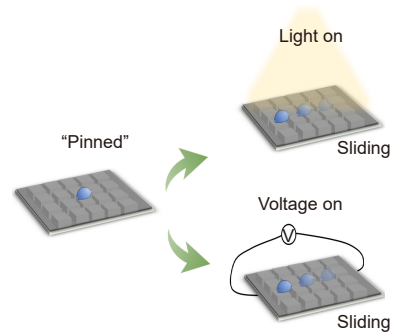


DOI: 10.12086/oe.2022.210356

## 光/电响应型超滑表面的激光加工制备

矫知真<sup>1</sup>, 韩星尘<sup>1</sup>, 周昊<sup>1</sup>, 韩冬冬<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012;<sup>2</sup>中国空气动力研究与发展中心, 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000

**摘要:** 受到自然界的猪笼草启发, 超滑表面受到了许多关注。本文通过激光加工技术在石墨烯和聚偏氟乙烯的复合材料表面 (G@PVDF) 进行烧蚀, 采用热旋涂法将石蜡材料均匀地填充于网格状沟槽内部。利用共聚焦显微镜 (CLSM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 表征激光加工后沟槽的形貌与深度, 利用 UV3600 以及红外热成像仪测试样品的光吸收以及光热特性。当复合材料表面未受到强光照射时, 液滴“钉”在表面; 由于石墨烯具有优异的光热转换能力, 当复合材料表面受到强光照射时, 复合材料表面吸收光能并产生热量使石蜡融化, 液滴与表面由粗糙的气/液/固状态转变为光滑的气/液/润滑剂/固状态, 液滴可在倾斜角约 10° 的状态滑动且无残留。另一方面, 通过外界电压也能同样控制液滴的行为。研究结果对于智能化操控液滴有着重要的意义。

**关键词:** 激光加工; 石墨烯; 超滑表面; 浸润性**中图分类号:** TN249**文献标志码:** A

矫知真, 韩星尘, 周昊, 等. 光/电响应型超滑表面的激光加工制备 [J]. 光电工程, 2022, 49(2): 210356

Jiao Z Z, Han X C, Zhou H, et al. Laser fabrication of light/voltage-responsive slippery liquid-infused porous substrate (SLIPS)[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(2): 210356

## Laser fabrication of light/voltage-responsive slippery liquid-infused porous substrate (SLIPS)

Jiao Zhizhen<sup>1</sup>, Han Xingchen<sup>1</sup>, Zhou Hao<sup>1</sup>, Han Dongdong<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics College, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China

**Abstract:** Inspired by the nepenthes in nature, slippery liquid-infused porous substrates (SLIPS) have attracted extensive research attentions. In this work, a graphene @ polyvinylidene fluoride (G@PVDF) composite substrate was ablated by a laser technology. Then paraffin is uniformly filled in the grooves by a thermal spin-coating method. A confocal laser scanning microscope and a scanning electron microscope were used to characterize the surface morphology and depth of the grooves. UV3600 and Infrared thermal imagers were used to test the absorption and

收稿日期: 2021-11-10; 收到修改稿日期: 2022-01-26

基金项目: 中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室开放课题资助 (IADL20210404); 国家自然科学基金资助项目 (61905087); 中央高校基本科研业务费 (2020-JCXK-18)

\*通信作者: 韩冬冬, handongdong@jlu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

photothermal characteristics of the samples. The droplet is "pinned" on the surface without light irradiation. Since graphene has excellent photothermal conversion capability, the photothermal conversion happens upon light irradiation. The temperature is high enough to melt the paraffin, the interface state changes from the friction gas-liquid-solid interface to a smooth gas-liquid-lubricant-solid interface. The droplet can slide at an inclination angle of about 10° without leaving any residues. In addition, the droplet sliding can be controlled by an external voltage. This work shows potentials in manipulating the behavior of droplets.

**Keywords:** laser fabrication; graphene; slippery surface; wettability

## 1 引言

近些年来, 研究人员通过研究猪笼草的唇部结构, 发现其唇部呈现出排列整齐的微沟槽结构。猪笼草能够通过捕获空气中的水雾或自身分泌润滑液来填充微沟槽, 使落在其唇部上面的昆虫失足落入袋中而进行捕食<sup>[1-3]</sup>。受到猪笼草唇部的启示, 研究人员制备了仿猪笼草的多孔液体灌注表面, 即通过将低表面能的润滑液体注入多孔基底, 基底能够将润滑液体牢牢锁在多孔网络中, 且润滑液体能够在多孔基底中动态的流动。这种超滑表面具有能够排斥多种液体、自愈合、耐高压等优点, 在抗粘附、微流控芯片、液滴/气泡运输及操控、生物医学等方面有着重要的应用价值<sup>[4-6]</sup>。

2011年, Wong<sup>[7]</sup>等人将全氟液体(如FC-70)注入到纳米结构表面(如基于环氧树脂的纳米结构表面或具有网络结构的特氟龙纳米纤维膜), 制备出的样品滑动角仅为2°, 能够排斥多种液体(如: 水、原油、血液等)。超滑表面的制备准则有三个, 首先是基底有互通网络, 能够牢牢锁住润滑液; 其次, 润滑液和排斥液体不混溶; 最后, 相对于排斥液体, 润滑液应更容易润湿基底。因此通常通过化学修饰等方法使表面疏水, 以确保润滑液不被排斥液挤走而失去超滑特性。随着研究的深入, 研究人员在超滑表面中加入刺激响应类的物质材料, 进而通过温度场、电场、光场等外界刺激控制表面浸润性的切换, 以实现液滴更精确的操控<sup>[8-9]</sup>。例如: 石墨烯具有优异的光热转换特点, Wang等人通过化学还原结合冷冻干燥法制备了多孔石墨烯海绵, 在多孔结构中灌注石蜡, 结合石墨烯的光热响应特性和石蜡的相变特性, 在近红外光的照射下能够实现材料表面粗糙与超滑之间的动态、可逆的切换<sup>[10-12]</sup>。因此, 利用先进的加工技术制备外界响应型的超滑表面具有重要的价值以及应用潜力<sup>[13-14]</sup>。2019年, Jiao<sup>[15]</sup>等人通过飞秒激光烧蚀结合疏水涂层修饰制备了超滑表面, 对激光扫描路径进行进一步设

计后, 能够实现气泡在水下沿设定的路线滑动, 实现气泡融合。2021年, Huang<sup>[14]</sup>等人提出一种由Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PDMS组成的超疏水微柱阵列基底结合润滑剂石蜡灌注的光响应光滑表面, 通过对近红外光的照射路径进行图案化, 可以实现液滴按照照射路径的移动, 除此之外具有强抗干扰性以及在近红外光协助下的自愈合优点。因此超滑表面较超疏水而言, 具有更强的抗污性能、稳定性以及自修复性能等, 并且结合激光加工的材料任意性而言, 实现更多的智能响应化基底、实现多种响应型刺激的超滑表面是目前研究的重点。尽管近些年超滑表面已经得到了较为广泛的研究, 但是超滑表面中的润滑剂通常采用一些对环境不友好的含氟液体, 因此, 目前寻求一种对环境友好, 生物相容性强的超滑表面是研究的难点和重点。石蜡作为一种对人体无害、化学/热稳定性较好且价格较为低廉的热相变材料, 其熔点范围在45℃左右, 将其引入超滑表面作为润滑剂相比于通常的含氟类润滑剂具有更广泛的应用前景。

本文通过利用激光加工技术在石墨烯和聚偏氟乙烯的复合材料表面(G@PVDF)上烧蚀出网格结构, 再利用热旋涂法将石蜡均匀地填充在沟槽内部。当外界施加光照时, 样品表面吸收光, 通过光热转换产生的热量足以让表面温度超过石蜡融化的温度(40℃~45℃)。液滴与表面间的界面从粗糙的气/液/固状态转变为光滑的气/液/润滑剂/固状态, 液滴能够从钉扎状态切换到滑动状态, 实现通过控制外界光的开关来操控液滴的停止与滑动。另一方面, 我们利用激光诱导PI薄膜(laser induced graphene, LIG)作为底部热源, 将结构化的G@PVDF与LIG集成在一起, 通过外加电压控制LIG产生的温度同样来控制液滴的滑动状态。我们提出的这种光/电双控超滑表面, 具有制备方法简单, 能够实现无接触式操控, 在未来的液滴操控、生物医学、微流控器件等领域有着重要发展前景。

## 2 实验部分

### 2.1 超滑表面的制备

将 PVDF 粉末和 N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 溶液以 1 g:8 mL 的比例充分搅拌, 将混合物置于超声机进行大约 1 h 的超声, 目的是使 PVDF 粉末充分地溶解于 DMF 溶液中。然后向其中加入与 PVDF 粉末质量比 (PVDF:石墨烯) 为 1:0.03 的石墨烯粉末, 不断搅拌再超声约 20 min 至 30 min, 使石墨烯粉末充分分散于 PVDF 与 DMF 的混合溶液中。再将混合物滴涂在干净的载玻片上, 放置于温度为 80 °C 的烘箱, 等待 15 min~20 min 热烘干成 G@PVDF 薄膜。将制备好的 G@PVDF 薄膜平整地置于加工台上, 表面用纳秒紫外激光器加工。激光波长为 355 nm, 激光脉宽为 12 ns, 聚焦光斑直径约为 50 μm。所采用的加工参数: 扫描间距分别为 100 μm, 200 μm, 300 μm、重复频率为 200 kHz、加工速率为 20 mm/s、加工功率分别为 1200 mW, 1800 mW, 2400 mW。激光加工路径为网格结构。通过激光加工, 在 G@PVDF 薄膜表面烧蚀出规律的网格结构, 为后续石蜡的注入提供了空间。将制备好的结构化的 G@PVDF 基底置于匀胶机上, 在样品表面放置固态石蜡, 将匀胶机上方的热源打开, 其中转速设定为 300 r/min, 时间设置为 30 s, 待石蜡融化后开始进行热旋涂。待热旋涂结束后, 即制备好了基于 G@PVDF 结构化基底的超滑表面。

### 2.2 样品的表征测试

使用奥林巴斯 3D 显微镜 (OLS4100, JAPAN) 拍摄共聚焦激光扫描显微图像 (CLSM)。使用 JEOL JSM-7500F 场发射扫描电子显微镜拍摄扫描电子显微镜 (SEM) 图像。使用 Shimadzu UV-3600 分光光度计 (LISR-UV3100) 测试 300 nm~2000 nm 的吸收光谱。使用红外热成像相机 (FOTRIC 286) 测量样品表面温度和热分布图像。水滴接触角 (CAs) 由接触角测试系统 (SDC-350, SIN DIN Corporation, China) 在环境温度 (约 20 °C) 下测量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 结构化 G@PVDF 基底的表面形貌表征

近年来, 激光微纳加工技术得到飞速发展, 这是由于激光微纳加工技术具有无掩膜加工、可加工几乎任意材料、精度较高等特点<sup>[16-20]</sup>, 在微光学器件<sup>[21-22]</sup>、

微电子<sup>[23]</sup>、生物化学、仿生材料<sup>[24]</sup>等领域有着重要应用发展<sup>[25-31]</sup>。因此, 利用激光加工构建一个结构化的基底是一个合适的选择, 其中液态石蜡也能够通过毛细力的作用充分渗透到结构化的基底中, 与基底牢牢结合。另一方面, 利用激光加工对基底引入周期性微米级结构对光的吸收也会有一定程度的提升<sup>[32-34]</sup>。利用激光加工引入的周期性微米结构能够在一定程度上增加光程, 实现光的多次反射, 进而增加样品表面的吸收。

首先, 我们制备好石墨烯与 PVDF 的混合溶液, 将其滴涂在干净的载玻片上 (图 1(a)), 热烘干成膜后, 利用激光加工在其表面烧蚀出网格结构 (图 1(b)), 再通过热旋涂法将石蜡注入沟槽中 (图 1(c))。制备出的超滑表面在无外界光/电刺激下液滴会“钉”在表面 (图 1(d)), 当施加外界光场或电场刺激时, 表面温度达到石蜡融化温度的范围, 石蜡融化, 液滴与表面间界面状态改变, 液滴的状态由钉住变为滑动 (图 1(e), 1(f))。

如图 2(a), 2(b), 3(a) 所示, 激光加工之前的 G@PVDF 薄膜表面比较平整, 截面相对来说维持在一个高度 (图 2(c))。对表面进行激光烧蚀之后, 激光去除了表面一部分的材料, 如图 2(d)~2(f), 2(g)~2(i), 2(j)~2(l) 所示, 表面呈现规则网格状的沟槽, 深度分别约为 10 μm, 25 μm, 35 μm (图 2(f), 2(i), 2(l))。利用激光烧蚀出的沟槽为石蜡后续的注入提供了条件。对于功率为 1200 mW 的结构化 G@PVDF, 沟槽并不明显, 接近平面结构, 这样对石蜡的填充吸附以及储存和器件的重复利用带来困难; 对于功率为 2400 mW 的结构化 G@PVDF, 沟槽深度加深, 虽然更容易将石蜡吸附及储存, 减少润滑剂损失。但是在激光烧蚀过程中更大的功率容易导致表面出现更多碎屑, 粗糙度增大的同时不利于后续液滴滑动。因此, 功率为 1800 mW 为相对合适的激光加工参数。为了进一步观察 G@PVDF 薄膜表面的加工前后的表面形貌, 我们利用冷场发射电子显微镜对其进行观察。如图 3(b) 所示, 网格状表面相对比较平整, 没有杂质残留, 且表面相对较平, 这为液滴在表面能够无阻碍地滑动提供有力的保障。热旋涂灌注石蜡后, 融化的石蜡能够填充进沟槽内部, 冷却后石蜡凝固, 石蜡能够完全覆盖住沟槽, 且表面相对较为平滑 (图 2(m)~2(o), 3(c))。

### 3.2 光吸收与光热转换性能测试

为了能够通过吸收光的能量转换为热能来使表面

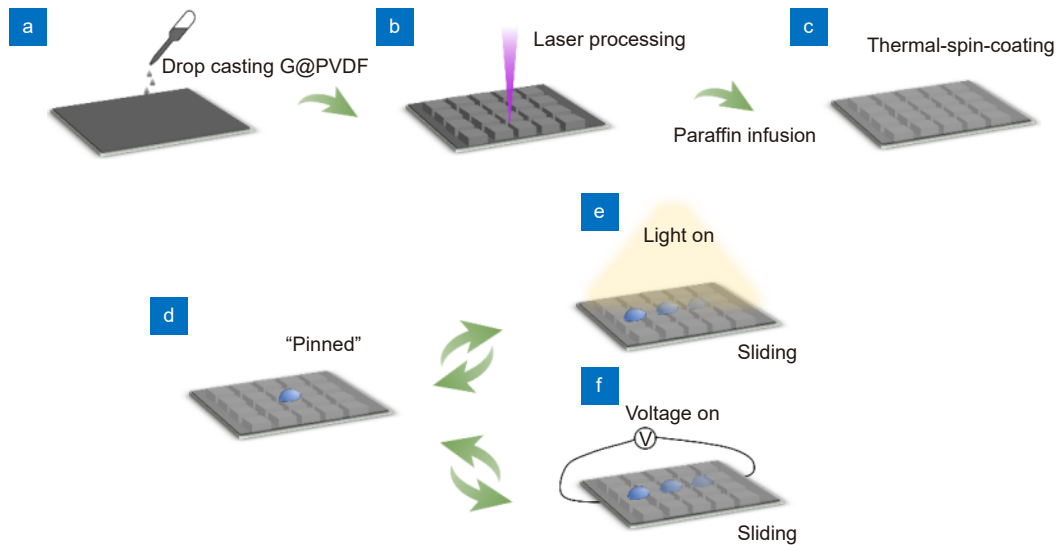


图 1 光控超滑表面制备流程图。

(a) 在玻璃基底上滴涂 G@PVDF; (b) 利用激光加工在 G@PVDF 薄膜表面结构化加工; (c) 热旋涂石蜡; (d) 无光照时表面液滴“钉扎状态”; (e) 光照时表面的“超滑”状态; (f) 加电压时表面的“超滑”状态

Fig. 1 Schematic illustration of a fabrication process of light/voltage-controlled SLIPS surface.

(a) Drop-coating G@PVDF on a glass substrate; (b) Laser processing G@PVDF film; (c) Thermal spin-coating paraffin wax; (d) The "pinned" state of droplet without light; (e) The "slippery" state of the surface with light irradiation; (f) The "slippery" state of the surface with the voltage on

石蜡融化进而形成光控超滑表面，衡量激光加工后 G@PVDF 薄膜的吸收和光热转换能力是必不可少的。在加工功率 1800 mW 的基础上分别制备了不同周期的结构化 G@PVDF，其中周期分别为 100 μm，200 μm，300 μm。在 300 nm 至 2000 nm 的光波长范围内，对比了不加石墨烯的 PVDF 薄膜以及激光结构化后的不同周期的 G@PVDF 薄膜的吸收率 (图 4)。由于添加石墨烯后样品由透明变为黑色不透明的薄膜，吸收率大幅度提升，光吸收从约平均 14% 提升至平均 88% 以上。并且随着网格周期的减小，吸收呈增加的趋势，这是由于周期性结构的沟槽数量增加在一定程度上会使更多的入射光在沟槽中进行多次反射，提升吸收率。光吸收率大幅度的提升对于后续的光热转换有着重要作用。由于周期为 100 μm 及 200 μm 的样品有着比较好的光吸收率且吸收率大致相仿，最终结合加工效率选择周期为 200 μm，功率为 1800 mW 作为后续一系列展示的最终加工参数。

为了进一步测试光热转换性能，将 PVDF 薄膜以及激光加工制备的结构化 G@PVDF 薄膜裁剪成五边形，用双面胶分别贴在 A4 纸上，利用红外热成像仪器对其进行关闭光源时以及打开光源的情况下红外图像的拍摄作为对比 (图 5(a))，测试从无光源及打开光

源 (光源为白炽灯，功率约为 740 mW/m<sup>2</sup>) 后表面温度情况。打开光源前，左右两个薄膜表面温度相同，与环境温度相似，均为约 22.8 °C。当光源打开后，仅在 5 s 内，激光结构化后的 G@PVDF 薄膜温度由 22.8 °C 上升至 27.3 °C，而未掺石墨烯的原始 PVDF 膜仅上升了 2.1 °C。经历约 230 s 光照后，PVDF 薄膜的温度由 22.8 °C 上升至 34.8 °C，然而激光结构化后的 G@PVDF 薄膜表面温度达到了 45.9 °C，超过石蜡的熔点 (约为 40 °C~45 °C)，仅通过 230 s 光照后的温度足以将固态石蜡融化。

因此，结合光吸收以及上述光热对比可以看出，添加了石墨烯的结构化薄膜具有十分优异的光吸收以及光热转换效率。并且仅通过控制光照足以将表面填充于沟槽的石蜡融化形成超滑表面。

### 3.3 表面浸润性的测试

表面平整的 G@PVDF 表面接触角大约 90.2° (图 6(a))。由于激光对表面的烧蚀作用，表面出现规律的网格状的沟槽，表面粗糙度增加，疏水角增加至约 128.2° (图 6(b))。石蜡填充后，表面粗糙度相对激光加工结构化基底有一定程度的减小，疏水角约为 108.5° (图 6(c))。其中，液滴体积为 5 μL。

通过控制外界光源的开关，能够对石蜡的相变做

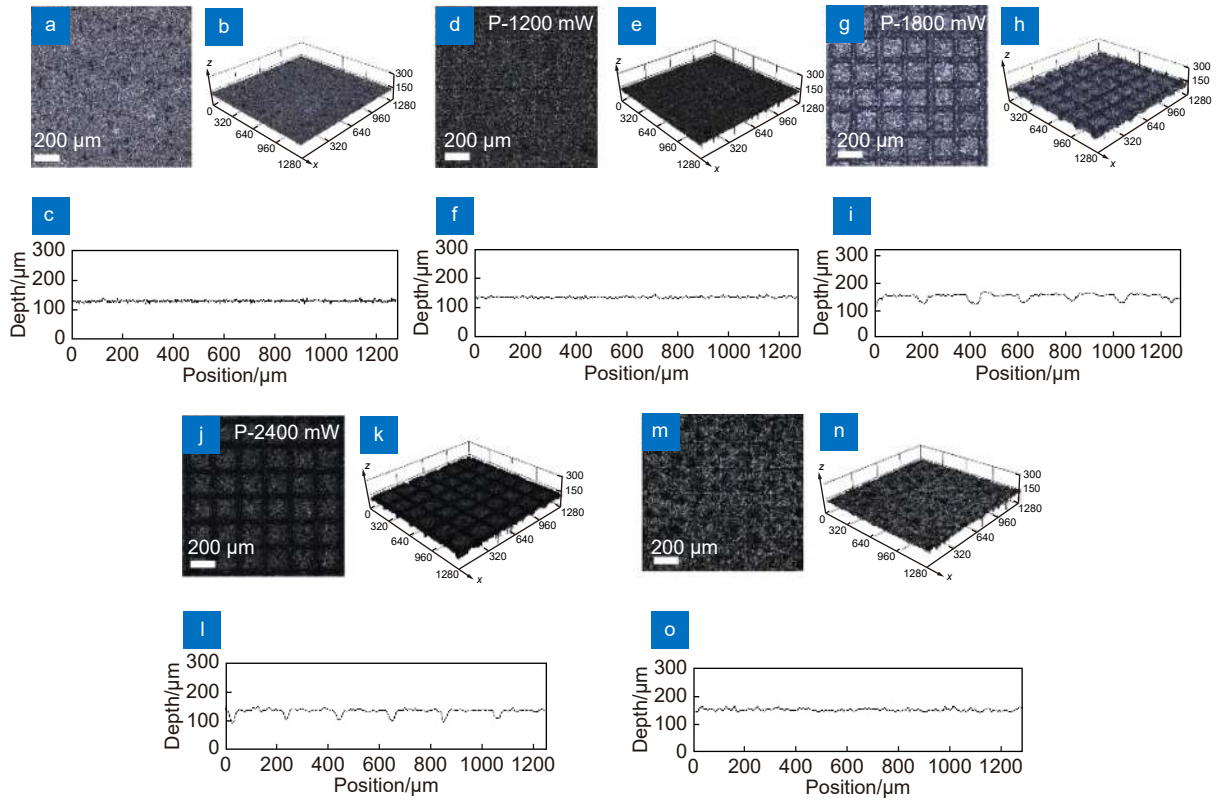


图 2 激光加工前后表面及三维形貌的三维共聚焦图像。

G@PVDF 薄膜 (a) 表面, (b) 三维形貌, (c) 截面高度;  
 结构化的 G@PVDF(d) 薄膜 (P-1200 mW) 表面, (e) 三维形貌, (f) 截面高度;  
 结构化的 G@PVDF 薄膜 (P-1800 mW) (g) 表面, (h) 三维形貌, (i) 截面高度;  
 结构化的 G@PVDF 薄膜 (P-2400 mW) (j) 表面, (k) 三维形貌; (l) 截面高度;  
 石蜡灌注后结构化的 G@PVDF 薄膜 (m) 表面, (n) 三维形貌, (o) 截面高度

Fig. 2 Confocal laser scanning microscopy (CLSM) images of the surface and three-dimensional topography before and after laser processing.

G@PVDF film (a) surface, (b) three-dimensional topography, (c) section height;  
 (d) The surface, (e) the three-dimensional morphology and (f) the section height of the structured G@PVDF film(P-1200 mW);  
 (g) The surface of, (h) the three-dimensional morphology and the section height of the structured G@PVDF film(P-1800 mW);  
 (j) The surface, (k) the three-dimensional morphology and (l) the section height of the structured G@PVDF film(P-2400 mW);  
 (m) The surface, (n) the section height and (o) the section height of the structured G@PVDF film after paraffin infusion

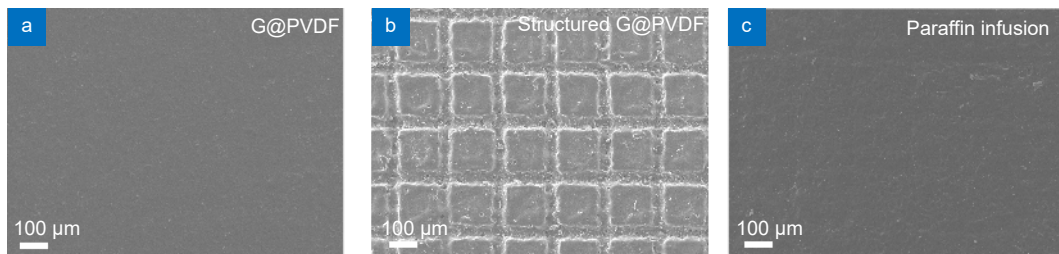


图 3 表面 SEM 图像。

(a) G@PVDF 表面; (b) 结构化的 G@PVDF 表面 (P-1800 mW); (c) 石蜡灌注后表面

Fig. 3 SEM image.

(a) G@PVDF; (b) Structured G@PVDF(P-1800 mW); (c) Paraffin infused surface

出控制, 进而切换液滴与表面的界面状态, 最终可以实现控制液滴的滑动状态, 达到无接触式操控液滴的

效果。当施加外界光刺激或 10 V 激励电压时, 产生的热量使石蜡产生相变, 石蜡融化, 这样界面状态变

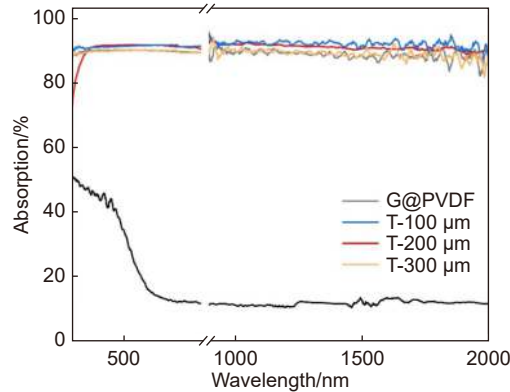


图 4 PVDF 薄膜与结构化的 G@PVDF 薄膜 (T-100 μm, T-200 μm, T-300 μm) 的吸收率  
Fig. 4 Absorption of PVDF film and structured G@PVDF film(T-100 μm, T-200 μm, T-300 μm)

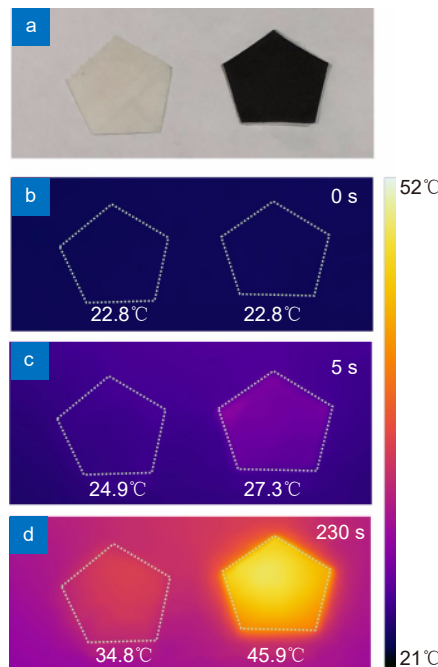


图 5 PVDF 与结构化的 G@PVDF 红外光热对比图。

(a) PVDF 与结构化的 G@PVDF 光学照片; (b) 0 s, (c) 5 s, (d) 230 s 的红外光热对比图像

Fig. 5 Infrared photothermal images of PVDF and structured G@PVDF.

(a) Optical photo of PVDF and structured G@PVDF; (b) 0 s, (c) 5 s, and (d) 230 s photothermal contrast image with the light irradiation

为液滴与熔融的石蜡的接触状态, 接触角进一步降低至分别为 81°以及 73°(图 6(d), 6(e)), 并且测得其滑动角约为 10°。

### 3.4 光/电控液滴

我们进行了光/电控液滴的实物展示, 如图 7 所示。

制备好的超滑表面以倾斜角约为 20°的角度放置在桌面上, 将大约 10 μL 的液滴滴在表面。将光源打开, 光源的功率大约为 1300 mW/m<sup>2</sup>, 石蜡融化液滴滑动至样品底部。光源关闭时, 我们在表面上放置一

滴牛奶(图 7(a)), 牛奶液滴在表面静止, 施加光照后牛奶液滴慢慢滑动至底部(图 7(b)~7(d)), 并且表面并无液体残留。因此, 该表面有良好的斥液性, 并且我们能够通过操控光源开关来操控液滴滑动状态。

在实际应用中有可能存在并无外界光源激励的情况, 此时超滑表面能够同时具有多种激励场的刺激响应性就显得格外重要。由于石蜡是热相变材料, 通过电压激励下产生的焦耳热来实现石蜡相变进而操控液滴滑动也同样具备可行性。但是对于电控液滴, 由于

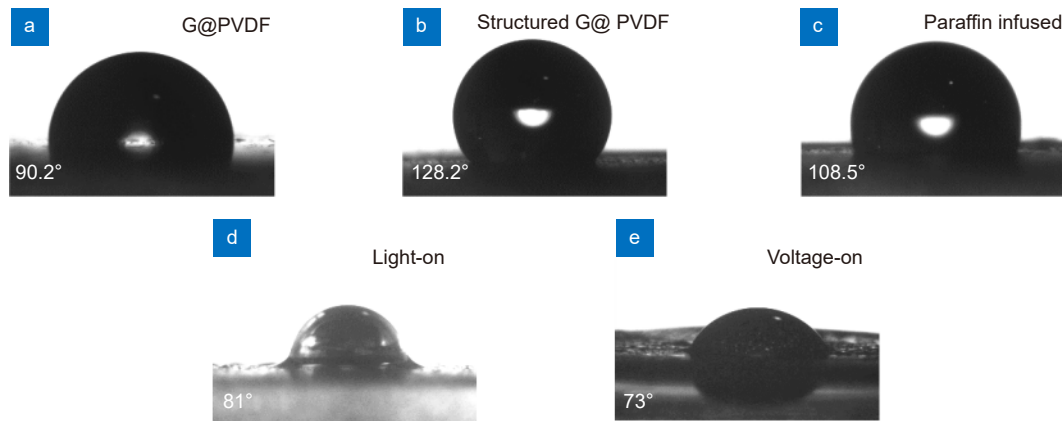


图 6 浸润性的测试。

(a) G@PVDF; (b) 结构化的 G@PVDF; (c) 热旋涂石蜡后的表面;  
(d) 光激励下结构化的 G@PVDF 接触角; (e) 电激励下结构化的 G@PVDF 接触角

Fig. 6 The test of wettability.

The contact angles of (a) G@PVDF; (b) Structured G@PVDF; (c) Paraffin-infused structured G@PVDF surface after thermal-spin-coating; (d) Paraffin-infused structured G@PVDF under light irradiation; (e) Paraffin-infused structured G@PVDF under voltage on

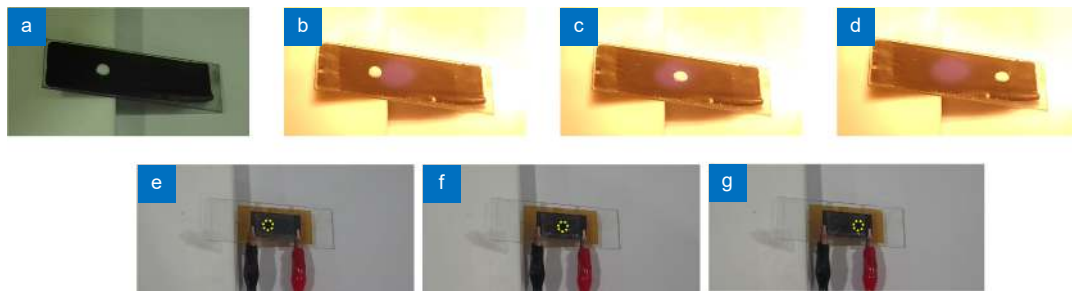


图 7 光/电控超滑表面的实物展示。

(a) 关灯时牛奶液滴“钉”在表面; (b) 开灯; (c) 牛奶液滴滑动到中央;  
(d) 牛奶液滴滑动到底部; (e) 施加电压; (f) 液滴滑动到中央; (g) 液滴滑动到底部

Fig. 7 Display of light/voltage-controlled SLIPS.

(a) The milk droplet is "pinned" on the surface when the light is off; (b) The light is on; (c) The milk droplet slides to the center; (d) The milk droplet slides to the bottom; (e) Voltage on; (f) The droplet slides to the center; (g) The droplet slides to the bottom

结构化的 G@PVDF 薄膜电阻很大, 需要在两端施加极大的电压, 这并不适用于普通情况。因此, 我们额外利用 LIG 作为底部热源, 激光诱导出的 LIG 薄膜导电性大幅度提升, 表面相对平整, 可作为超滑表面底部的焦耳热热源。具体将 PI 胶带放置于加工台上, 利用扫描间距 10  $\mu\text{m}$ 、重复频率 30 kHz、加工速率 10 mm/s、加工功率约 900 mW 的紫外激光器进行激光诱导加工。然后对 LIG 两端施加大约为 10 V 的电压, 产生的热量同样足以使石蜡升温融化, 达到预期效果。我们在超滑表面上放置一滴水并施加电压 (图 7(e)), 液滴经历几秒后开始滑动至底部 (图 7(f)~7(g)), 且表面无液体残留。因此, 我们不仅可以通过外界光场, 还能通过施加电压来控制液滴滑动。

## 4 结论

激光在 G@PVDF 表面烧蚀出网格状的沟槽结构, 经过热旋涂将相变材料石蜡注入沟槽中, 通过一定距离的光源的开关状态或外界电压的开闭使石蜡融化或凝固, 液滴与表面间的界面状态由粗糙的气/液/固状态转变为光滑的气/液/润滑剂/固状态, 界面状态的切换使得液滴由钉住到滑动, 实现了对液滴的可控操纵。研究通过光控的超滑表面来对液滴行为进行控制, 对于生物医疗、微流控器件等领域有着重要意义。

## 参考文献

[1] Chen H W, Zhang P F, Zhang L W, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J].

- Nature*, 2016, **532**(7597): 85–89.
- [2] Li C X, Yu C L, Zhou S, et al. Liquid harvesting and transport on multiscaled curvatures[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, **117**(38): 23436–23442.
- [3] Yao X, Hu Y H, Grinthal A, et al. Adaptive fluid-infused porous films with tunable transparency and wettability[J]. *Nat Mater*, 2013, **12**(6): 529–534.
- [4] Lv P, Zhang Y L, Han D D, et al. Directional droplet transport on functional surfaces with superwettabilities[J]. *Adv Mater Interf*, 2021, **8**(12): 2100043.
- [5] Zhang X X, Sun L Y, Wang Y, et al. Multibioinspired slippery surfaces with wettable bump arrays for droplets pumping[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, **116**(42): 20863–20868.
- [6] Lv X D, Jiao Y L, Wu S Z, et al. Anisotropic sliding of underwater bubbles on microgrooved slippery surfaces by one-step femtosecond laser scanning[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, **11**(22): 20574–20580.
- [7] Wong T S, Kang S H, Tang S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, **477**(7365): 443–447.
- [8] Chen C, Huang Z C, Jiao Y L, et al. *In situ* reversible control between sliding and pinning for diverse liquids under ultra-low voltage[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(5): 5742–5752.
- [9] Fang Y, Liang J, Bai X, et al. Magnetically controllable isotropic/anisotropic slippery surface for flexible droplet manipulation[J]. *Langmuir*, 2020, **36**(50): 15403–15409.
- [10] Wang J, Gao W, Zhang H, et al. Programmable wettability on photocontrolled graphene film[J]. *Sci Adv*, 2018, **4**(9): eaat7392.
- [11] Han B, Zhang Y L, Chen Q D, et al. Carbon-based photothermal actuators[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, **28**(40): 1802235.
- [12] Zhang Y L, Li J C, Zhou H, et al. Electro-responsive actuators based on graphene[J]. *Innovation*, 2021, **2**(4): 100168.
- [13] Wang J N, Liu Y Q, Zhang Y L, et al. Wearable superhydrophobic elastomer skin with switchable wettability[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, **28**(23): 1800625.
- [14] Huang Z C, Chen C, Wang X H, et al. Light-driven locomotion of underwater bubbles on ultrarobust paraffin-impregnated laser-ablated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-doped slippery surfaces[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(7): 9272–9280.
- [15] Jiao Y L, Lv X D, Zhang Y Y, et al. Pitcher plant-bioinspired bubble slippery surface fabricated by femtosecond laser for buoyancy-driven bubble self-transport and efficient gas capture[J]. *Nanoscale*, 2019, **11**(3): 1370–1378.
- [16] Hu Z, Huang X J, Yang Z W, et al. Reversible 3D optical data storage and information encryption in photo-modulated transparent glass medium[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 140.
- [17] Liu H G, Lin W X, Hong M H. Hybrid laser precision engineering of transparent hard materials: challenges, solutions and applications[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 162.
- [18] Li Z Z, Wang L, Fan H, et al. O-FIB: far-field-induced near-field breakdown for direct nanowriting in an atmospheric environment[J]. *Light Sci Appl*, 2020, **9**(1): 41.
- [19] Sun Y L, Dong W F, Yang R Z, et al. Dynamically tunable protein microlenses[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2012, **51**(7): 1558–1562.
- [20] Zhu Y L, Xie X Z, Huang Q P, et al. Femtosecond green laser processing of magnesium alloy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(8): 180672.  
朱裔良, 谢小柱, 黄庆澎, 等. 飞秒绿激光加工镁合金的研究[J]. *光电工程*, 2019, **46**(8): 180672.
- [21] Jia Y C, Wang S X, Chen F. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: fabrication and application[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(10): 190042.
- [22] Livakas N, Skoulas E, Stratakis E. Omnidirectional iridescence via cylindrically-polarized femtosecond laser processing[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(5): 190035.
- [23] Wan Z F, Chen X, Gu M. Laser scribed graphene for supercapacitors[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(7): 200079.
- [24] Zhao Y Z, Su Y L, Hou X Y, et al. Directional sliding of water: biomimetic snake scale surfaces[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(4): 210008.
- [25] Zhao Y, Yang Y M, Sun H B. Nonlinear meta-optics towards applications[J]. *Photonix*, 2021, **2**(1): 3.
- [26] Wang H, Zhang Y L, Han D D, et al. Laser fabrication of modular superhydrophobic chips for reconfigurable assembly and self-propelled droplet manipulation[J]. *Photonix*, 2021, **2**(1): 17.
- [27] Fang H H, Ding R, Lu S Y, et al. Distributed feedback lasers based on thiophene/phenylene Co-oligomer single crystals[J]. *Adv Funct Mater*, 2012, **22**(1): 33–38.
- [28] Jin Y, Feng J, Zhang X L, et al. Solving efficiency-stability tradeoff in top-emitting organic light-emitting devices by employing periodically corrugated metallic cathode[J]. *Adv Mater*, 2012, **24**(9): 1187–1191.
- [29] Nie S L, Guan Y C. Review of UV laser and its applications in micromachining[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(12): 1169–1179.  
聂世琳, 管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(12): 1169–1179.
- [30] Yang H, Cao Y, Li F P, et al. Research progress in superhydrophobic surfaces fabricated by laser[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(12): 1160–1168.  
杨焕, 曹宇, 李峰平, 等. 激光制备超疏水表面研究进展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(12): 1160–1168.
- [31] Zhang C Y, Zhou W, Geng D, et al. Laser direct writing and characterizations of flexible piezoresistive sensors with microstructures[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(4): 200061.
- [32] Bi Y G, Feng J, Li Y F, et al. Broadband light extraction from white organic light-emitting devices by employing corrugated metallic electrodes with dual periodicity[J]. *Adv Mater*, 2013, **25**(48): 6969–6974.
- [33] Liu Y S, Feng J, Ou X L, et al. Ultrasoft, highly conductive and transparent PEDOT: PSS/silver nanowire composite electrode for flexible organic light-emitting devices[J]. *Org Electron*, 2016, **31**: 247–252.
- [34] Jiao Z Z, Li J C, Chen Z D, et al. Research progress on laser processing of antireflection surfaces[J]. *Chin J Lasers*, 2021, **48**(2): 0202011.  
矫知真, 李纪超, 陈招弟, 等. 激光加工减反射表面研究进展[J]. *中国激光*, 2021, **48**(2): 0202011.



## 作者简介



矫知真 (1995-), 女, 博士生, 激光仿生制造。  
E-mail: jiaozz19@mails.jlu.edu.cn



韩星尘 (1996-), 男, 硕士生, 电子器件的激光制造。  
E-mail: hanxc21@mails.jlu.edu.cn



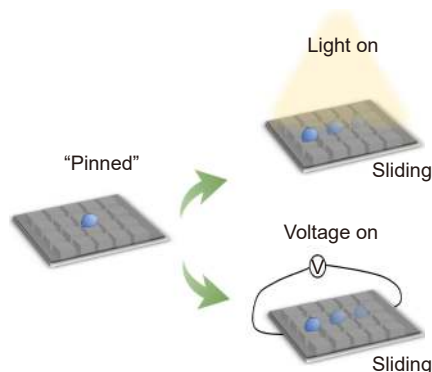
周昊 (1999-), 男, 硕士生, 电子器件的激光制造。  
E-mail: zhouhao21@mails.jlu.edu.cn



【通信作者】韩冬冬 (1990-), 男, 博士, 副教授, 柔性机电一体化的激光加工技术。  
E-mail: handongdong@jlu.edu.cn

# Laser fabrication of light/voltage-responsive slippery liquid-infused porous substrate (SLIPS)

Jiao Zhizhen<sup>1</sup>, Han Xingchen<sup>1</sup>, Zhou Hao<sup>1</sup>, Han Dongdong<sup>1,2\*</sup>



Light/voltage-responsive slippery liquid-infused porous substrate (SLIPS)

**Overview:** A slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) inspired by nepenthes plays a significant effect in anti-adhesion, drag reduction, and droplet/bubble transportation etc. The SLIPS is constructed by infusing low surface energy lubricating liquid into the porous substrate. On the one hand, the porous substrate can firmly lock the lubricating liquid within the porous network. On the other hand, the lubricating liquid can dynamically flow in the porous substrate. Therefore, SLIPS shows the advantage of repelling complex liquids (blood, crude oil, etc.), self-healing, and high-pressure resistance, etc. For the intelligent responsive SLIPS, stimulus-response substances are added to the porous substrate, and then the surface wettability can be switched by external stimuli such as electric field, light, etc. Since droplets can be manipulated more precisely, the intelligent responsive SLIPS has broader prospects. In this study, graphene was added to the PVDF solution and thermal drying was performed to form a membrane. This leads to the obvious improvement of light absorption and photothermal conversion compared to that of the membrane without graphene. Then, a UV laser was used to ablate the graphene/polyvinylidene fluoride (G@PVDF) composite film surface for fabricating the grid-like grooves. Then paraffin was poured into the grooves by a thermal spin-coating method to well fill the grooves. In this process, the paraffin was melted or solidified by switching ON and OFF states of the light source, realizing the non-contact controllable manipulation of the droplet. When there is no light, there is a solid-liquid interface between the droplet and surface, and the droplet is "pinned" on the surface. As graphene has excellent light-to-heat conversion ability, the heat is enough to make the phase-change material paraffin melt when the light is on. The interface state between the water droplet and surface changes from the friction gas-liquid-solid interface to a smooth gas-liquid-lubricant-solid interface. The droplet can easily slide at an inclination angle of about  $10^\circ$  without leaving any residues. Alternatively, we employed laser-induced graphene (LIG) on a polyimide film as a heat source, and attached the SLIPS on the LIG. By applying voltage on LIG, it is also able to dynamically control the states of droplets. This kind of light/voltage-controlled SLIPS to control droplet behaviors is of great significance in anti-adhesion, biomedical, microfluidic devices, and other fields.

Jiao Z Z, Han X C, Zhou H, et al. Laser fabrication of light/voltage-responsive slippery liquid-infused porous substrate (SLIPS)[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(2): 210356; DOI: [10.12086/oe.2022.210356](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210356)

Foundation item: Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing of CARDC (IADL20210404), National Natural Science Foundation of China (61905087), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020-JCXX-18)

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics College, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China

\* E-mail: [handongdong@jlu.edu.cn](mailto:handongdong@jlu.edu.cn)