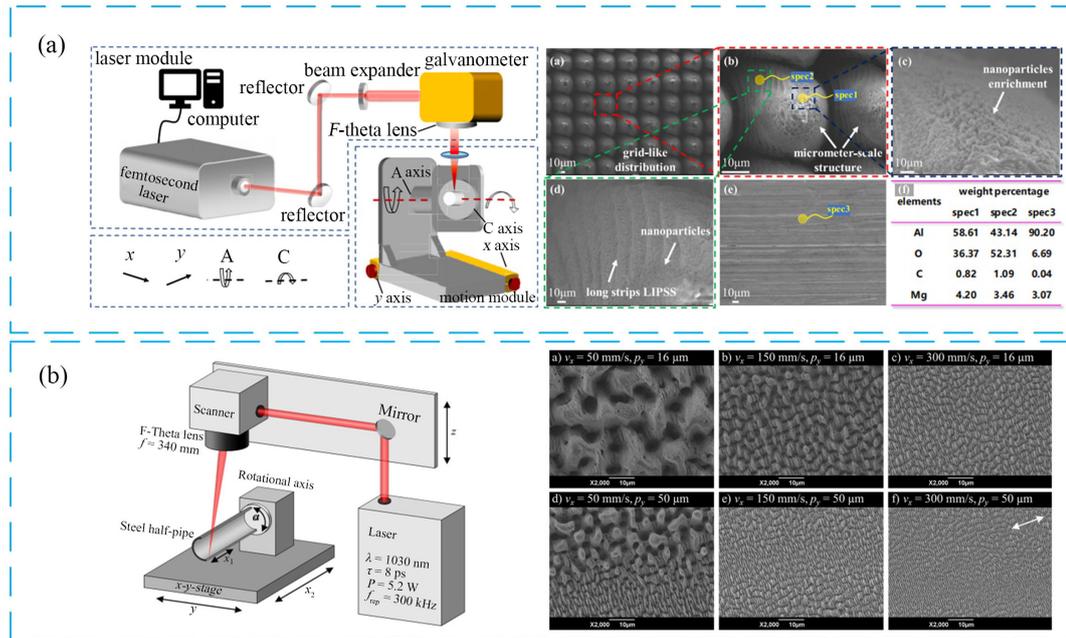
图 4. 电流体动力喷射技术工艺流程示意图

2.4. 激光加工技术

激光加工技术基于光与物质的相互作用，通过精准控制光斑位置、能量密度和扫描路径，可实现在曲面基底进行微纳结构的制备，具有加工精度高、热影响区域小、材料兼容性好、结构设计灵活的优势。

其中，飞秒激光因其超短脉冲特性，能在材料表面实现精准的微纳消融且热影响区控制在微米级以下，成为曲面复杂微纳结构制备的重要手段。

图 5(a)所示，Long 等[1]通过 3D 飞秒激光技术在铝合金圆柱表面制备出包含微米结构、亚波长结构 (LIPSS)和纳米颗粒的分层微纳复合结构。如图 5(b)，Daniel 等[24]通过超短脉冲激光纹理化处理不锈钢圆管内表面，再将其储存在长链碳氢化合物溶液中，制备出了超疏水内表面。飞秒激光加工技术虽然能够适配各类自由曲面，加工材料范围广泛，但由于其逐点扫描的加工方式，加工效率较低，规模化应用受限。



(a) 飞秒激光铝合金圆柱加工平台及加工后铝管表面 SEM 图像和元素分布[1]; (b) 超短脉冲激光不锈钢圆管加工平台及加工后不锈钢内壁表面 SEM 图像[24]。

Figure 5. Femtosecond laser processing technology
图 5. 飞秒激光加工技术

上述的 EHD 喷射、激光加工非接触式加工技术，表面斜率 θ 会改变物质沉积密度或能量。对于 EHD 喷射技术，表面斜率 θ 会改变电场力的分布方向，造成射流偏离预定的沉积位置，偏离距离 Δs 、表面斜率 θ 和喷射距离 h 满足以下关系：

$$\Delta s = h \tan \theta \tag{3}$$

由公式可知，当斜率越大、喷射距离越远时，射流的沉积位置偏差得越远。

对于激光加工技术，曲面表面的实际激光能量密度 $I(\theta)$ 与法向入射能量密度 I_0 的关系为：

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \tag{4}$$

当表面斜率 θ 增大时， $\cos \theta$ 减小，激光能量实际密度衰减，造成激光加工的深度变浅、结构形貌均匀性变差，加工精度变低。

综上所述，基于曲面的几何效应，上述的几种主流曲面微纳结构制备技术中，接触式加工技术适配性由曲面高斯曲率主导；非接触式加工技术的精度则由曲面表面斜率影响，这为曲面微纳结构制备的技术选型提供了参考。

Table 1. Comparison of key indicators for mainstream preparation of curved micro-nano structures
表 1. 曲面微纳结构主流制备关键指标对比

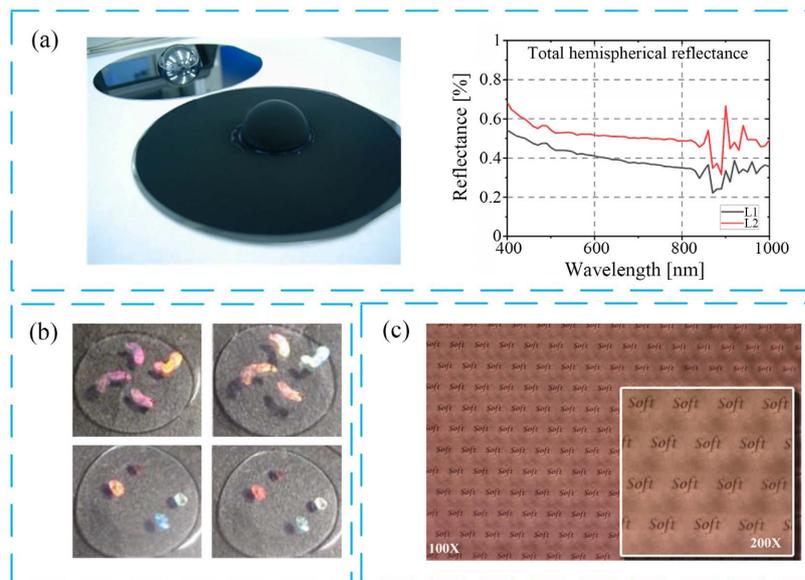
技术类型	加工分辨率	加工效率/通量	材料适用性	设备成本	适用的曲面类型	主要缺陷
压印技术	极高 (纳米级)	较高, 支持批量加工	聚合物、金属、陶瓷、柔性树脂等	较低(模具为主要成本)	可展开曲面、简单不可展曲面	复杂曲面模具制备难度大、周期长、成本高; 模具精度随使用次数下降, 易磨损
掩膜转印光刻技术	高 (亚微米级)	中等, 大面积加工效率高, 交替自组装需耗时	聚合物、金属、陶瓷、玻璃、3D 介电基板等	低(胶体颗粒成本低, 无需高端蚀刻设备)	可展曲面和低曲率对称不可展曲面	掩膜层与曲面贴合度有限; 胶体颗粒自组装均匀性受基底表面能、温湿度影响大
电流体动力喷射技术	高 (亚微米级)	低, 逐点沉积成形, 大面积加工耗时久	聚合物、金属、陶瓷、玻璃等	中高(高精度电场调控、环境控制系统)	可展曲面、各类不可展曲面、复杂 3D 曲面	对环境温湿度、气压敏感度极高, 易出现液滴偏移; 大面积加工效率低, 难以规模化; 表面张力、墨水粘度对加工精度影响大
飞秒激光加工技术	极高 (纳米级)	低, 逐点扫描成形, 单光束加工效率低	几乎适配所有材料	高(飞秒激光器)	可展曲面、各类不可展曲面、复杂自由曲面	单光束逐点加工效率低; 设备维护成本高

为了更直观的对比各类曲面微纳结构制备技术的核心性能和适用性, 本文对上述的加工技术关键指标进行整合, 如表 1 所示。

3. 曲面微纳结构的应用领域

3.1. 光学领域

在光学领域中, 曲面微纳结构通过调控微观形貌, 实现抗反射、结构色、光波调控、偏振选择等功能, 突破了传统光学元件的性能瓶颈。



(a) 制备前后的硅透镜及透镜 L1 和 L2 的两个载片的总半球反射率[25]; (b) 隐形镜片不同微纳结构下的光学衍射调谐[27]; (c) 曲面凸面透镜下的聚光和成像照片[29]。

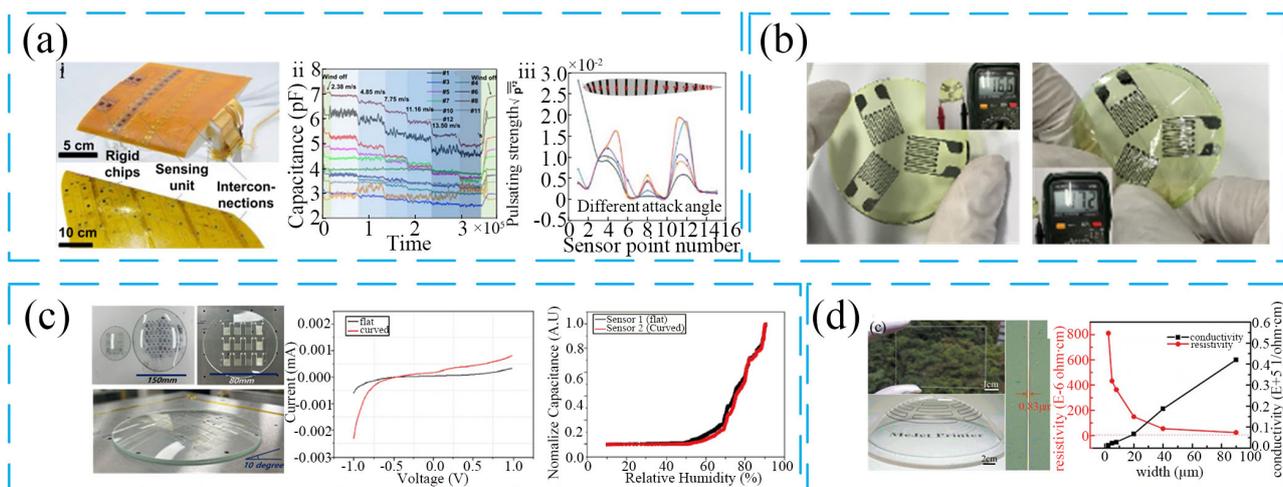
Figure 6. Multifunctionality of curved micro-nano structures in the optical field
图 6. 曲面微纳结构在光学领域的多功能性

Schmelz 等[25]在半球形硅透镜上制备了黑硅结构,如图 6(a)。研究发现,ICP-RIE 其形态和抗反射性能与平面黑硅相当,且结构取向垂直于曲面。该研究为曲面硅器件的功能化提供了可行方案,证实了平面黑硅的研究结论可部分推广至曲面场景。Wu 等[26]利用飞秒贝塞尔光束,在弯曲的金刚石-锌硫复合材料表面制备了长径比红外抗反射亚波长结构(SWSs)。制备后的样品透射率从 75% 提升至 85%,且在 Z 位置跨度超 600 μm 的区域保持结构稳定性。Bader 等[27]通过 ND: YAG 脉冲激光,在商用硅水凝胶隐形眼镜边缘制备了不同的纳米光子结构,成功实现了快速光学衍射调谐,如图 6(b)。此外,该结构还能检测人工泪液中 Na^+ 离子浓度变化,制备后的镜片接触角轻微变化,保持了良好的生物相容性。Butt 等[28]通过 Nd: YAG 脉冲激光的自干涉效应,在四种彩色墨水薄膜成功制备出纳米光子结构,提升了透射率。Chen 等[29]利用飞秒激光对石英玻璃进行逐点曝光,并通过刻蚀制备了表面光滑的凹面微结构模板,再通过复制成型技术,成功在 PDMS 上复刻出凸面微透镜阵列,具备优异的聚光和成像性能,为微光学等领域提供新型制备方案。

3.2. 微电子器件领域

在微电子器件领域中,曲面微纳结构赋予了器件卓越的柔韧性、曲面仿生视觉等,实现了电子器件与非规则界面的贴合和性能交互。

Huang 等[30]提出机器人化“转印与喷射”打印技术,成功制造出机翼模型柔性智能传感皮肤,如图 7(a)。研究突破了传统 2D 平面微制造在几何形状、尺寸及兼容性上的根本限制,缩短了研发生产周期。Bian 等[31]成功制备出无损伤、无褶皱的 2 μm 厚 PI 膜柔性应变传感器,如图 7(b)。制备的传感器电阻变化小于 5%,为大面积超薄柔性电子量产提供了可行方案。Won 等[32]通过双毯反转胶印工艺在平面及曲率 10° 的 3D 曲面玻璃基板上印刷 40 μm 间距的叉指电极,成功实现了 10%~90% 相对湿度的精准检测,如图 7(c)。Liu 等[33]制备出适用于柔性和曲面电子设备的高性能透明金属网络电极(MNEs),如图 7(d)。在最优参数下制备的 MNEs 在 600 nm 波长处透光率达 94.3%、电阻为 36.7 Ω^{-1} ,为曲面光电子设备提供了可行方案。



(a) 安装在尾翼和标准机翼上的大面积智能传感皮肤以及不同风速下的表面压力和不同攻角下的脉动压力[30]; (b) LLO 工艺前后制备在超薄 PI 薄膜上的柔性传感器[31]; (c) 双毯反转胶印技术制备的曲面湿度传感器以及平面和曲面制作的湿度传感器的典型 I-V 曲线和随 RH 变化的归一化电容值[32]; (d) 在平面、曲面玻璃上制备的网络电极和宽度为 0.83 μm 的单根金线光学照片以及不同金线宽度的电导率曲线[33]。

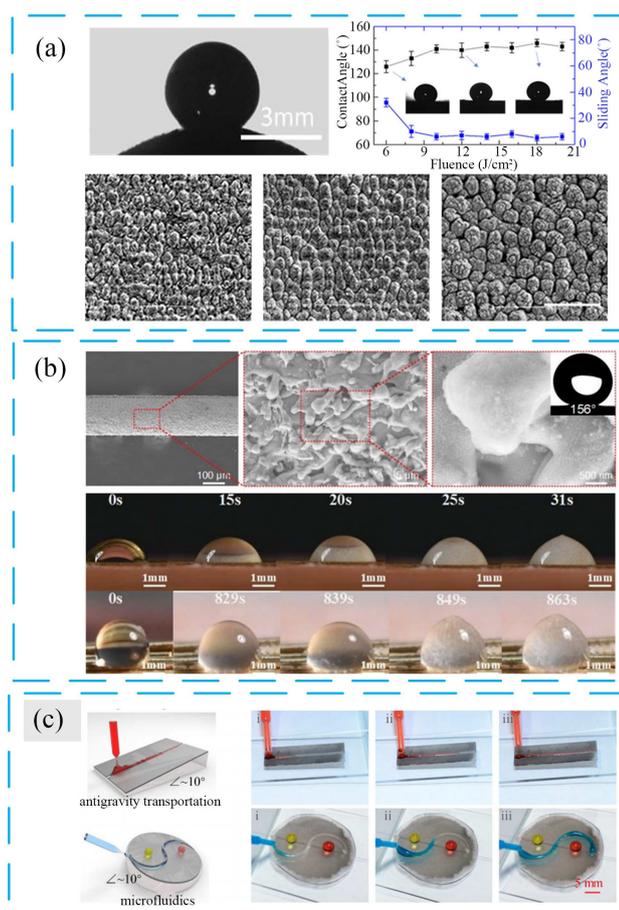
Figure 7. Application of curved surface micro/nano structures in microelectronic devices

图 7. 曲面微纳结构在微电子器件中的应用

3.3. 润湿调控领域

在润湿调控领域中，曲面微纳结构凭借其独特的几何形态和曲率效应，展现出优于平面微纳结构的综合性能。

Wang 等[34]在 304 不锈钢自由曲面上通过调控不同通量实现了样品的疏水功能，如图 8(a)。利用制备结构的疏水性功能，成功应用于注射器针尖泛函化，样品表面接触角 $> 130^\circ$ ，使最小可操控液滴体积从 $45 \mu\text{L}$ 降至 $22 \mu\text{L}$ ，满足微液滴精准转移需求。Sun 等[35]通过激光加工结合低表面能改性，成功在超细黄铜线材表面构建超疏水结构，如图 8(b)。最优参数下的超疏水结构的接触角达到了 156° ，具备优异的防冰性能。Ye 等[36]提出了与掩模无关的微等离子体喷流技术，在可拉伸碳纳米管和聚二甲基硅氧烷 (CNTs/PDMS) 薄膜上实现了可编程润湿性调控。如图 8(c) 所示，成功在超疏水性碳纳米管薄膜上制备出用于水传输的超亲水性弯曲微通道，实现了液滴的操控。



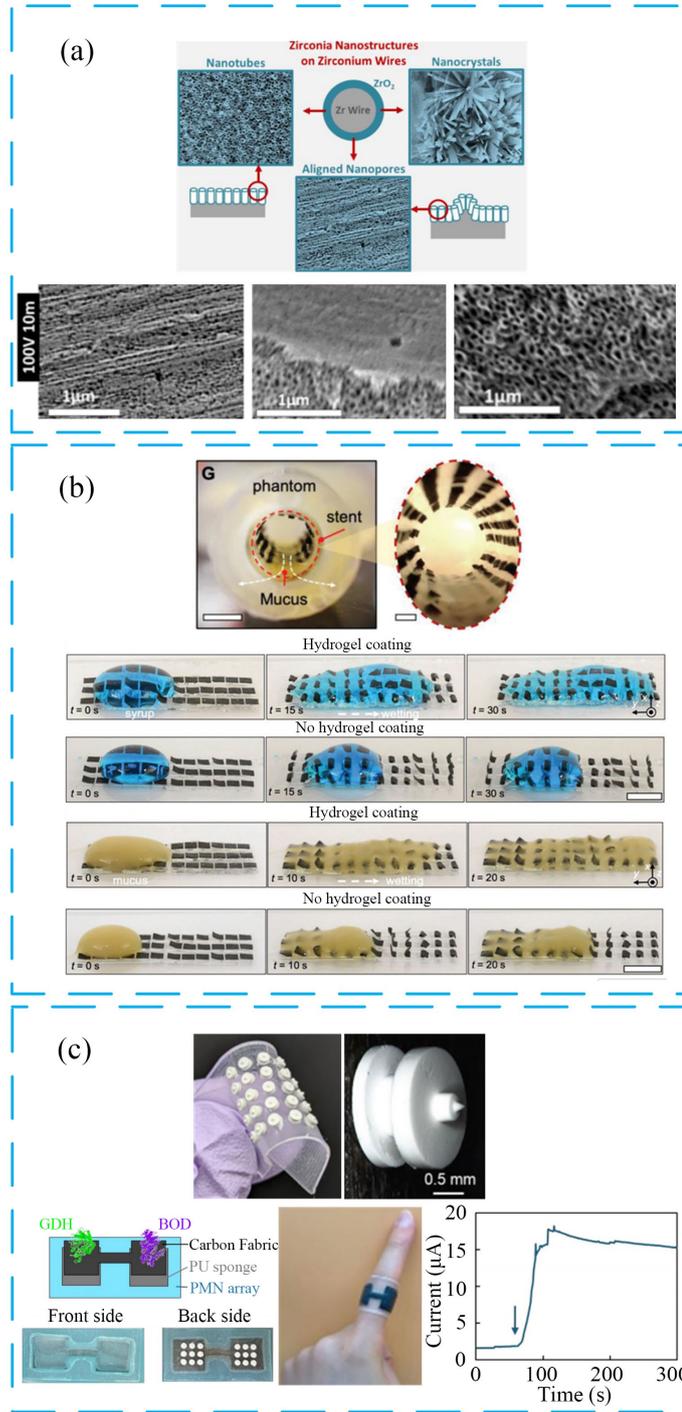
(a) 液滴在疏水不锈钢曲面的照片和不同能量密度下制备的结构 SEM 图像及不同能量密度的接触角和滚动角[34]; (b) 最优参数下的超疏水超细黄铜丝的 SEM 图像和接触角图像及未处理和处理后超细黄铜丝的防冰测试[35]; (c) 超疏水性碳纳米管薄膜上用于引导水传输的超亲水性弯曲微通道[36]。

Figure 8. Application of curved surface micro-nano structures in the field of wetting control

图 8. 曲面微纳结构在润湿调控领域的应用

3.4. 生物医学领域

在生物医学领域中，曲面微纳结构的存在为生物医疗器件的创新发展提供了核心支撑。



(a) 临床植入钽金属丝制备的各种纳米结构示意图及 100 V 电压下阳极氧化 10 min 的丝材经 5~10 min 超声处理后的 SEM 图像[37]; (b) 纤毛气道支架在气管模型内输送猪粘液图像及涂层人工纤毛阵列在糖浆和黏液中的润湿传输视频帧[38]; (c) 构建的柔性 PMN 阵列照片和酶生物电池集成的柔性 PMN 阵列与手指上贴合柔性 PMN 阵列照片及皮肤贴片上的电流，电流通过 1 kΩ 电阻器进行监测[39]。

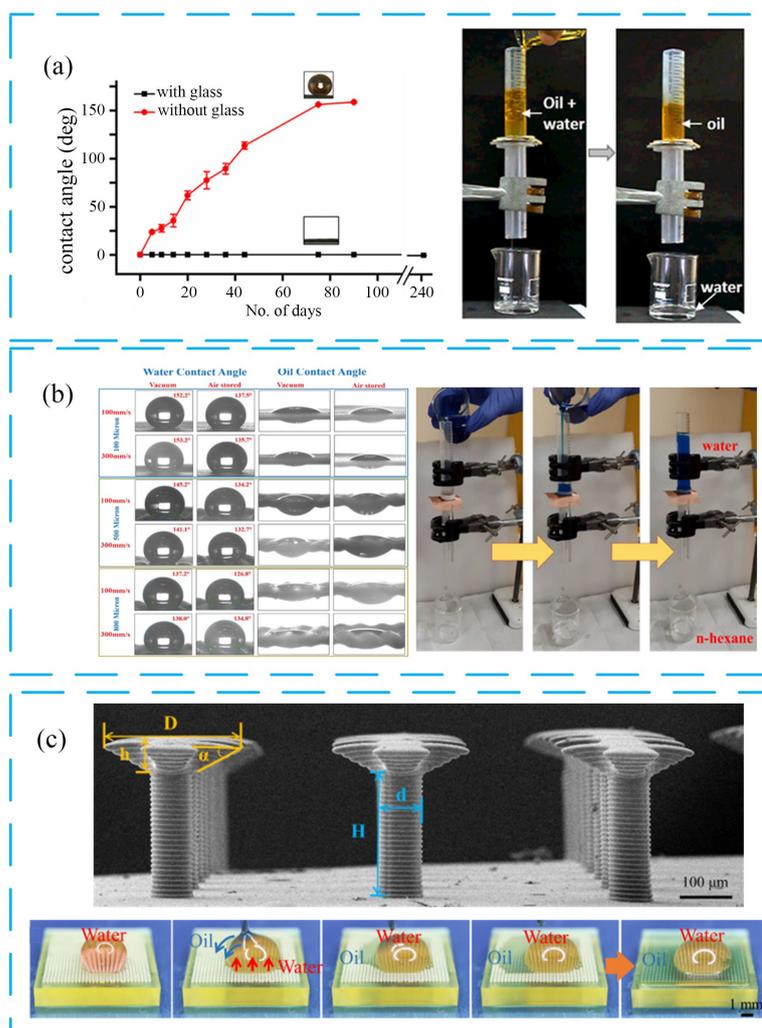
Figure 9. Application of curved surface micro/nano structures in biomedical field
图 9. 曲面微纳结构在生物医学领域的应用

Chopra 等[37]通过优化电化学阳极氧化技术，成功在钽丝上制备 ZrO_2 纳米晶体、纳米孔、纳米管等

受控纳米结构,同时创新性采用超声处理(5~60 min)去除表层纳米孔以暴露底层纳米管,为 Zr 基植入物的临床转化奠定基础,如图 9(a)。Wang 等[38]开发了无线磁驱动纤毛气道支架,通过在硅胶支架内集成编码非往复运动与异相波磁性人工纤毛阵列,并覆盖仿呼吸道纤毛周液层的水凝胶润滑涂层,实现黏性黏液的高效运输,如图 9(b)。Tottori 等[39]成功制备出全有机生物电皮肤贴片,在包裹手指时仍能产生稳定透皮电流,适用于经皮刺激与药物递送,如图 9(c)。Kusama 等[40]开发了基于固体聚合物离子导电多孔微针(PMN)的经皮电渗透流(EOF)系统,突破了角质层屏障和最大分子运输限制,为全有机经皮给药和间质液诊断提供新方案。

3.5. 油水分离领域

在油水分离领域中,曲面微纳结构可实现油与水的高效定向分离,提升抗污染和通量性能,有效延长材料寿命。



(a) 激光处理后的金属网,在8个月内,有无覆盖玻璃的金属网接触角及油水分离演示[41]; (b) 激光结构化后不同孔径下铜网水接触角和油滴接触角图像及铜网油水分离演示[43]; (c) 3D 打印的几何花瓣状结构 SEM 图像及油水分离演示[44]。

Figure 10. Application of curved surface micro-nano structure in the field of oil-water separation
图 10. 曲面微纳结构在油水分离领域的应用

Ahlawat 等[41]通过沉积玻璃颗粒在激光处理后的金属网上延长表面亲水性, 经过测试, 覆盖有玻璃颗粒的金属网在 8 个月内始终保持超亲水和水下超疏油, 仍能有效进行油水分离, 有效延长了材料的分离效率, 如图 10(a)。Yu 等[42]通过激光处理, 在不锈钢网(SSM)表面构建出微米级砂粒状微纳结构并形成氧化层, 使材料具备空气中超亲水性和水下超疏油性, 实现了高效的油水分离。Khan 等[43]通过飞秒激光对不锈钢和铜网进行表面结构化处理, 结合真空老化或空气老化, 得到超疏水/水下超亲油金属网, 如图 10(b)。经过处理后的金属网水接触角最高达 153.5°, 油接触角接近 0°, 油水分离效率达 98%。Liu 等[44]受猪笼草口缘液滴钉扎效应启发, 通过投影微立体光刻 3D 打印技术, 成功制备出仿生花瓣状微结构超疏水表面, 并利用油/水承载差异实现了油水高效分离, 如图 10(c)。

4. 总结与展望

本文概述了曲面材料表面微纳结构的制备技术及其在多领域中的应用现状。压印、掩膜转印光刻、电流体动力喷射、激光加工技术等各类制备方法各具优势, 推动了光学、微电子器件、润湿调控、生物医疗、油水分离等前沿领域的发展。然而, 当前技术距离规模化应用还面临诸多挑战, 在曲面精度控制、大面积高效制造、工艺稳定性调控等方面仍存在明显不足, 限制了其产业化进程。未来, 将通过软硬件融合和提升制造精度, 如将五轴联动加工平台与激光加工结合, 实现光束能量在加工复杂曲面时的稳定输出; 或者是通过机器视觉系统与 EHD 技术联动, 实时修改 EHD 路径, 确保大面积加工时沉积位置的精准定位。通过上述方式的演进, 有望突破现有技术瓶颈, 推动曲面微纳制备技术在航空航天、生物医疗、柔性电子等高端领域的规模化应用。

参考文献

- [1] Long, G., Duan, J., Zhou, S., Wang, C., Ke, J., Zhang, J., *et al.* (2025) Femtosecond Laser Processing for Multi-Functional Hierarchical Micro/Nano Structures on Curved Surfaces. *Applied Surface Science*, **684**, Article 161850. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161850>
- [2] Li, M., Ma, R., Yang, C., Wang, L., Lv, S., Zhao, X., *et al.* (2025) Photothermal and Hydrophobic Surfaces with Nano-Micro Structure: Fabrication and Their Anti-Icing Properties. *Nanomaterials*, **15**, Article 378. <https://doi.org/10.3390/nano15050378>
- [3] Weng, W., Tenjimbayashi, M. and Naito, M. (2024) Role Variability of Surface Chemistry and Surface Topography in Anti-Icing Performance. *iScience*, **27**, Article 111039. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111039>
- [4] Liu, Z., Ye, F., Tao, H. and Lin, J. (2021) Effects of Frost Formation on the Ice Adhesion of Micro-Nano Structure Metal Surface by Femtosecond Laser. *Journal of Colloid and Interface Science*, **603**, 233-242. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.06.105>
- [5] Guo, Q., Ma, J., Yin, T., Jin, H., Zheng, J. and Gao, H. (2024) Superhydrophobic Non-Metallic Surfaces with Multiscale Nano/Micro-Structure: Fabrication and Application. *Molecules*, **29**, Article 2098. <https://doi.org/10.3390/molecules29092098>
- [6] Liu, P., Gao, Y., Wang, F., Yang, J., Yu, X., Zhang, W., *et al.* (2017) Superhydrophobic and Self-Cleaning Behavior of Portland Cement with Lotus-Leaf-Like Microstructure. *Journal of Cleaner Production*, **156**, 775-785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.211>
- [7] Ye, F., Song, L., Wang, Y., Yang, Y., Jin, R., Jiang, J., *et al.* (2025) Femtosecond Laser-Based Construction of 3D Spatially Distributed Graphene Oxide Surface for Enhancing Boiling Heat Transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **237**, Article 126405. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126405>
- [8] Ye, F., Wang, Y., Yang, Y., Jin, R., Jiang, J., Xu, J., *et al.* (2025) An Internal/External Dual Heat Transfer Mode Constructed by Femtosecond-Laser Direct Writing for Enhancing Water Boiling in Graphene Oxide Surface. *Applied Thermal Engineering*, **263**, Article 125343. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125343>
- [9] Baeten, S.R.R., Kochovski, A., Jovanova, J. and Sakes, A. (2024) Characterization of Shark Skin Properties and Biomimetic Replication. *Bioinspiration & Biomimetics*, **19**, Article 051002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad5c25>
- [10] Wang, W., Ma, X., Miao, J. and Fan, T. (2024) Vertically Aligned Aerogel with Concaved Surface Topography Coupled Ordered Channel Enable Efficient Solar-Driven Desalination. *Chemical Engineering Journal*, **496**, Article 153943. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153943>

- [11] Li, J., Wu, E., Xu, Z., Hou, J., Peng, W., Li, H., *et al.* (2025) Superior Photothermal Conversion Performance of Black Titanium-Based Materials. *iScience*, **28**, Article 112188. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112188>
- [12] Chen, Z., Lin, Y., Qian, Q., Su, P., Ding, Y., Tuan, P.D., *et al.* (2022) Picosecond Laser Treated Aluminium Surface for Photothermal Seawater Desalination. *Desalination*, **528**, Article 115561. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115561>
- [13] Sun, G., Shu, T., Ma, S., Li, M., Qu, Z. and Li, A. (2024) A Submicron Forest-Like Silicon Surface Promotes Bone Regeneration by Regulating Macrophage Polarization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **12**, Article ID: 1356158. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1356158>
- [14] Inaba, Y., Kurauchi, Y. and Yanagisawa, T. (2025) Transforming UV-Curable Emulsions for Arbitrary Patterning: A 2-layer Approach without Line-and-Space Constraints. *Macromolecular Materials and Engineering*, **310**, Article 2500016. <https://doi.org/10.1002/mame.202500016>
- [15] Fujiwara, H., Bareille, C., Okawa, M., Shin, S. and Taniuchi, T. (2024) High Throughput Observation of Latent Images on Resist Using Laser-Based Photoemission Electron Microscopy. *Applied Physics Express*, **17**, Article 086505. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ad6db6>
- [16] Zhu, C., Ekinici, H., Pan, A., Cui, B. and Zhu, X. (2024) Electron Beam Lithography on Nonplanar and Irregular Surfaces. *Microsystems & Nanoengineering*, **10**, Article No. 52. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00682-9>
- [17] Ran, S., Wen, K., Xie, L., Zhou, X., Tian, Y., Qiao, S., *et al.* (2024) Atomic Depth Image Transfer of Large-Area Optical Quartz Materials Based on Pulsed Ion Beam. *Micromachines*, **15**, Article 914. <https://doi.org/10.3390/mi15070914>
- [18] Qiao, D., Shi, F., Tian, Y., Zhang, W., Xie, L., Guo, S., *et al.* (2023) Ultra-smooth Polishing of Single-Crystal Silicon Carbide by Pulsed-Ion-Beam Sputtering of Quantum-Dot Sacrificial Layers. *Materials*, **17**, Article 157. <https://doi.org/10.3390/ma17010157>
- [19] Farshchian, B., Lee, J. and Park, S. (2009) Nanostructuring Curved Surfaces Using a Flexible Stamp. *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, Pohang, 22-24 June 2009, 481-484. <https://doi.org/10.1115/icnmm2009-82282>
- [20] Cho, J., Kim, G., Kim, S. and Lee, H. (2013) Replication of Surface Nano-Structure of the Wing of Dragonfly (*Pantala Flavescens*) Using Nano-Molding and UV Nanoimprint Lithography. *Electronic Materials Letters*, **9**, 523-526. <https://doi.org/10.1007/s13391-013-0042-0>
- [21] Zhou, Y., Chen, L., Shu, Z., Fan, F., Hu, Y. and Duan, H. (2025) Wafer-level Perfect Conformal Contact Lithography at the Diffraction Limit Enabled by Dry Transferable Photoresist. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **7**, Article 065101. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/adf60f>
- [22] Jiang, Y., Ye, D., Li, A., Zhang, B., Han, W., Niu, X., *et al.* (2024) Transient Charge-Driven 3D Conformal Printing via Pulsed-Plasma Impingement. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **121**, e2402135121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2402135121>
- [23] Zhou, P., Yu, H., Zhong, Y., Zou, W., Wang, Z. and Liu, L. (2020) Fabrication of Waterproof Artificial Compound Eyes with Variable Field of View Based on the Bioinspiration from Natural Hierarchical Micro-Nanostructures. *Nano-Micro Letters*, **12**, Article No. 166. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00499-x>
- [24] Holder, D., Peter, A., Kirsch, M., Cáceres, S., Weber, R., Onuseit, V., *et al.* (2024) Enhancing Heat Transfer at Low Temperatures by Laser Functionalization of the Inner Surface of Metal Pipes. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 2557. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53062-8>
- [25] Schmelz, D., Käsebier, T., Shi, Z., Cheng, Q., Sergeev, N., Schelle, D., *et al.* (2023) Investigations on Black Silicon Nanostructures Fabricated by Reactive Ion Etching on Highly Curved Surfaces. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **165**, Article 107646. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107646>
- [26] Wu, M., Jiang, L., Li, T., Huang, J., Yi, P., Zhang, L., *et al.* (2023) Efficient Fabrication of Infrared Antireflective Microstructures on a Curved Diamond-ZnS Composite Surface by Using Femtosecond Bessel-Like Beams. *Optics Express*, **31**, 28670-28682. <https://doi.org/10.1364/oe.493455>
- [27] AlQattan, B., Yetisen, A.K. and Butt, H. (2018) Direct Laser Writing of Nanophotonic Structures on Contact Lenses. *ACS Nano*, **12**, 5130-5140. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00222>
- [28] Butt, H. and AlQattan, B. (2022) Printing Nanostructure Holograms on Contact Lenses via Direct Laser Ablation. *Procedia CIRP*, **113**, 594-598. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.181>
- [29] Hao, B., Liu, H., Chen, F., Yang, Q., Qu, P., Du, G., *et al.* (2012) Versatile Route to Gapless Microlens Arrays Using Laser-Tunable Wet-Etched Curved Surfaces. *Optics Express*, **20**, 12939-12948. <https://doi.org/10.1364/oe.20.012939>
- [30] Huang, Y., Wu, H., Zhu, C., Xiong, W., Chen, F., Xiao, L., *et al.* (2021) Programmable Robotized 'Transfer-and-Jet' Printing for Large, 3D Curved Electronics on Complex Surfaces. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **3**, Article 045101. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac115a>
- [31] Bian, J., Zhou, L., Wan, X., Liu, M., Zhu, C., Huang, Y., *et al.* (2018) Experimental Study of Laser Lift-Off of Ultra-

- Thin Polyimide Film for Flexible Electronics. *Science China Technological Sciences*, **62**, 233-242. <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9349-x>
- [32] Won, M., Oh, G., Lee, H., Kim, J. and Kim, D. (2023) Humidity Sensors Based on Cellulose Nanofiber Fabricated on a Three-Dimensional (3D) Curved Surface. *Nanomaterials*, **13**, Article 3005. <https://doi.org/10.3390/nano13233005>
- [33] Liu, J., Xiao, L., Rao, Z., Dong, B., Yin, Z. and Huang, Y. (2018) High-Performance, Micrometer Thick/Conformal, Transparent Metal-Network Electrodes for Flexible and Curved Electronic Devices. *Advanced Materials Technologies*, **3**, Article 1800155. <https://doi.org/10.1002/admt.201800155>
- [34] Wang, A., Jiang, L., Li, X., Huang, J., Xu, Z., Wang, Z., *et al.* (2021) Functionalization of Freeform Curved Surfaces by Shaped Femtosecond Laser Pulses in the Propagation Axis. *Optics Express*, **29**, 5487-5496. <https://doi.org/10.1364/oe.418663>
- [35] Sun, J., Huang, H., Ji, J., Zhang, C., Wu, B., Liu, H., *et al.* (2025) Fabrication of Superhydrophobic Ultra-Fine Brass Wire by Laser Processing. *Materials*, **18**, Article 1420. <https://doi.org/10.3390/ma18071420>
- [36] Ye, D., Su, J.T., Jiang, Y., Yin, Z.P. and Huang, Y.A. (2020) Plasma-Jet-Induced Programmable Wettability on Stretchable Carbon Nanotube Films. *Materials Today Physics*, **14**, Article 100227. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100227>
- [37] Chopra, D., Gulati, K. and Ivanovski, S. (2021) Towards Clinical Translation: Optimized Fabrication of Controlled Nanostructures on Implant-Relevant Curved Zirconium Surfaces. *Nanomaterials*, **11**, Article 868. <https://doi.org/10.3390/nano11040868>
- [38] Wang, Y., Sharma, S., Maldonado, F. and Dong, X. (2023) Wirelessly Actuated Ciliary Airway Stent for Excessive Mucus Transportation. *Advanced Materials Technologies*, **8**, Article 2301003. <https://doi.org/10.1002/admt.202301003>
- [39] Tottori, S., Matsuura, M., Ichinose, S., Cho, H., Galloway, T., Moriyama, N., *et al.* (2025) Flexible Porous Microneedle Array for Bioelectric Skin Patch. *Biomedical Microdevices*, **27**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1007/s10544-025-00749-y>
- [40] Kusama, S., Sato, K., Matsui, Y., Kimura, N., Abe, H., Yoshida, S., *et al.* (2021) Transdermal Electroosmotic Flow Generated by a Porous Microneedle Array Patch. *Nature Communications*, **12**, Article No. 658. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-20948-4>
- [41] Ahlawat, S., Singh, A., Mukhopadhyay, P.K., Singh, R. and Bindra, K.S. (2021) Nanosecond Laser Induced Glass Particle Deposition over Steel Mesh for Long-Term Superhydrophilicity and Gravity Driven Oil Water Separation. *Materials Chemistry and Physics*, **263**, Article 124343. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124343>
- [42] Yu, P., Lian, Z., Xu, J., Yu, Z., Ren, W. and Yu, H. (2018) Fabrication of Superhydrophilic and Underwater Superoleophobic Metal Mesh by Laser Treatment and Its Application. *Materials Research Express*, **5**, Article 045013. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab920>
- [43] Khan, S.A., Ialyshev, V., Kim, V.V., Iqbal, M., Al Harmi, H., Boltaev, G.S., *et al.* (2020) Expedited Transition in the Wettability Response of Metal Meshes Structured by Femtosecond Laser Pulses for Oil-Water Separation. *Frontiers in Chemistry*, **8**, Article ID: 768. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00768>
- [44] Liu, Y., Zhang, H., Wang, P., He, Z. and Dong, G. (2022) 3D-Printed Bionic Superhydrophobic Surface with Petal-Like Microstructures for Droplet Manipulation, Oil-Water Separation, and Drag Reduction. *Materials & Design*, **219**, Article 110765. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110765>