

## 激光微纳可控功能表面设计与制造

翁占坤, 董莉彤, 申慧娟, 李思宁, 宋正勋, 王作斌  
长春理工大学 国家纳米操纵与制造国际联合研究中心  
wengzk@cust.edu.cn

**Аннотация.** В данной работе проведена серия исследований по проектированию и подготовке микро и нанофункциональных поверхностей на основе технологии лазерной обработки, проверена ее способность готовить и регулировать функциональные поверхности и композитные функциональные поверхности по оптическим параметрам, смачиванию, адгезии и трению, обеспечивая техническую основу для применения микро и нанокомпозитных функциональных поверхностей в промышленности.

**摘要。** 本文基于激光加工技术开展了微纳功能表面设计与制备的系列工作, 验证了其在光学、润湿、粘附和摩擦等功能表面及复合功能表面制备及调控能力, 为微纳复合功能表面应用于工业提供了技术基础。

1997年, Barthlott & Neinhuis 首先报道了荷叶表面的自清洁现象, 也称之为“荷叶效应”<sup>[1]</sup>, 江雷等提出了纳米界面材料的“二元协同效应”, 解释了“荷叶效应”现象的机理<sup>[2]</sup>。随后, 进一步发现低表面能材料与其表面织构化是构成超疏水表面的必要条件<sup>[3, 4]</sup>, 这些具有超疏水性的微纳结构材料在摩天大楼玻璃、交通指示牌、纺织品和金属表面改善等方面展现了潜在应用价值。最近, 人们发现微纳结构表面在光学、微流控、防腐、摩擦学及生物芯片等领域也呈现出新的功能和效应<sup>[5-7]</sup>, 同时也激发了人们将微纳功能表面应用于航空航天, 车辆, 生物工程、能源以及制药工程等领域的愿望<sup>[8-11]</sup>。同时, 这些优异的功能也激发了广大科研工作者不断开发新的微纳功能表面制备技术及设备, 尤其是大面积, 高效和低成本制备技术和方法。

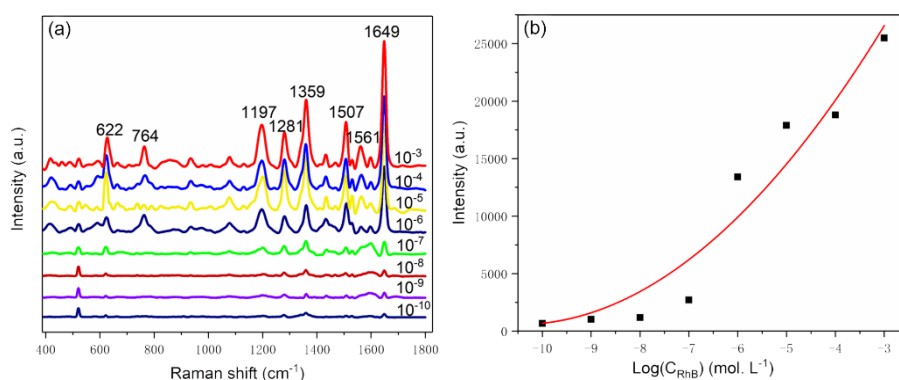


图 1 – 基于激光干涉向前转移 Ag 微条纹结构的罗丹明 B ( $10^{-10}$ – $10^{-3}$  mol·L<sup>-1</sup>) SERS 光谱 (a), 以及  $1649\text{ cm}^{-1}$  峰位处的拉曼强度与罗丹明 B 的摩尔浓度对数值的关系<sup>[12]</sup>

与离子束纳米加工、微/纳米压印、机械加工和表面涂层等技术相比，激光加工技术在大面积、高效和低成本跨尺度微纳功能表面制备方面表现出独有的优势。本工作利用激光诱导表面从超亲水向超疏水转变，同时，有效地制备出经久耐用、性能稳定的超疏水结构，并建立材料表面润湿和粘附特性的多尺度微观结构模型。自主研发了激光干涉五轴联动自由曲面加工系统，并利用该系统在钛基合金材料自由曲面实现了大面积微纳阵列结构的超疏水、减阻和防覆冰性能，该结构的静态接触角 $>160^\circ$ ，风速  $41.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  下，减阻率达到 10%，零下  $10^\circ\text{C}$  时延缓结冰时间达到 1 小时。另外，针对低成本高效 SERS 芯片制备需求，提出了激光干涉向前/后转移微纳制造方法，以及激光干涉诱导图案化电化学沉积核壳结构制备技术，其中，基于贵金属 Ag 制备的 SERS 芯片对探针分子罗丹明 B 的最低探测浓度可达到  $10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ （图 1）。此外，利用激光干涉直写技术在钴铬钼合金表面制备规则有序多孔阵列结构，其硬度提高 40%，摩擦系数降低 30%。为了研究融石英表面微纳阵列结构在单细胞检测中的应用，结合激光干涉与离子束刻蚀技术，实现了石英材料表面粘附力的调控，调控范围在  $3\text{--}26 \mu\text{N}$  之间（图 2），同时，针对镜片在野外工作时，沙尘的影响以及雨水和雾气在镜片形成液滴导致的咖啡圈效应，结合激光干涉与离子束刻蚀技术，在红外窗口材料 Si 衬底表面实现了超疏液和陷光功能，其接触角 $>150^\circ$ ，滚动角 $<5^\circ$ ，可见光范围内反射率 $<1.2\%$ （图 3）。

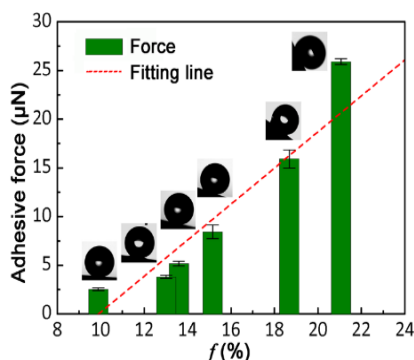


图 2 – 结构占空比与粘附力关系<sup>[13]</sup>

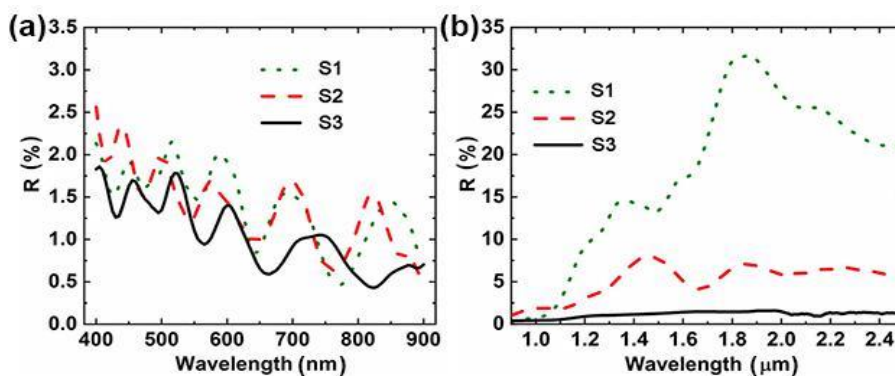


图 3 – 可见 (a) 与红外波段 (b) 反射光谱，其中，S1 为化学腐蚀，S2 为模拟结果，S3 为微纳结构<sup>[14]</sup>

总之，本工作基于可控功能表面的需求，利用激光微纳加工技术针对系列工作，揭示了激光干涉在微纳功能表面及复合功能表面制备方面的潜力，研制了激光干涉自由曲面加工系统，提出了激光干涉应用于大面积、高效和低成本微纳功能表面制备技术和方法。

### 参考文献

1. Barthlott, W. Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces / W. Barthlott, C. Neinhuis // *Planta*. – 1997. – № 1. – P. 1–8.
2. Jiang, L. Binary cooperative complementary nanoscale interfacial materials / L. Jiang [et al.] // *Pure and Applied Chemistry*. – 2000. – P. 73–81.
3. Park, Y. B. Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications / Y. B. Park, H. Im, M. Im, Y. K. Choi // *J. Mater. Chem.* – 2011. – № 3. – P. 633–636.
4. Spori, D. Beyond the lotus effect: roughness influences on wetting over a wide surface-energy range / D. Spori [et al.] // *Langmuir*. – 2008. – № 10. – P. 5411–5417.
5. Cai, J. Self-cleaning, broadband and quasioisnidirectional antireflective structures base on mesocrystalline rutile TiO<sub>2</sub> nanorod arrays / J. Cai [et al.] // *Energy Environ. Sci.* – 2012. – № 6. – P. 7575–7581.
6. Dufour, R. Zipping effect on omniphobic surfaces for controlled deposition of minute amounts of fluid or colloids / R. Dufour [et al.] // *Small*. – 2012. – № 8. – P. 1229–1236.
7. Bhushan, B. Nanotribology and nanomechanics of MEMS/NEMS and bioMEMS/bioNEMS materials and devices / B. Bhushan // *Microelectron. Eng.* – 2007. – № 3. – P 387–412.
8. Sydow-Plum, G. Review of stent coating strategies: Clinical insights / G. Sydow-Plum, M. Tabrizian // *Mater. Sci. Tech.* – 2008. – № 9. – P. 1127–1143.
9. Fadeeva, E. Bacterial retention on superhydrophobic titanium surfaces fabricated by femtosecond laser ablation / E. Fadeeva [et al.] // *Langmuir*. – 2011. – P. 3012.
10. Waters, S. L. Ureteric stents: investigating flow and encrustation / S. L. Waters [et al.] // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – 2008. – P. 551.
11. Bae, W. G One-step process for superhydrophobic metallic surfaces by wire electrical discharge machining / W. G. Bae [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2012. – № 7. – P. 3685.
12. Shen, H. J. Fabrication of periodic microscale stripes of silver by laser interference induced forward transfer and their SERS properties / H. J. Shen [et al.] // *Nanotechnology*. – 2022. – № 11.
13. Dong, L. T. Controllable superhydrophobic surfaces with tunable adhesion fabricated by laser interference lithography / L. T. Dong [et al.] // *Surf. & Coat. Tech.* – 2019. – P. 434–441.
14. Dong, L. T. Fabrication of hierarchical moth-eye structures with durable superhydrophobic property for ultrabroadband visual and mid-infrared applications / L. T. Dong [et al.] // *Applied Optics*. – № 24. – P. 6706–6712