第2章3

这是以下章节的预印本：M. Mezera、C. Florian、G.-w. Römer、J. Krüger、J. Bonse，《通过纳米结构化创造材料功能》，发表于《超快激光纳米结构化——极限尺度的探索》，R. Stoian 和 J. Bonse 编，2023 年，施普林格自然瑞士股份公司；经施普林格自然瑞士股份公司许可转载。最终认证版本可在线查阅：https://doi.org/10.1007/978-3-031-14752-4_23

C通过纳米结构化创造材料功能 ng

Marek Mezera[1], Camilo Florian[2], Gert-willem Römer[3], Jörg Krüger[1], Jörn Bonse[1,*]

[1] 德国联邦材料研究与测试研究所（BAM），Unter den Eichen 87，12205 柏林，德国

[2] 普林斯顿大学材料研究与技术研究所（PRISM），美国普林斯顿

[3] 激光加工讲席，固体、表面与系统力学系（MS[3]），特温特大学，7500 AE，恩斯赫德，荷兰

电子邮箱：camilofb1@gmail.com；g.r.b.e.romer@utwente.nl；joerg.krueger@bam.de；joern.bonse@bam.de

*通讯作者

摘要

表面纳米结构能够通过调控其形貌以及其他化学和物理材料性能，创造并定制表面功能。表面功能化的一项颇具吸引力的技术是微纳结构化激光加工。该技术既可通过紧密聚焦的激光束直接塑造受照材料的轮廓来实现，也可采用自组织方式，利用较大直径的激光束进行面扫描，从而形成多种激光诱导周期性表面结构（LIPSS）。对于后一种方法，超短脉冲激光器近年来突破了长期以来对可实现最小特征尺寸的限制，同时进一步缩短了生产时间。本章综述了近期研究的 LIPSS 丰富应用，例如通过形成衍射或等离激元结构色、调控液体及表面润湿性能、实现生物医学和仿生功能、在摩擦学中发挥有益作用以减少摩擦和磨损、调控光伏器件中的光散射与吸收，或在其他能源应用中调控磁性或超导表面性能。本文还详细探讨了基于 LIPSS 技术的发展现状，特别是产业化进程，并分析了市场及相关的 LIPSS 生产成本。

关键词：激光诱导周期性表面结构（LIPSS）；表面功能化；纳米结构；微结构；激光加工；仿生表面；表面润湿

1. 引言：激光诱导周期性表面结构 – 激光诱导周期性表面结构

1.1 LIPSS 的形貌学 1.2 LIPSS 的物理和化学性质

2. 激光诱导周期性表面结构的应用

2.1 光学应用 2.2 液体管理与表面润湿 2.3 生物学应用 2.4 摩擦学应用 2.5 能源应用 2.6 其他技术应用

3. 产业化

3.1 市场分析 3.2 生产成本 3.3 专利状况

4. 展望

1. 简介：激光诱导周期性表面结构– 激光诱导周期性表面结构

激光诱导周期性表面结构（LIPSS）于五十多年前首次被报道 [Birnbaum, 1965]。早在其研究初期，人们就已明确认识到，LIPSS 是一种普遍现象，当强相干激光辐射与固体表面相互作用时便会产生这种现象 [van Driel, 1982]。根据激光辐射的偏振态（线偏振、圆偏振、径向偏振、携带角动量的矢量态等），形成的 LIPSS 可以呈现出截然不同的表面形貌和几何特征，例如空间周期、调制深度、纵横比、取向等（有关 LIPSS 的详细分类，请参见下文第 1.1 节）。

在过去几十年里，激光诱导周期性表面结构这一研究主题已发展成为经久不衰的科学课题 [Bonse,2017]。20世纪80年代，关于激光诱导周期性表面结构的基础理论得到了成功发展[Sipe, 1983], ，但激光诱导周期性表面结构这一现象本身更多被视为一种新奇现象，最终并未进入实际应用领域。后来，大约从千禧年前后开始，随着研究实验室中超短脉冲激光系统日益普及，这一研究主题再次焕发活力。从那时起，大量科学研究再次聚焦于激光诱导周期性表面结构的基本形成机制，尤其是由飞秒激光脉冲产生的结构。在这种情况下，使材料进入强激发态的固体能量沉积阶段，与随后的物质重组阶段在时间上明显分离。关于激光诱导周期性表面结构起源的详细综述文章，读者可参阅 [Siegman, 1986 / Bonse, 2012 / Vorobyev，2013 / Buividas, 2014 / Abere, 2016 / Bonse, 2017 / Bonse, 2020a / Bonse, 2021] ，以及本书第 1 章（Derrien 等人）、第 2 章（Ivanov 等人）和第 5 章（Rudenko 等人）。此外，在过去五到十年间，研究人员对激光诱导周期性表面结构的潜在应用进行了系统筛查 [Vorobyev，2013 / Liu, 2019 / Florian, 2020 / Gräf, 2020 / Bonse, 2020年b / Stratakis, 2020 / Bonse, 2021], ，结果显示，激光诱导周期性表面结构在科学和实际应用方面具有诸多不同用途。

以下章节旨在全面综述通过 LIPSS 可构建的各种不同表面功能化。这些特定的表面功能最终可应用于光学、流体学、医学、摩擦学、节能等诸多领域。

1.1 LIPSS 的形貌学

本节介绍各种不同类型的自组织激光诱导表面结构，并结合文献中现有的术语，对 LIPSS 进行系统而严格的分类。我们尤其关注低空间频率激光诱导周期性表面结构（LSFL）、高空间频率激光诱导周期性表面结构（HSFL）和三角形纳米柱（TNP），并解释如何将这些亚波长结构与超波长沟槽以及更不规则的尖刺结构区分开来。

根据激光加工策略（“点加工”与对线条或更大区域进行“扫描加工”）以及具体的激光辐照参数（能量通量、脉冲数、空间光束轮廓等），可能会观察到单一类型的激光诱导周期性表面结构，或彼此分隔的

不同激光诱导周期性表面结构的区域，甚至多种混合类型的激光诱导周期性表面结构或分级表面结构同时出现[Bonse，2021]。

严格分类而言，激光诱导周期性表面结构（LIPSS）表现为一维或有时为二维准周期性光栅结构，通常根据其空间周期 Λ （相对于辐照波长 λ）、与激光束偏振（线偏振、圆偏振等）的关系，以及深度与周期之比的纵横比 A 进行分类。

低空间频率激光诱导周期性表面结构（LSFL）

历史上最早于1965年由Birnbaum[Birnbaum, 1965] 观察到的最显著的激光诱导周期性表面结构类型是低空间频率激光诱导周期性表面结构。对于垂直入射到固体表面的辐射（入射角 θ = 0°），低空间频率激光诱导周期性表面结构的周期通常接近或略小于用于形成它们的激光辐照波长 λ（$\lambda/2 \leq \Lambda_{LSFL} \leq \lambda$），且纵横比 A 通常为 < 1。这些结构通常在烧蚀状态下形成，其能量通量水平最高可达烧蚀阈值的数倍（取决于材料），不过也有关于熔化诱导型或氧化型低空间频率激光诱导周期性表面结构的报道 [Bonse, 2017]。对于金属或半导体等强吸收材料，低空间频率激光诱导周期性表面结构通常垂直于线偏振激光束的偏振方向（低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型）；而对于弱吸收的宽带隙介电材料，它们通常与偏振方向平行（低空间频率激光诱导周期性表面结构 II 型）。请注意，使用罗马字母（-I/-II）对不同类型的激光诱导周期性表面结构进行编号，遵循的是历史上的观察顺序。

两类激光诱导周期性表面结构的差异源于其形成过程中所涉及的不同相干光散射机制。低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型源自所谓的表面电磁波（SEWs）的激发 [Akhmanov，1985年 / Bonch-Bruevich，1992], ，例如表面等离激元（SPPs），以及其电磁场与入射激光束本身发生的光学干涉，从而形成局部沉积光能空间调制的图案，并最终转化为具有周期性起伏的表面形貌[Bonse，2009年 / Bonse，2020a]。对于 p偏振激光辐射，表面光栅起伏随后呈现出接近波长的空间周期（$\Lambda_{LSFL\text{-}I,\ p} \sim \lambda/[1 \pm \sin(\theta)]$）。相比之下，对于电介质，低空间频率激光诱导周期性表面结构 II 型在表面以下数百纳米处形成种子，其源于入射（传播中的）激光辐射与在表面粗糙度处发生相干散射的光之间的干涉（通过向远场区域传播的辐射场）[Rudenko，2017]。通过多次激光脉冲辐照以及材料中的孵化效应（脉冲间反馈），一旦覆盖在近表面的材料通过烧蚀被去除，低空间频率激光诱导周期性表面结构 II 型的特征便会在表面显现（$\Lambda_{LSFL\text{-}II} \sim \lambda/\{n[1 \pm \sin(\theta)]\}$，其中 n 为电介质的（实数）折射率 [Siegman，1986]）。

图 1 展示了在空气环境中对铌金属片进行飞秒激光脉冲扫描辐照后，在其表面形成的低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型 [790 nm、30 fs、1 kHz、[Cubero, 2020a]]。图 1(a) 显示了加工后激光诱导周期性表面结构的表面横截面切片的扫描透射电子显微图（STEM）。可以观察到，低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型近似呈正弦形，周期为 ~570 nm，调制深度为 ~300 nm。请注意，一条精细边界（由五个白色箭头标出）将激光影响区与下方未受影响的多晶铌块体材料分隔开来。据推测，在飞秒激光扫描加工过程中，铌表面熔化至该边界处，从而在此形成厚度为 40 至 300 nm 的再凝固表层 [Cubero, 2020a]。图 1(b) 显示了相应的低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型俯视扫描电子显微图。

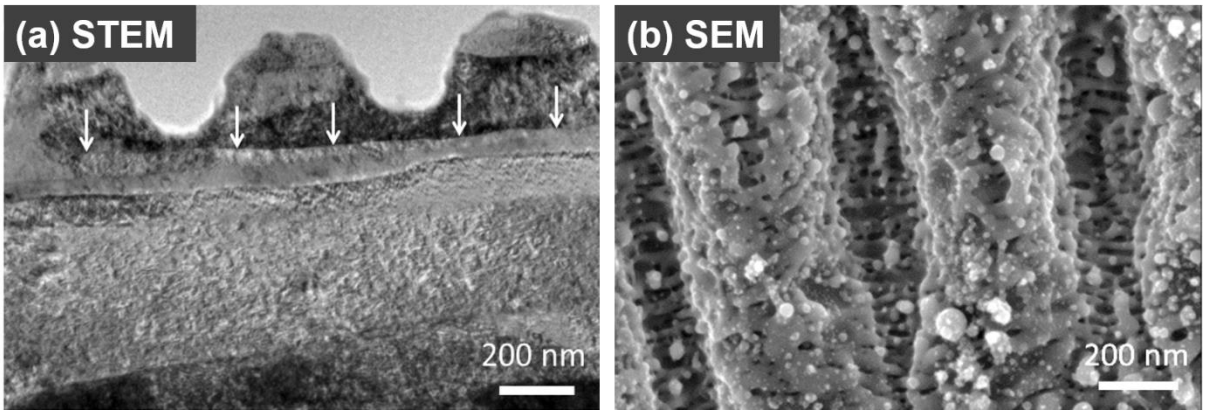


图 1：（a）多晶铌上低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型的横截面表面轮廓的扫描透射电子显微镜显微图[790纳米，30 飞秒，1 赫兹]。（b）相应表面结构的俯视扫描电子显微镜显微图。（a）中的白色箭头标示激光影响区与未受影响的块体材料之间的边界。（转载并改编自[Cubero, 2020a], Cubero 等，《飞秒激光诱导周期性纳米结构改变铌片的表面超导性》，《纳米材料》（瑞士巴塞尔）**10**：2025，版权所有 2020，采用知识共享署名 4.0 许可协议。取自https://doi.org/10.3390/nano10122525）。

高空间频率激光诱导周期性表面结构（HSFL）

高空间频率激光诱导周期性表面结构的周期通常小于辐照波长的一半（$\Lambda_{HSFL} < \lambda/2$），其取向平行或垂直于激光束偏振方向（取决于材料）。它们形成于非常接近受辐照材料损伤阈值的能量通量下，且主要出现在飞秒至皮秒范围的超短脉冲持续时间条件下。通常可区分为两种类型。

高空间频率激光诱导周期性表面结构-I 主要在透明材料（电介质和半导体）上观察到。它们由非常狭窄的周期性沟槽组成，单个沟槽的宽度仅为几十纳米，而深度可达数百纳米。鉴于其较大的纵横比 A > 1，一些作者将这些纳米结构称为“深-亚波长波纹/结构”。对于（半）透明材料，在激光辐射正入射的情况下，高空间频率激光诱导周期性表面结构-I 通常表现出 $\Lambda_{HSFL\text{-}I} \sim \lambda/(2n)$ 的空间周期，其中 n 为材料的折射率。高空间频率激光诱导周期性表面结构-I 源于入射（传播）激光辐射与在纳米尺度表面起伏处相干近场散射的光之间的近（亚）表面干涉（通过局限于散射中心近场区域内的非辐射场）[Rudenko，2017]。

图 2 展示了高空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型（b、c）较大的深度与周期之比 A。它们形成于激光诱导周期性表面结构 I 型覆盖的烧蚀坑（a）边缘；该烧蚀坑位于碳化硅（SiC）晶体表面，是在空气中经飞秒激光脉冲点加工后形成的：[800 nm、150 fs、50 Hz，[Tomita，2009]]。

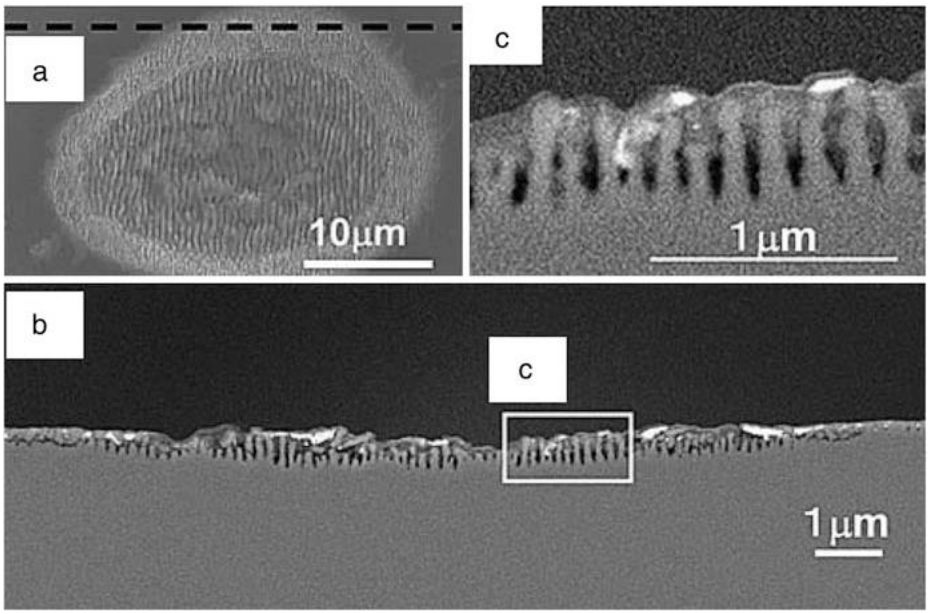


图 2：（a）SiC 上低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型（中心）和高空间频率激光诱导周期性表面结构-I（边缘）的俯视扫描电子显微镜图像。黑色虚线标示了获取横截面轮廓（b、c）的位置 [800 纳米，150 飞秒，50 Hz]。（b）整个辐照斑点的横截面扫描电子显微镜显微图。（c）对（b）中标记区域（c）的局部放大图。引自 [Tomita，2009]。（经施普林格出版社许可转载：《应用物理 A》97：271–276（硅、碳化硅和高定向热解石墨上波纹的横截面形貌轮廓，Tomita, T. 等人），版权所有（2009年）。）

相比之下，高空间频率激光诱导周期性表面结构-II 的深度仅为几十纳米，空间周期为 ~100 nm 量级。因此，所得纵横比远小于 1（A << 1）。这些浅表结构常见于金属表面，人们提出了多种形成机制，包括表面氧化或孪晶效应。

根据三项观察结果——两种高空间频率激光诱导周期性表面结构主要在超短激光脉冲辐照下形成，与线偏振激光束的方向密切相关，且周期下限为几十纳米 (这是由于热扩散效应在电子-声子弛豫阶段抹平了过小的空间调制）——研究者得出结论：超快能量沉积主导了其形成过程 [Bonse，2017]。然而，对于高空间频率激光诱导周期性表面结构-II，近期的三维时域有限差分法（FDTD）数值计算[Skolski，2012] 结合纳维-斯托克斯方程的数值求解表明，相干电磁散射以及随后的热弹性和流体动力学效应之间存在复杂的相互作用；这一切均由固体受到强烈超快激光激发所触发 [Rudenko，2020]（另见第 5 章（Rudenko 等人））。

三角形纳米柱（三角形纳米柱）

自2018年起，多个研究团队报告了一种具有特征性的表面形貌：在特定激光加工条件下，采用扫描加工构型，以超短激光脉冲辐照不同金属 [Romano, 2018 / Liu, 2018a / Fraggelakis, 2018 / van der Poel, 2019, Mezera, 2020]。这些表面结构以纳米级三角形纳米柱为构建单元，组成六角排列的超构单元，最终在激光加工表面形成大面积二维光栅。因此，这类激光诱导周期性表面结构（LIPSS）被称为“三角形纳米柱”（TNP），或称“六角排列的纳米三角形”，在相关

文献中如此称呼。Romano 等人[Romano, 2018] 采用高重复频率（1032 nm，310 fs，250 kHz）的多个圆偏振飞秒激光脉冲，在不锈钢上制备了TNP；Liu 等人[Liu, 2018a] 则报告了在钨表面形成TNP的情况：他们采用低重复频率（800 nm，50 fs，1 kHz）的双飞秒脉冲辐照，使用交叉偏振线偏振，脉冲间延迟为 ~1 ps，并采用柱面透镜聚焦。Fraggelakis 等人[Fraggelakis, 2019] 采用高重复频率（1030 nm，350 fs，100 kHz）的双飞秒脉冲进行加工，使用圆偏振反向旋转偏振，脉冲间延迟最长达数纳秒，并采用球面透镜聚焦。随后，van der Poel 等人[van der Poel, 2019]采用多个圆偏振皮秒激光脉冲（1030 nm，6.7 ps，400 kHz），在钴–铬–钼–合金（CoCrMo）上制备了这些TNP。图3展示了该研究中的一个实例，其中给出了两幅以不同放大倍数拍摄的俯视扫描电子显微镜显微图像（a、b）。图3(c)是图（a）所示显微图的二维快速傅里叶变换（二维快速傅里叶变换），呈现了变换图像中所含空间频率的二维直方图（图谱）。图3(c)中显著峰值的特征排列反映了三角纳米结构光栅的六方对称性，而这些峰的位置表明，此处在多个方向上测得的空间周期非常相近，为Λ_{TNP} ~860 nm。

TNP 的物理起源目前在科学界引发了热烈讨论。由于在相同材料上形成时，其空间周期与低空间频率激光诱导周期性表面结构 I 型的空间周期非常接近（$\Lambda_{TNP} \approx \Lambda_{LSFL\text{-}I}$），因此有理由采用基于表面等离激元极化激元的形成机制来解释 [Liu, 2018a / Makin, 2020 / Zhang, 2020]。此外，有人提出非线性流体动力学对流机制可能与其形成有关 [Fraggelakis, 2019]。（另见第 5 章（Rudenko 等人）。）

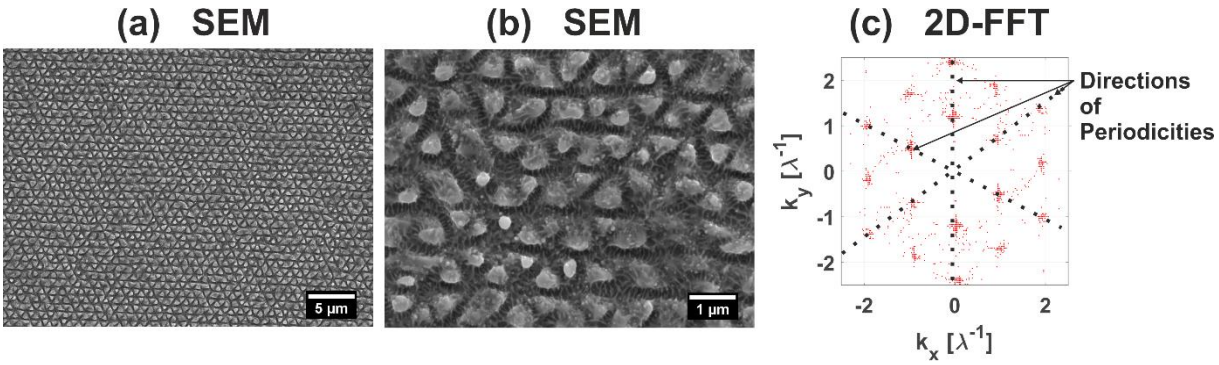


图 3：（a、b）在钴铬钼合金上通过圆偏振皮秒激光脉冲扫描加工形成的三角纳米结构俯视扫描电子显微镜显微图像 [1030 纳米，6.7 皮秒，400 千赫兹]。（c）图（a）所示显微图的二维快速傅里叶变换，显示三角纳米结构排列呈六方对称性，空间周期为 Λ_{TNP} ~ 860 纳米。（改编并转载自 [van der Poel, van der Poel 等人，《在医用级钴铬钼上制备激光诱导周期性表面结构：摩擦学、润湿和浸出性能》，《润滑剂》（瑞士巴塞尔）–铬–钼：《润滑剂》（瑞士巴塞尔）7:70，版权 2019年，采用知识共享署名 4.0 许可协议。检索自 https://doi.org/10.3390/lubricants7080070 ）。

激光生成的表面结构分类

图4将各种不同的激光生成的表面结构归纳在一个示意图中。激光诱导周期性表面结构这一分支已在前文各小节中详细讨论。除了激光诱导周期性表面结构外，还观察到了超波长沟槽（$\Lambda_{Grooves} > \lambda$），其取向通常平行于激光束偏振，周期为数微米。对于不规则尖刺，则观察到了尺寸更大的结构

形貌（有时也称为微锥），其与偏振的相关性很弱，“周期”可达数十微米（$\Lambda_{Spikes} >> \lambda$）。

图 4 下方的箭头标示了形成不同表面纳米与微米结构所需的激光能量密度和激光脉冲数的一般要求。有关沟槽和尖刺具体形成机制的详细讨论，请参阅专业文献 [Stratakis, 2020 / Bonse, 2020a / Mezera, 2020 / Nivas, 2021]。

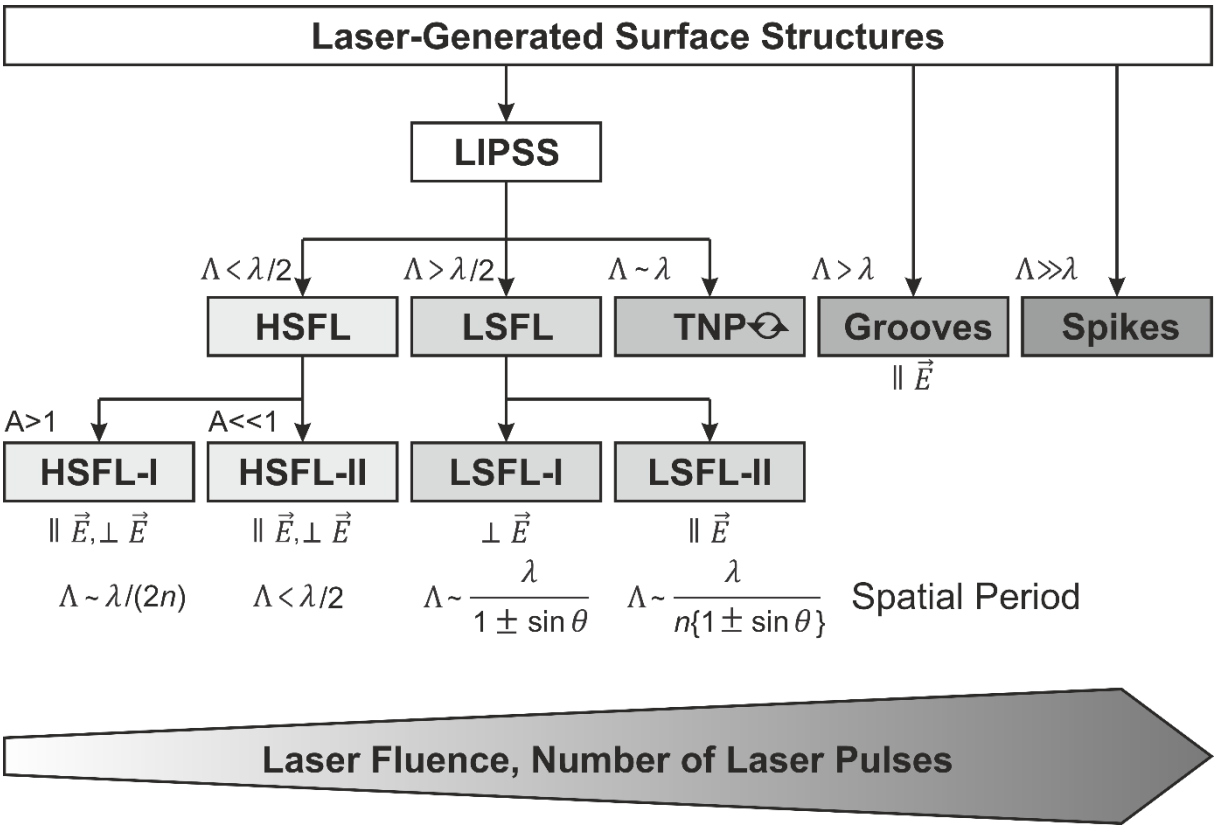


图 4：激光生成的表面结构分类。改编自 [Mezera, 2020]。

1.2 LIPSS 的物理和化学性质

本节讨论可通过激光诱导周期性表面结构加以改变和调控、从而形成特定表面功能的表面物理和化学性质。图 5 总结了下文两个小节“物理性质”和“化学性质”将详细讨论的不同性质。

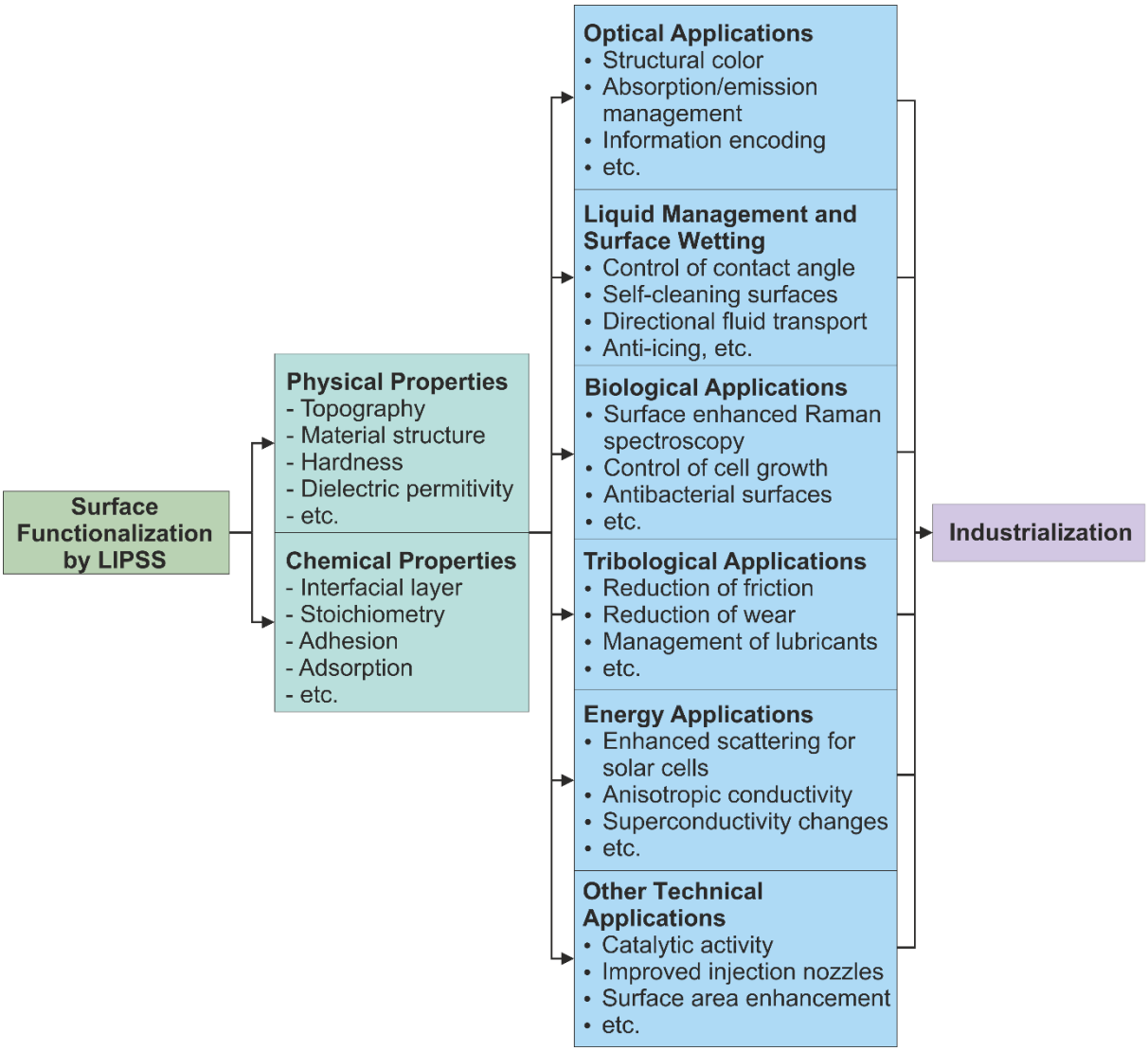


图 5：受激光诱导周期性表面结构影响的性能及其在表面功能化中的应用示意图，为本章提供了框架。灵感来源于 [Florian, 2020a]。

物理性质

激光诱导周期性表面结构能够形成各种特定的表面物理性质。最显著的一种是具有特征性的光栅状表面形貌，它描述了样品材料与周围环境之间的界面。激光诱导周期性表面结构的形成包含一系列复杂阶段：首先，固体中的电子吸收能量，引发光学材料激发；随后，能量从电子传递至固体晶格，并接着发生一系列弛豫过程，例如熔化、烧蚀、以非晶态或晶态凝固等。[Bäuerle, 2011 / Bonse, 2020a], 由此可见，通过激光加工形成激光诱导周期性表面结构，也能够改变材料结构性质。因此，例如材料硬度[Bonse, 2018], 介电常数[Hwang, 2010], 电导率 [Lopez-Santos, 2021], 表面超导性[Cubero, 2020a], 等性能都可以通过激光诱导周期性表面结构的存在而在局部得到调控，并在摩擦学、光子学或电子学领域展现出特定应用[Florian, 2020a / Gräf, 2020 / Bonse, 2021]。

化学性质

除了物理性质发生变化外，激光诱导周期性表面结构的形成通常还伴随着表面化学变化，尤其是在空气环境中进行激光加工时——对于大面积或工业级激光加工而言，这是一项迫切的要求。最常见的变化是表面氧化，因为在空气这种活性气氛中加工激光诱导周期性表面结构时，会达到很高的瞬态温度 [Kirner, 2017a / Kirner, 2018 / Florian, 2020b / Florian, 2020c]。因此，受辐照材料的化学组成可能会在界面表层发生变化。

除了材料本身的化学计量比变化外，激光诱导周期性表面结构还可能带来其他与形貌和粗糙度相关的效应：其增大的表面积使得烃类等分子能够从周围环境中吸附到表面上 [Kietzig, 2009 / Yasumaru, 2017 / Gregorčič, 2021]。通过这种“老化”效应，表面甚至可能从最初的亲水状态转变为超疏水状态，而表面形貌并未发生显著变化。对于许多生物医学或医疗保健应用，这类形貌和表面润湿效应对于特定生物细胞的可控黏附（排斥或促进黏附）尤为重要，甚至有助于防止细菌生物膜的形成 [Larrañaga-Altuna, 2021 / Zheng, 2021]。另一方面，激光诱导周期性表面结构增大的总表面积有助于提高催化化学反应的效率 [Lange, 2017]。

基于上述各种效应，可以确定不同的表面功能化领域，并将在下文第 2 章“LIPSS 的应用”中讨论，包括光学应用（第 2.1 节）、液体管理与表面润湿（第 2.2 节）、生物学应用（第 2.3 节）、摩擦学应用（第 2.4 节）、能源应用（第 2.5 节）以及其他应用（第 2.6 节）。最后，第 3 章将分析激光诱导周期性表面结构的当前产业化状况，并介绍市场分析（第 3.1 节）、生产成本的一些定量估算（第 3.2 节），以及对激光诱导周期性表面结构相关专利现状的汇总（第 3.3 节）。

2. LIPSS 的应用

如上一章所述，激光诱导周期性表面结构具有一些非常独特的固有性能，可用于创造和调控迥然不同的表面功能。其中大多数最终都归因于激光诱导周期性表面结构的形貌特征，或其形成过程中（甚至形成之后）涉及的特定表面化学性质。这些表面功能催生了多种应用，而这些应用早已在激光诱导周期性表面结构领域得到详细研究。

2.1 光学应用

本节讨论表面及次表层中激光诱导纳米结构的光学应用。文中指出，激光诱导周期性表面结构（LIPSS，波纹）、纳米结构纹理微沟槽和纳米尖刺，可在金属上产生衍射结构色效应（通过波纹），改变金属或半导体表面的光吸收，使其趋向于“黑色”材料（通过微沟槽），或降低其反射率。

电介质 通过纳米尖刺产生抗反射效应。除了光发射和吸收管理之外，还可以通过纳米复合薄膜的近表面三维自组织来实现安全标签。

结构色

周期处于可见光波长量级的激光诱导周期性表面结构可有效充当光学衍射光栅，从而为光学应用产生结构色。虽然有些应用需要加工单个光斑或定制线条，但大多数此类用途都依赖于在大面积表面上均匀加工激光诱导周期性表面结构。通常，这通过激光扫描仪实现，使聚焦激光束与工件之间产生相对运动。

图 6 展示了在抛光钢表面上加工光斑、线条和区域的示例，见图 6(a) 中的示意图。对于固定的激光光源（波长和脉冲持续时间），可通过激光能量密度（ϕ_0）和每个光束光斑直径对应的有效激光脉冲数（N_{eff}）控制激光诱导周期性表面结构的周期。利用钛宝石飞秒激光系统，在样品上加工了单个光斑，以及通过蛇形逐线运动生成的连接各区域的线条。根据激光诱导周期性表面结构的周期不同，白光光源照射样品时会因光学衍射而呈现不同的结构色。图 6(b) 展示了这一现象，其中可见结构化区域、线条乃至光斑的显色效果。

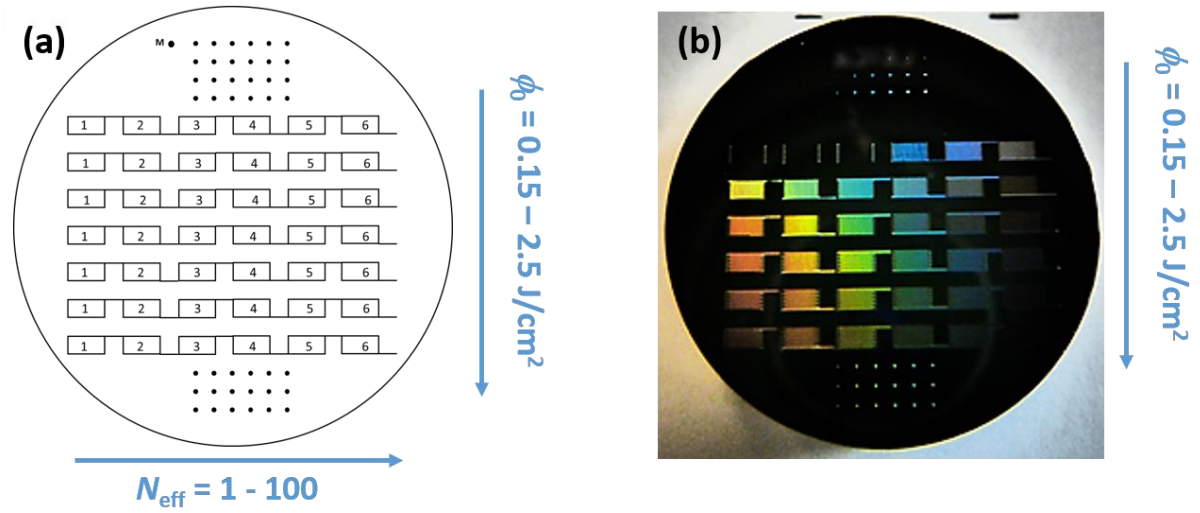


图6：(a) 激光加工示意图。(b) 抛光后的100Cr6钢样品（直径24 mm）经飞秒激光加工后形成的光斑、线条和区域的照片 [800 nm、30飞秒、1 kHz] 。这些颜色是环境光在激光生成的激光诱导周期性表面结构上发生光学衍射所致。（© 2016年 IEEE。经许可转载自 [Bonse、2017], Bonse, J. 等，《激光诱导周期性表面结构——常青的科学研究主题》，IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron，2017年，23:9000615）。

Dusser 等人提出了一项开创性研究，展示了如何利用激光诱导周期性表面结构进行彩色标记和装饰：他们在钢表面上编码了一幅微型彩色的梵高画作，见图 7。此处通过改变激光诱导周期性表面结构的取向来实现颜色变化，同时保持观察角度固定。

有关结构色的更详细讨论，请参阅 Liu 等人近期发表的综述文章 [Liu, 2019] 及其中所列的参考文献。

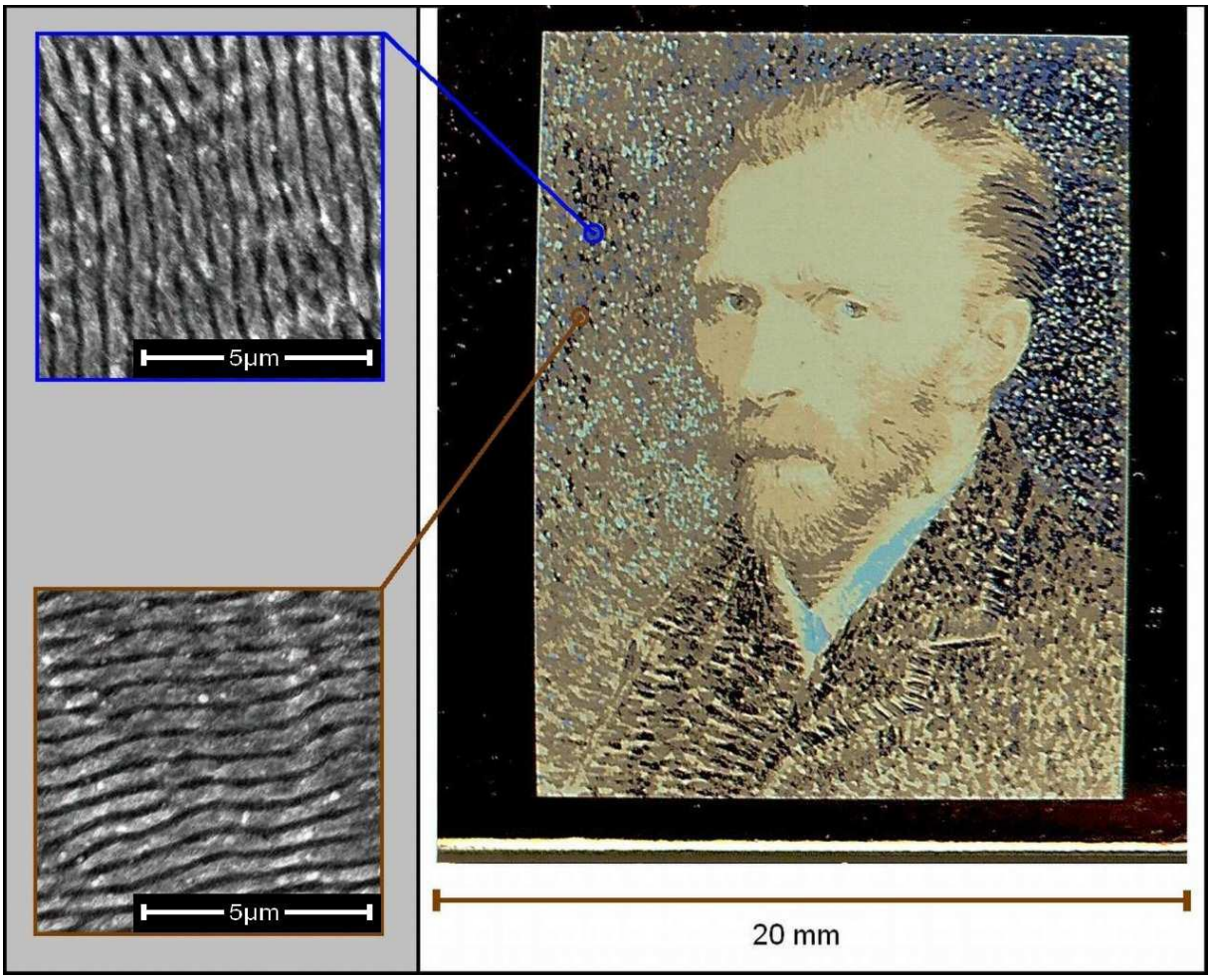


图 7：经过飞秒激光加工[800 nm、150 fs、5 kHz] 后，抛光的316L不锈钢样品上微型化的画家文森特·梵高自画像照片（右）。插图（左）为具有两种不同局部取向的激光诱导周期性表面结构的俯视扫描电子显微图。（经许可转载自[Dusser,2010], © 美国光学学会）。

吸收与发射管理

分级微纳结构（如微沟槽和尖刺）大幅增加了样品的有效表面积。由于入射光线局部偏离法线且发生多次反射，这些表面形貌会增加光的吸收。图 8 展示了铂表面上形成“黑色金属”[Vorobyev, 2013] 的纳米结构纹理微沟槽所产生的这种效果。该图比较了抛光铂表面（实心方块）与飞秒激光加工的黑色铂表面（实心圆点）的反射率光谱依赖性。后者在从紫外线到红外线的光谱范围内（~250 nm 至 2500 nm）呈现出低于 5% 的半球反射率。插图展示了相应的激光加工黑色铂样品。

关于发射管理，可以利用基尔霍夫定律。该定律指出，处于热平衡时，表面的发射率等于其吸光率。因此，吸收率提高的表面，其发射率也会同时升高。例如，这一原理可用于白炽灯的灯丝。这种应用已在钨中得到验证。

灯丝灯在可见光范围内的光发射效率提高了三倍与未经处理的灯丝相比 [Vorobyev, 2009a]。

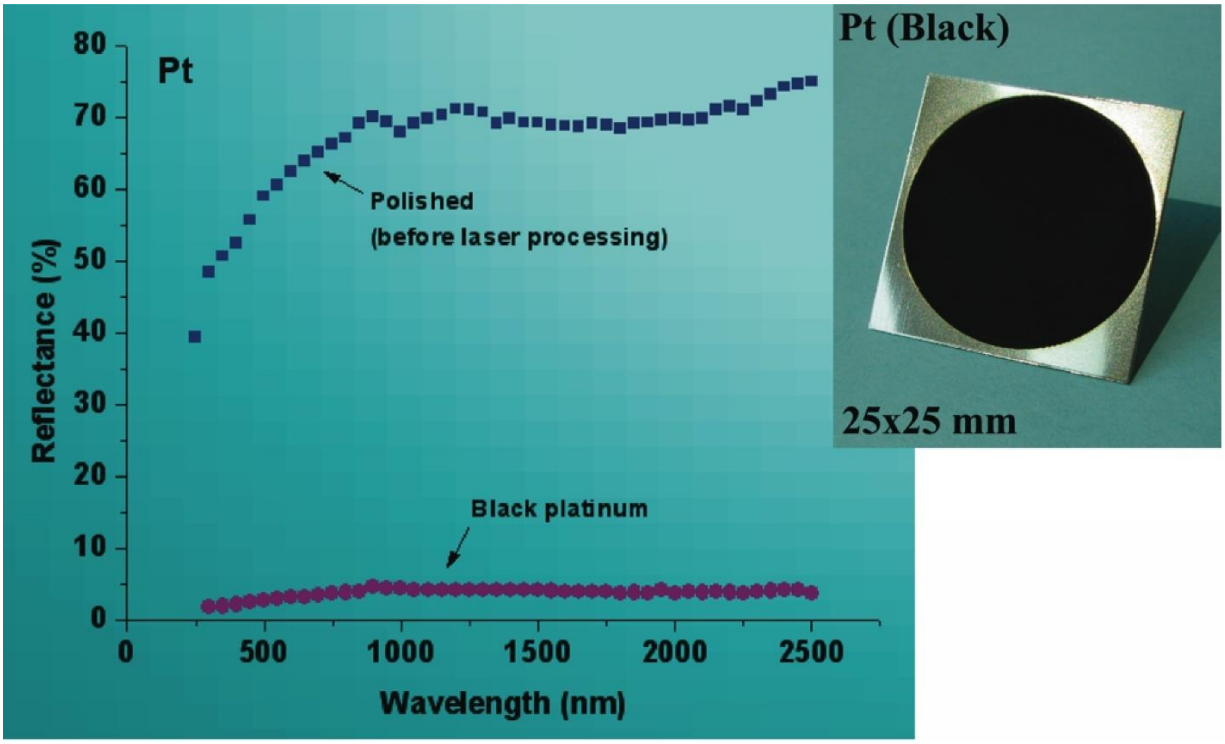


图 8：经飞秒激光加工的 [800 nm、65 fs、1 kHz] “黑铂”样品照片，表面覆盖着具有纳米结构纹理的微沟槽（右）。图中还显示了相应的总半球反射率光谱（左，紫色实心圆），并以抛光表面的测量结果作为参照（左，蓝色实心方块）。（经许可转载自 [Vorobyev, 2013]，版权所有者 Wiley-VCH-Verlag GmbH 授权：《激光与光子学评论》7:285–307（《飞秒激光表面纳米/微结构化及其应用》，Vorobyev, A.Y. 和 Guo, C.），版权所有（2012年）。）

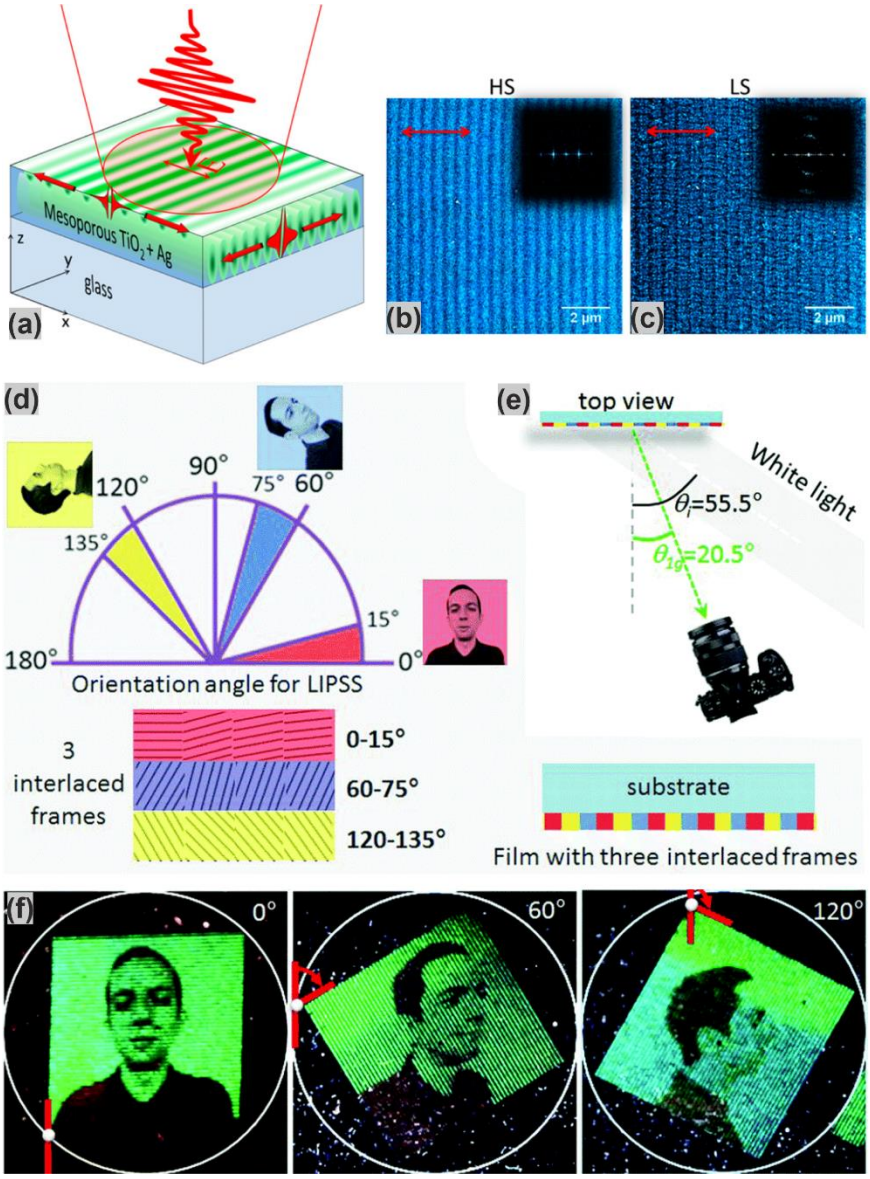
对于透明材料，可以利用光散射效应来制备全向宽带减反射表面 [Stratakis, 2020]。Papadopoulos 等人 [Papadopoulos, 2019]采用圆偏振飞秒激光脉冲，生成随机排列的纳米尖刺，以模拟 Greta Oto 蝴蝶的翅膀。这些激光生成的结构具有随机分布的高度和宽度，尺寸范围为数百纳米，使其在可见光谱范围内的表面反射率降至 1%。

信息编码

人们采用了不同的技术方法，通过自组织纳米结构实现信息编码，例如用于防伪标签应用。除了利用持久的结构色防止（加拿大）硬币伪造这一显而易见的应用之外[Guay, 2017], , N. Destouches 和 J. Siegel 领导的研究团队还提出了更复杂的激光加工策略 [Liu, 2017 / Sharma, 2019a / Sharma, 2019b]。该技术将银盐嵌入（介）孔二氧化钛薄膜中，以构建层状且按激光诱导周期性表面结构周期性排列的银纳米颗粒系统，可用于多路复用图像编码，以实现品牌识别、商品认证和智能视觉效果 [Sharma, 2019a]。

图 9(a、b、c) 示意了两种不同光栅结构的编码，这些结构可在玻璃上的介孔 Ag:TiO_2 薄膜中，经高重复频率飞秒激光处理后形成于不同深度处。

脉冲曝光（500 kHz），采用不同的扫描速度，即“低速”（LS）和“高速-扫描速度”（HS）。这些光栅是由二氧化钛基质中的银纳米颗粒发生等离激元驱动的沉淀，并伴随奥斯特瓦尔德熟化效应而形成的，最终产生了由不同尺寸银纳米结构组成的复杂三维排列（详情请参见 [Liu，2017]）。这些效应可用于以多路复用的方式编码多张图像，并且能够在不同旋转角度下通过光学方式读取，参见图 9(d、e、f)。这种图像编码技术可用于身份证等。



[图9：(a)介孔 Ag:TiO_2 纳米复合薄膜中激光诱导三维自组织示意图。线偏振激光脉冲[515 nm，370 fs，500 kHz] 同时激发表面波和导波，两者沿相互垂直的方向传播。波与入射脉冲发生干涉，并在薄膜表面附近沿偏振方向平行的区域，或在薄膜内部与其垂直的区域产生强度调制。两种干涉图样具有不同的空间周期。(b,c)“HS”结构（b；以100 mm/s的高速加工）和“LS”结构（c；以10 mm/s的低速加工）的俯视显微图像及其相应的二维傅里叶变换（插图）。红色双箭头表示线偏振方向。（图(a)–(c)经许可转载自[Liu，2017]（Liu 等人，《超快激光脉冲在纳米复合层状系统中诱导的三维自组织》，ACS Nano 11:5031–5040）。版权所有（2017年）美国化学会）。(d,e,f) 多个“隐藏”图像的写入。(d) 用于编码每幅图像256个灰度级的激光诱导周期性表面结构角度范围。三幅栅格图像已交错排列并

以不同的帧印制在 1.18 cm^2 表面上。红、蓝、黄三种颜色代表用于交错的假色。三帧包含取向各异的光栅（红色：0°–15°；蓝色：60°–75°；黄色：120°–135°）。（e）用于拍摄样品的装置示意图，标示了准直白光光束的入射角 θ_i 以及入射平面内绿光一级衍射的角度 θ_{1g}，绿光波长为 537 nm。（f）将样品印制在聚碳酸酯基底上后拍摄的照片；在样品平面内旋转样品，记录三个不同方位角下的图像。分别在 0°、60° 和 120° 时呈现三种不同图像。（图 (d)–(f) 经英国皇家化学会许可转载，摘自[Sharma, 2019a], 用于多重图像隐藏的激光驱动等离激元光栅，Sharma, N. 等，《材料视野》**6**：978–983, 2019；许可由版权许可中心公司转授。）

2.2 液体管理与表面润湿

本节讨论表面上激光诱导微纳结构的润湿和液体管理应用。也就是说，除了表面化学之外，还可以利用特定的表面形貌，包括激光诱导周期性表面结构（LIPSS、波纹），来调控和优化表面的润湿性能。首先简要介绍支配表面润湿的物理学原理。接下来讨论一些实例，说明表面织构（包括 LIPSS）可用于制备具有自清洁功能的表面，或实现流体导向、降低对液态食品的黏附、减小阻力、降低莱顿弗罗斯特温度，最后但同样重要的是，表现出防冰性能。

表面润湿的物理原理

固体表面的润湿性是指液体能够润湿表面的程度。液体（液滴）在气体环境中的固体表面上的润湿性能（即所谓的固体–液体–蒸气体系）通常通过接触角测量来量化，见图 10(a)。在该图中，作用于液体–固体–蒸气界面的毛细力达到平衡，从而形成所谓的 *Young*接触角 θ_Y [Young, 1805], 该角度与界面表面张力有关，分别为γ_{vs} 蒸气-固体界面的表面张力、γ_{sl} 固体-液体界面的表面张力以及γ_{lv} 液体-蒸气界面的表面张力，它们之间的关系为$\cos(\theta_Y) = (\gamma_{vs}-\gamma_{sl})/\gamma_{lv}$。界面表面张力是材料的化学参数[Samanta, 2020]。

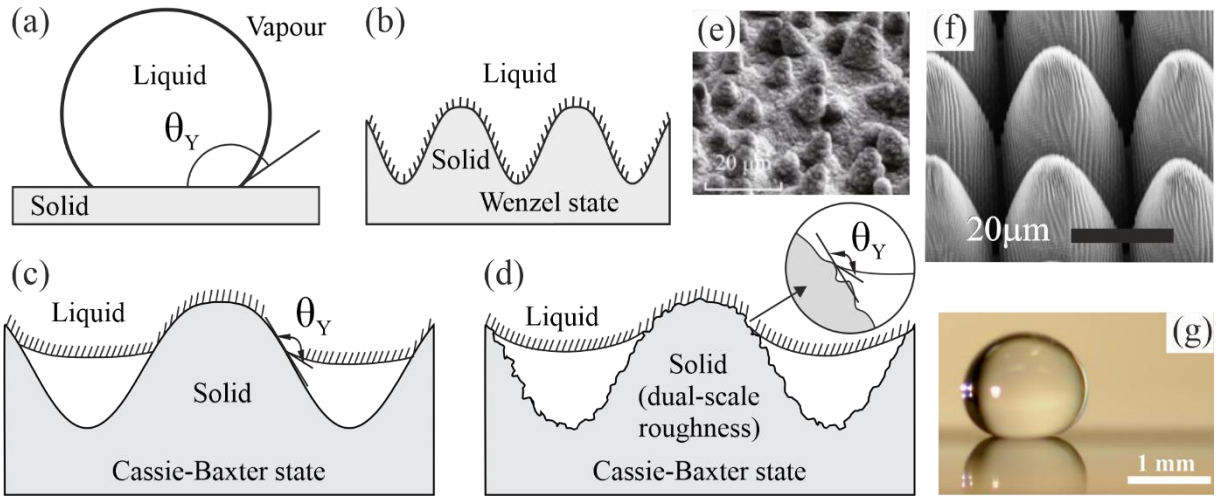


图10：（a）气态环境中平坦固体上静置液体（液滴）的接触角定义θ_Y [°]（固体–液体–蒸气系统）。（b）Wenzel态，其中液体完全润湿表面；（c）Cassie-Baxter态，其中空气被困在液体下方；（d）位于由微米和纳米尺度表面粗糙度组成的分级（此处为双尺度）表面形貌上的液体，从而导致表观接触角增大

(APCA)。（e）荷叶表面形貌的扫描电子显微镜显微图，由纳米级“绒毛”构成，位于微米级“柱状结构”顶部，显示出疏水和自清洁性能。（f）激光加工表面的扫描电子显微镜显微图，形成了双尺度表面纹理—即在微米级柱状结构上叠加激光诱导周期性表面结构，复现荷叶的表面形貌。（g）一滴水具有较大的 APCA，停留在激光加工的双尺度表面纹理顶部。图 (a)-(d) 和 (f)、(g) 经许可改编并转载自 [Arnaldo del Cerro，2014]。图 (e) 改编自 [Barthlott，2017], Barthlott 等，《植物表面：仿生创新的结构与功能》，《纳米-微米快报》**9**:23，版权 © 2016年，依据知识共享署名 4.0 许可协议。https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1。

若液体为水，则当 $\theta_Y < 90°$ 时，称（平坦）表面为亲水表面；当 $\theta_Y > 90°$时，则称为疏水表面，即拒水表面。当 $\theta_Y > 150°$时，则称该表面为超疏水表面。若表面能排斥油性液体，则称为疏油表面 [Tuteja, 2007]；若能排斥所有类型的液体，则称为全疏液表面。通常只有当表面存在粗糙度（纹理）时，才能实现超疏水表面。在后一种情况下，θ_Y 无法使用上述公式计算，但仍可测量接触角，此时称为表观接触角（APCA）[Stratakis, 2020]。根据润湿状态（或润湿模式），APCA可使用两种模型之一进行计算。若液体（液滴）与固体表面完全接触，则适用Wenzel模型 [Wenzel, 1936], ，见图10(b)。若液体未完全渗入表面粗糙度的“沟谷”，而是停留在纹理的峰顶上，则适用Cassie-Baxter模型 [Cassie, Baxter, 1994], ，见图10(c)。在该图中，液体与固体之间接触线的位置由纹理的斜率以及斜坡处局部的Young接触角决定，见图10(c)。斜坡越陡，接触线位置越高（越靠近峰顶），因此液固接触面积越小。结果是，当表面倾斜时，液滴很容易滚落。自清洁、防冰和微流控应用等表面性能都归因于这一较小的液固接触面积。对于水，与平坦表面相比，粗糙度达到微米尺度时会产生APCA增大的效应。若在此粗糙尺度上叠加额外的纳米尺度粗糙度，由于纳米粗糙度使局部斜率增大，APCA还可进一步增大，见图10(d)。荷叶的自清洁性能归因于这种双尺度粗糙度，见图10(e)。在设计用于改善润湿应用的表面形貌时，可在微米尺度纹理上利用激光诱导周期性表面结构，以获得双尺度粗糙度，见图10(f)-(g)。许多工业流程以及激光诱导周期性表面结构在调节表面润湿或液体管理方面的应用，都受到仿生复制生物系统的启发，例如荷叶[Stratakis, 2020年 / Yong, 2015 / Nishimoto, 2013]。此外，激光诱导周期性表面结构的许多生物医学应用也（部分）依赖于表面润湿，见第2.3节“生物学应用”。

自清洁

产品表面的污染物和碎屑，例如瓷砖、纺织品和太阳能电池板上的污染物和碎屑，不仅会对其主要功能产生负面影响，还可能引发撕裂和磨损等其他问题。值得注意的是，对于太阳能电池板或窗户玻璃等光学应用，(超)疏水性与透明度相互制约，因为粗糙度超过约 100 nm 时，光散射会损害光学透明度[Nishimoto, 2013]。自清洁表面可减少主动清洁所需的时间，从而降低相关成本。如果表面具有（超）疏水特性，水滴便可轻易从表面滚落，并拾起、带走表面污染物。包括 Jagdheesh 等人和 Piccolo 等人在内的多位作者发现，与“平坦”或

微米级表面形貌 [Jagdheesh, 2011 / Piccolo, 2020]。Milles 等人[Milles, 2020]，表征了铝材上超疏水分级表面纹理的自清洁特性。这些纹理通过直接激光写入（DLW，使用 λ = 1064 nm、8 ns 和 14 ns 脉冲持续时间）、激光直接干涉图案化（DLIP）和激光诱导周期性表面结构（LIPSS，使用 λ =1064 nm 和 10 ps 脉冲持续时间）制成，并受到多种颗粒污染，其中包括聚酰胺（PA）颗粒（~100 μm），见图。11。将数滴10 μl 去离子水 滴在受污染的激光结构化样品上，并倾斜样品，使水滴滚落并带走颗粒，见图 11(b)。每滴水后，测量感兴趣区域内的颗粒数量，见图 11(c)。作者发现，DLW + DLIP + LIPSS 结构具有很高的自清洁效率，残留污染物最低可达 1%，当使用直径为 100 μm 的 MnO和 PA 颗粒时，见图 11(d)。

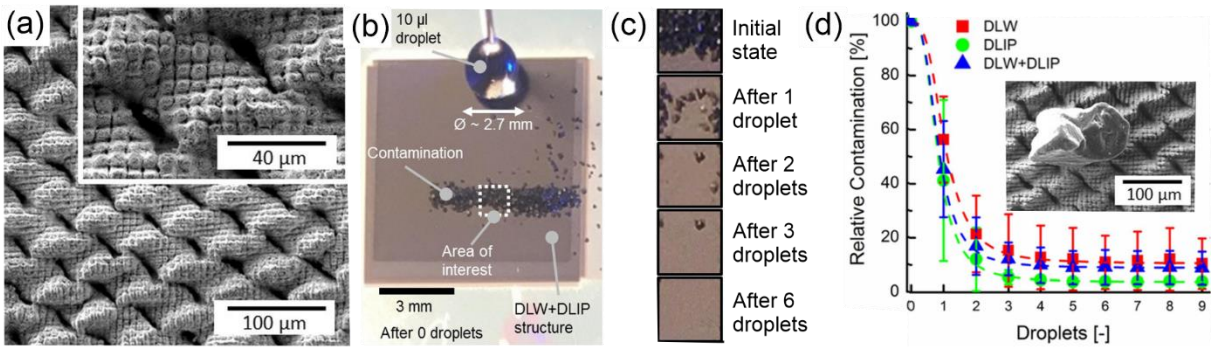


图11：（a）由DLW、DLIP和LIPSS组合形成的具有自清洁性能的分级表面织构的俯视扫描电子显微镜显微图。（b）用于评估各种表面织构自清洁性能的测试装置。（c）每个液滴滚落后，测量感兴趣区域内的颗粒数量。（d）各种织构中的相对颗粒数量随滚落液滴数量的变化。（经[Milles、2020]，《应用表面科学》、第525卷、Milles等人《通过直接激光写入和激光直接干涉图案化制备的超疏水铝表面的自清洁性能表征》、146518，版权所有（2020年），经爱思唯尔许可，转载并改编。）

流体输运

在自然界中，已知从毫米到纳米尺度的分级表面织构能够实现液体直接流动。例如，生活在干旱地区的集水蜥蜴，其皮肤纹理由微结构重叠鳞片构成，鳞片之间有毛细通道 [Hermens, 2017]。蜥蜴鳞片上的（微）结构（10 mm 至 30 μm）能够“ удерж住”水膜，使皮肤变得超亲水。由于毛细通道与微结构鳞片相结合，液体得以汇集，并输送至动物的吻部。这类表面性质可应用于工业领域，例如输送冷却润滑剂[Co manns, 2016] ，或用于摩擦学应用中的润滑剂，参见第 2.4 节“摩擦学应用”。Hermens 等人 [Hermens, 2017] 采用 532 nm 皮秒脉冲激光源对 16MnCr5钢表面进行织构加工，以仿造沙漠角蜥的鳞片和毛细通道，见图 12(a) 和 12(b)。液体在这种表面织构上沿单一方向输运数厘米的现象，归因于互连毛细管网络的周期性收窄和扩张。作者通过在表面一侧滴加 K-40冷却润滑剂的液滴，并用摄像机观察液体输运，对液体输运性能进行了表征。结果发现，液体以 0.49 mm/s 的速度从左向右流动，如图 12(c) 所示。

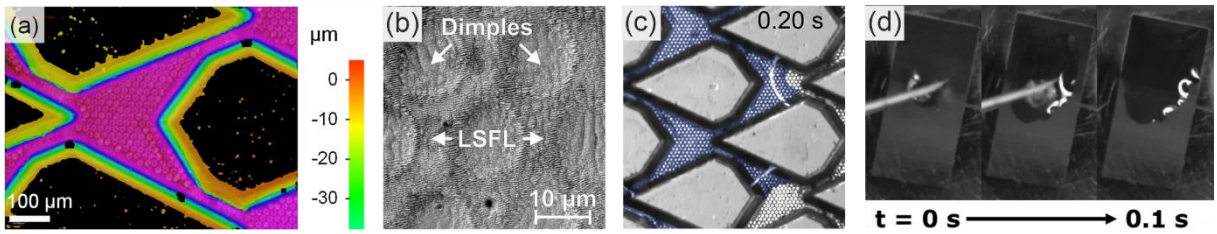


图 12：(a) 微米级六边形纹理多边形（“鳞片”）的三维表面形貌，其间的毛细“通道”由微米级凹坑（直径 ~10 μm）组成，凹坑表面覆盖着亚微米级激光诱导周期性表面结构。(b) 毛细通道内表面织构的扫描电子显微镜显微图（细节）。(c) 图像显示在图像左侧附近放置水滴后 0.2 秒时的润滑剂 K-40（人工染成蓝色）。(d) 序列照片（俯视图）展示了放置在钢表面纹理梯度（上方：尖刺；下方：激光诱导周期性表面结构）中央的水滴单向流动。（图像 (a)–(c) 经许可转载自 [Hermens,2017]，《应用表面科学》，第 418 卷，Hermens 等人，《通过无机材料的超短激光脉冲辐照仿制蜥蜴状表面结构》，499–507 页，版权所有 (2016)，爱思唯尔。图像 (d) 摘自 [Kirner, 2017b]。（经施普林格出版社有限公司许可转载：《应用物理 A》123:754（《通过超短激光脉冲辐照钢材制备仿虫类表面结构及其流体输运》，Kirner, S.V. 等人），版权所有 (2017)。）

另一个例子是，Kirner 等人采用 170 fs 脉冲激光源，以 λ = 1026 nm 为 42CrM04钢表面加工织构，通过改变激光能量密度，使表面形貌从激光诱导周期性表面结构（LSFL）逐渐过渡到沟槽和尖刺（见第 1.1 节“LIPSS 的形貌学”）；激光能量密度范围为 0.07 J/cm^2 （矩形底部）至 1.05 J/cm^2 （矩形顶部），以仿造树皮蝽（扁蝽科）皮肤的输运性能 [Kirner, 2017b]。视频记录显示，在激光加工后不久，将 8 μl 去离子水液滴滴在织构表面中央，液体便迅速以 ~75 mm/s 的速度向尖刺覆盖区域扩散，而不会流向沟槽或激光诱导周期性表面结构覆盖的区域，见图 12(d)。

与流体输运相关的另一个方面，是利用激光制造超强吸液表面。对于这一功能，毛细力（例如存在于激光生成的平行微沟槽中）与纳米结构覆盖的通道内表面的亲液性相结合，即使逆着重力，也能有效输运液体 [Vorobyev，2009年b], 见图13。

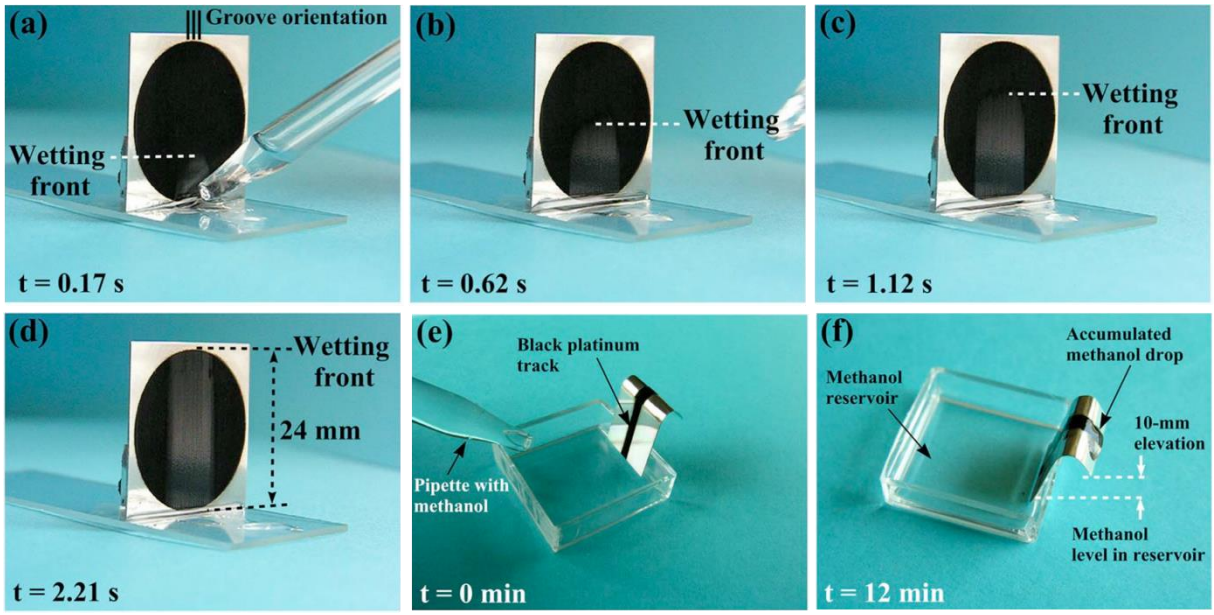


图 13：(a)-(d) 展示了甲醇在垂直放置的激光加工黑铂表面上逆重力运输的照片。(e)-(f) 展示了甲醇和液体的垂直运输照片。

在样品边缘处的积聚。（转载自[Vorobyev，2009年b], Vorobyev 等，《金属使液体逆坡流动》，《应用物理学快报》**94**：224102（2009年）], 经 AIP出版集团 许可。）

基於此類超潤濕表面功能的不同應用，早已有人提出並加以實驗驗證。由於毛細作用，液滴會迅速在潤濕輸運表面上擴散，並在大面積表面上形成薄膜，最終實現高效蒸發。Singh 等人 [Singh，2020]利用這種逆重力輸運水的特性，以及激光加工黑色金屬對可見光和紅外光譜範圍內光輻射的吸收能力大幅提升的優勢（見第 2.1 節「光學應用」），展示了一種用於光熱水淨化和脫鹽的太陽跟蹤超潤濕黑色金屬面板（見圖 14）。

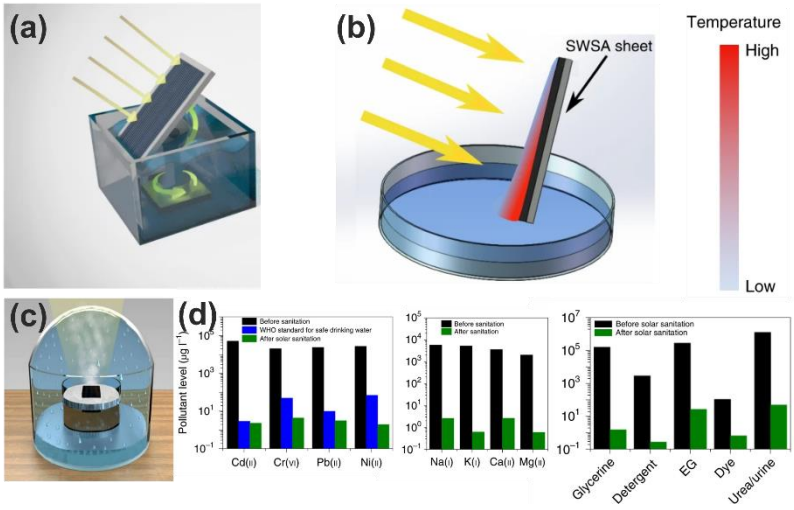


图 14：（a）太阳跟踪超疏水和超强吸光（SWSA）铝制太阳能水净化器的示意图，该装置（b）促进界面加热，同时确保水持续流经太阳能吸收器。（c）水净化/脱盐装置示意图。（d）对各种重金属、盐类和工业/家庭/人类活动产生的水污染物进行水净化（EG：乙二醇）。（转载（改编）自 [Singh、2020], Singh 等人的《用于光热水净化的太阳能跟踪超疏水黑色金属板》，《自然·可持续性》3：938–946，版权所有 2020 年，依据知识共享署名 4.0 许可协议。取自 https://doi.org/10.1038/s41893-020-0566-x）。

在经激光加工的铝材上，这种超强润湿输运表面功能甚至在高达 120°C 的高温下对水仍然有效，可应用于提高临界热通量的锅炉，或用于提升发电能源效率的换热器[Vorobyev，2021]。

液体食品防粘包装

黏性液体会附着在食品、化妆品和农用化学品等产品的包装表面上，导致浪费、回收成本增加，并令消费者感到恼火。受猪笼草启发，Karkantonis 等人制备了润滑剂浸渍纹理表面（LIS），以改善黏性液体从聚合物表面的脱落行为 [Karkantonis，2020]。在这种方法中，所选润滑剂能够润湿微纳纹理表面，而非被其排斥；同时，待排斥的黏性液体与润滑剂不相溶。研究人员使用 310 飞秒脉冲激光源（λ = 1030 nm），在 X6Cr17不锈钢表面加工出双尺度纹理，该纹理由微米级交叉线图案和激光诱导周期性表面结构（LIPSS）组成，见图 15(a)。这种表面形貌是

随后通过热压印复制到聚苯乙烯（PS）和聚丙烯（PP）片材上。选用硅油作为润滑剂。

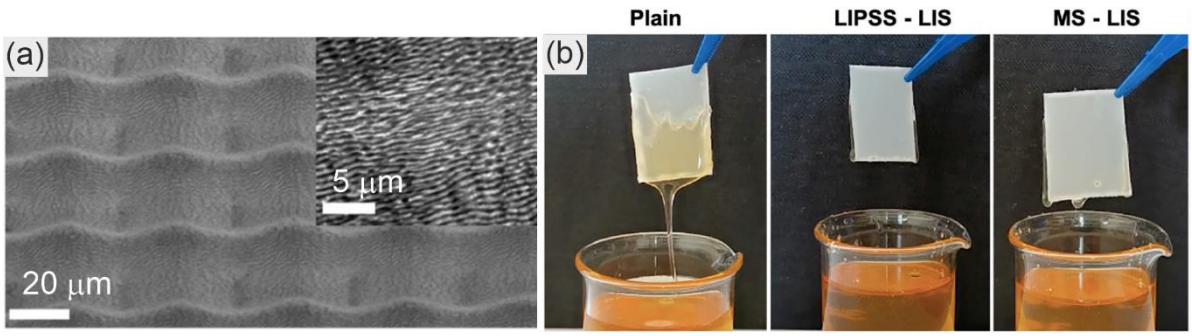


图 15：（a）双尺度激光织构化钢表面的扫描电子显微镜显微图，其由微米级交叉线图案和激光诱导周期性表面结构（插图）组成。（b）PP 样品（浸渍硅油）浸入蜂蜜后滴落行为的照片；左：未织构化的平坦样品；中：覆盖激光诱导周期性表面结构的样品；右：具有双尺度粗糙度的样品。（图片经改编并转载自 [Karkantonis、2020],《表面与涂层技术》第 399 卷，Karkantonis 等，《用于食品包装应用的耐用润滑剂浸渍表面的飞秒激光诱导亚微米及多尺度形貌》，126166，版权所有（2020年），经爱思唯尔许可。）

通过将液体浸渍表面聚合物样品置于各种液体中，包括蜂蜜、牛奶和番茄酱，评估了各种液体的脱落行为。图 15(b) 展示了聚丙烯（PP）样品在蜂蜜中浸没测试的照片。作者发现，经过 50 次循环后，激光诱导周期性表面结构液体浸渍表面处理的热塑性塑料在所有受测液体中仍表现出抗黏附性能；而双尺度液体浸渍表面基底在牛奶和蜂蜜中分别经过 43 次和 20 次浸泡循环后，出现了轻微的黏附。

减阻

当物体在流体中移动时，阻力是作用于（固体）物体上的一种力，其方向与物体在流体中的相对运动方向相反。减阻有利于，例如，生物医学器件（如芯片实验室应用）、泳衣、用于输送液体的管道、船体和航空航天工业 [Nishimoto, 2013]。与平坦表面相比，通过表面织构可以实现阻力减小，因为在Cassie-Baxter态下的气液弯月面处会产生无剪切边界条件 [Jagdheesh, 2010], 见图10(c)-(d)，而液体与纹理粗糙峰之间则满足无滑移条件 [Ahmmed, 2016]。因此，减小与液体接触的（织构化）固体表面的相对比例，将导致减阻。减阻可以通过测量（织构化）固体的所谓“滑移长度”来量化，例如使用流变仪或粒子图像测速（PIV）。较大的（有效）滑移长度减小意味着较大的减阻。因此，Tanvi Ahmmed和Kietzig使用<85 飞秒脉冲800 nm激光光源对纯铜表面进行织构化，制备了各种微米尺度图案，包括平行线（栅格结构，见图16(a)）和各种柱状结构（方形和菱形，见图16(b)-(c)）；研究发现，所有这些结构的侧壁均覆盖有激光诱导周期性表面结构，而粗糙峰上则覆盖有纳米颗粒[Ahmmed, 2016]。

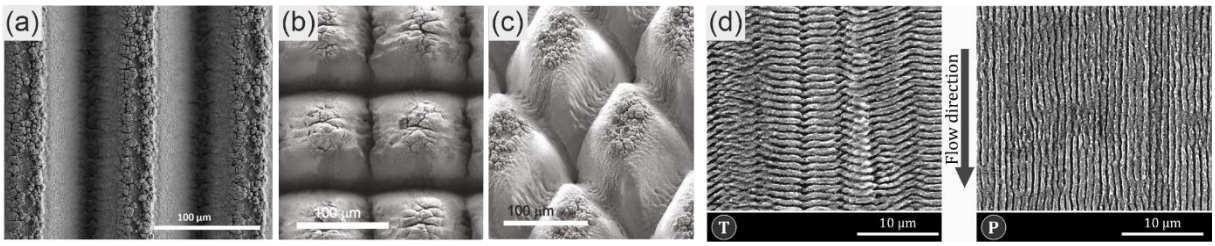


图16：（a）—（c）用于液体减阻的各种多尺度表面形貌的扫描电子显微镜显微图像，包括载玻片壁上叠加有激光诱导周期性表面结构的微米级图案，以及峰部的纳米颗粒。（d）模具钢上激光诱导周期性表面结构的扫描电子显微镜显微图像，旨在降低聚合物注射成型中的阻力。（图像（a）—（c）经英国皇家化学会许可转载，来源：[Ahmmed，《2016], 激光图案化分级超疏水表面上的减阻》，Ahmmed, K.M.T. 和 Kietzig. A.-M.，《Soft Matter》12:4912–4922, 2016]；经版权许可中心公司授权。图像（d）改编并转载自[Sorgato，《CIRP年刊》第67卷，Sorgato等，《不同激光诱导周期性表面结构对PET注塑成型中聚合物滑移的影响》，575–578，版权所有（2018），经《CIRP年刊》许可。）

接下来，研究人员对样品进行了氟烷基硅烷涂覆，以通过化学方式增强表面的疏水性。作者使用水和流变仪，通过计算不同剪切速率下测得的扭矩，量化了滑移长度。光滑（即无纹理）的疏水表面上的滑移长度较小，范围从纳米级到几 μm [Ahmmed,2016]。作者发现，他们的样品具有显著更大的滑移长度，范围从 70 μm 到约 140 μm。

另一个例子是，Sorgato 等人使用脉宽为 8 ps、波长为 1064 nm 的激光光源，在模具钢上制备了激光诱导周期性表面结构（见图 16(d)），以降低注射成型装置中聚合物（聚对苯二甲酸乙二醇酯）的阻力 [Sorgato, 2018]。这是因为，尤其是在小型塑料件的注射成型过程中（例如电子封装应用），阻力较大，因此需要较高的压力才能填满模具。作者在模具镶件上制备了两种相互正交取向的激光诱导周期性表面结构：平行于聚合物流动方向的结构（P）和垂直于流动方向的结构（T），见图 16(d)。研究发现，垂直于熔体流动方向的激光诱导周期性表面结构对注射压力的影响可忽略不计，而平行于流动方向的结构可使所需注射压力降低高达 23%。

莱顿弗罗斯特效应

如果将液滴滴在温度显著高于液体沸点的表面上，液滴下方会形成一层绝热蒸气“垫”，使液滴悬浮于固体上方并缓慢蒸发。这种现象称为莱顿弗罗斯特效应。通过构造表面织构，莱顿弗罗斯特温度——即发生莱顿弗罗斯特效应时固体的临界温度——会降低 [Dubnack，2020年 / Arnaldo del Cerro，2014年 / Marín，2012]。要降低水的莱顿弗罗斯特温度，所需的粗糙度在 μm 范围内 [Arnaldo del Cerro，2014年 / Marín，2012]。此外，基于莱顿弗罗斯特效应，可以利用非对称表面织构（例如锯齿轮廓）引导液滴移动，甚至使其逆重力移动，效果类似于超润湿效应（见上文）。这些移动由表面形貌的不对称倾斜所引起的压力梯度，以及马兰戈尼流导致的液滴旋转所诱发。这些效应以及莱顿弗罗斯特温度的降低，在芯片实验室器件和输送液体的管道等领域具有潜在应用价值，因为它们可以减小阻力。Dubnack 等人使用飞秒、波长为 1025 nm 的激光光源，在铝制锯齿轮廓的尖端上制备了激光诱导周期性表面结构，见图 17(a) [Dubnack， 2020]。样品被

涂覆了氟辛基三乙氧基硅烷，以通过化学方法提高疏水性。接下来，作者测量了使水滴（体积为 60 至 200 μl）开始移动的温度。结果发现，无激光诱导周期性表面结构的纹理对应的温度约为 170 ℃，而具有激光诱导周期性表面结构的纹理对应的温度仅约为 115 ℃，见图 17(c)。

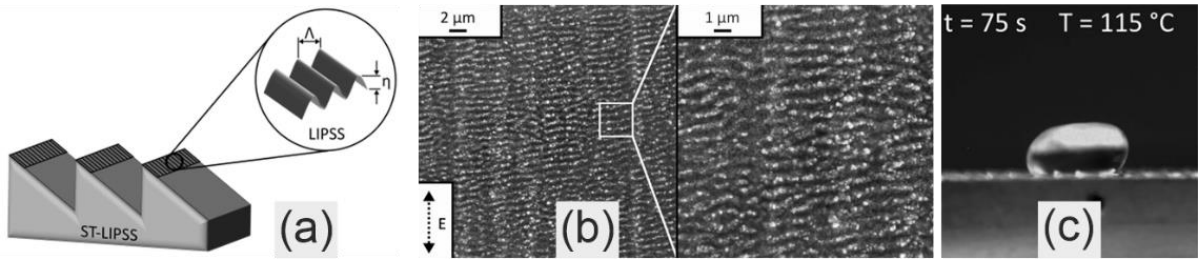


图 17：(a) 覆有激光诱导周期性表面结构的毫米级锯齿形表面轮廓，利用莱顿弗罗斯特效应加速水滴。(b) 铝基底上锯齿形表面轮廓尖端处激光诱导周期性表面结构的扫描电子显微镜显微图。(c) 视频序列中的一帧，显示一个在降低后的莱顿弗罗斯特温度下移动的液滴（从画面左侧开始）。（经爱思唯尔许可，转载自 [Dubnack, 2020], 《应用表面科学》, 第 532 卷，Dubnack 等，激光诱导莱顿弗罗斯特表面，147407，版权所有（2020年）。）

防冰

当冰（霜、雨凇、雾凇、雪）黏附并积聚在太阳能板、飞机、风力涡轮机、电力线或通信线路等物体上时，可能会引发问题，仅举几例 [Volpe, 2020]。通过增加基底的表面粗糙度，可以提高表面的疏水性，从而获得防冰性能。设计（超）疏水表面的目的在于延长水的凝固时间，促进水在冻结前滚落（见自清洁），并减小冰在表面形成后的黏附力 [Volpe,2020]。减小与水滴接触的表面相对固体面积分数，有助于提升防冰性能。在 Cassie-Baxter 状态下（见图 10(c) 和 10(d)），可实现较低的相对固体面积分数；与 Wenzel态以及平坦或光滑表面相比，该状态降低了水滴与表面之间的热传导，促进滚落并减小冰黏附。

Milles 等人评估了覆盖有分级表面纹理的铝表面上水滴的冻结时间。这些纹理采用与上文所述相同的技术（DLW 和 DLIP）及激光系统制备（参见自清洁）[Milles, 2009]。通过拍摄表面上 8 μl 水滴在 -20℃ 空气中的凝固过程，测量了 DLW 结构、DLIP 结构和分级结构（DLW+DLIP+LSFL，见图 11(a)）的冻结时间，见图 18(a)。从图中可以看出，水滴在分级结构上的冻结时间（22.3 s）约为光滑参考样品（8.7 s）的 2.6 倍。此外，作者发现，将 13 μl 水滴从 20 mm 高处滴落到冷却至 -20 ℃ 的样品上时，水滴只会在分级结构上回弹，而不会在 DLW 结构或 DLIP 结构上回弹。研究发现，液滴回弹会延长冻结时间。

Römer等人在具有代表性的降雨测试和雾凇测试中，研究了水滴在激光织构化不锈钢样品上的滚落情况 [Römer, 2009]。为此，作者采用了7皮秒、1030纳米波长激光，制备了一种分级表面织构，该织构由覆盖有激光诱导周期性表面结构的柱状结构组成（高度20 μm，间距 20 μm），见图18(b)。柱状结构的间距选定为

因此，多个峰会在 Cassie-Baxter 状态下支撑一个水滴，见图10(d)。接下来，在表面覆盖一层全氟辛基三氯硅烷（FOTS）涂层，以通过化学方式提高表面的疏水性。进行 10 秒的降雨测试后（-0°C 时的水滴、气候箱温度为 -5 °C、风速为 9 m/s，这些条件对飞机而言属于结冰环境），拍摄了一张照片，见图18(c)。结果发现，激光纹理化区域几乎完全没有冻结的液滴。此外，在雾凇冰测试中发现，激光纹理化表面仅略微减缓了雾凇的形成，见图18(d)。这可以归因于形成雾凇的水滴直径远小于图18(b)中柱状结构的间距。

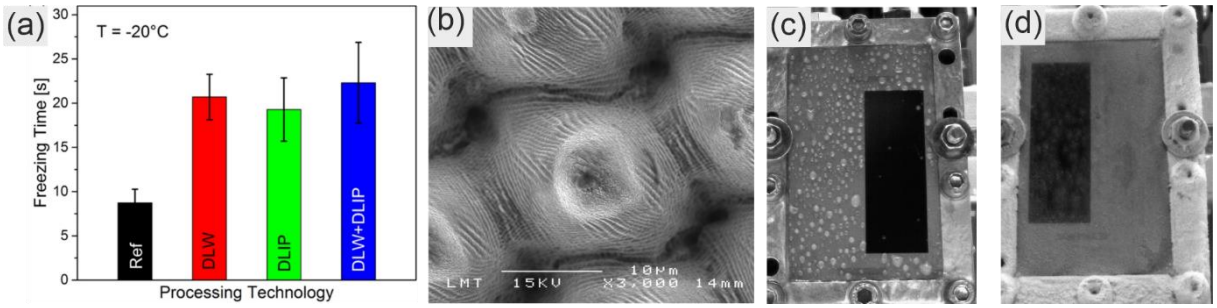


图 18：(a) 未处理对照样品、直接激光干涉图案化、直写激光加工、直写激光加工+ 直接激光干涉图案化+激光诱导周期性表面结构的水滴平均冻结时间。(b) 钢表面纹理的俯—视扫描电子显微镜显微图，该纹理由覆盖着激光诱导周期性表面结构的20 μ微米间距柱状结构组成。(c) 经 FOTS 涂层处理的激光纹理化钢样品在降雨测试 10 秒后的照片。面积达数平方厘米的激光纹理区域（黑色）几乎完全没有冻结的液滴。(d) 经 FOTS 涂层处理的激光纹理化钢样品在雾凇测试后的照片。（图 (a) 经 Milles[Milles2019], 等人《利用单尺度和多尺度周期性纹理在纯铝上制造超疏水和防冰表面》，《科学报告》**9**:13944，版权所有 2019年，依据知识共享署名 4.0 许可协议。取自https://doi.org/10.1038/s41598-019-49615-x。（图 (b)–(d) 改编自并转载自[Römer2009], Römer 等人《用于航空防冰应用的超短脉冲激光生成表面纹理》，国际激光与电光应用大会（ICALEO）会议论文集，2009年11月2–5日，美国奥兰多，第 30–37 页，https://doi.org/10.2351/1.5061570 经美国激光学会许可。）

2.3 生物学应用

本节将探讨激光诱导表面结构的生物学应用。本文将讨论如何利用激光诱导周期性表面结构控制细菌生物膜的黏附与生长，并影响细胞在医疗植入物上的排列。此外，激光诱导周期性表面结构还可用于生物化学，在芯片实验室器件中显著增强拉曼光谱信号。

生物膜生长控制

假体最常见的问题包括牙科植入物 [Hanif、髋关节和膝关节假体 [Löwik，以及导管、心脏起搏器和支架等生物医学器件 [Siddiquie。这些问题主要表现为关节感染和血栓形成。这会导致额外的住院治疗和费用，在最严重的情况下甚至可能致命。解决这一问题的一种方法是在此类设备上应用抗菌表面。

蝴蝶和蝉的翅膀以及壁虎的皮肤具有抗菌性能，这主要归功于排列有序的微纳结构[Tripathy，2017]。不同不锈钢合金上的激光诱导周期性表面结构[Fadeeva, 2011 / Truong, 2012 / Cunha, 2016 / Chan, 2017 / Epperlein,2017 / Lutey, 2018 / Zwahr, 2019 / Müller, 2020 / Selvamani, 2020 / Luo, 2020] 以及各种聚合物 [Schwibbert，2019 / Siddiquie，2020] 也表现出类似的抗菌性能。

人们认为，激光加工会导致金属表面发生氧化，而这种氧化可能具有杀菌作用 [Chan, 2017 / Müller, 2020]。此外，可以得出结论：具有小于细菌尺寸的特征尺寸且特性非常密集的表面地形起伏，会减小细菌与表面之间的接触面积，从而抑制细菌定殖并减少细菌滞留 [Fadeeva, 2011 / Truong, 2012 / Cunha, 2016 / Chan, 2017 / Schwibbert, 2019 / Müller, 2020]。然而，这取决于细菌的尺寸和形状，如 Epperlein 等人在图19中所示 [Epperlein, 2017]。该图展示了耐腐蚀钢（V4A）样品的荧光显微镜图像，这些样品的部分表面覆盖有周期约为700 nm的激光诱导周期性表面结构（LSFL），并分别接种了（a）大肠杆菌18小时和（b）金黄色葡萄球菌20小时。可以观察到，杆状大肠杆菌（尺寸约为0.5 µm × 2 µm）在覆盖有激光诱导周期性表面结构的区域表现出较低的黏附性，而球形金黄色葡萄球菌（直径为0.5–1 µm）在覆盖有激光诱导周期性表面结构的区域则表现出较高的黏附性。作者指出，黏附性增加是由于细菌的形状与纳米结构的方向相一致，从而增大了细菌与表面之间的接触面积 [Epperlein,2017]。

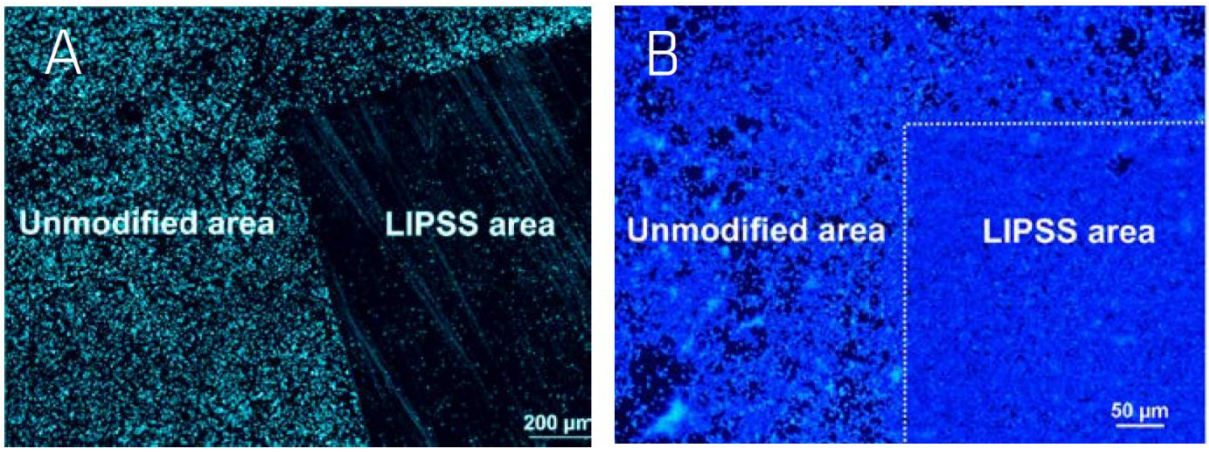


图19：钢样品（V4A）的荧光显微镜图像，部分经激光诱导周期性表面结构处理，随后接种染色的（a）大肠杆菌，培养18小时后；以及（b）金黄色葡萄球菌，培养20小时后。（经许可转载自[Epperlein，2017]，《应用表面科学》，第418卷，Epperlein等人，《飞秒激光产生的纳米结构对钢上生物膜生长的影响》，420–424页，版权所有（2017年），经爱思唯尔许可。）

由微米级结构与其上覆盖的纳米尺度特征组合而成的分级微纳结构也具有杀菌作用，例如 Luo 等人所示[Luo, 2020]。图 20(b) 展示了钛表面不同类型的激光诱导表面结构上的大肠杆菌。其中，“类型 1”由空间周期约为 400 nm 的激光诱导周期性表面结构组成；“类型 2”包含被间距约为 1 µm 的浅正弦沟槽打断的激光诱导周期性表面结构；“类型 3”由周期约为 500 nm 、被沟槽打断的激光诱导周期性表面结构组成，其沟槽比类型 2 的沟槽深约 200 nm。所有三种结构类型均表现出抗菌

作用，图20(a)对此进行了总结，展示了与抛光钛表面（作为参照）相比，三种表面结构类型的细菌数量减少百分比。这三种类型也都表现出杀菌作用，其中结构类型 3 的细菌数量减少幅度最大，达到 56%。经过培养后，活菌与死菌的比例因表面形貌而异。从图 20(b)可以观察到，细菌倾向于在结构类型 1（激光诱导周期性表面结构）上聚集成簇（以黄色圆圈标出），以防止细胞破裂。在类型 2 和 3 上较少观察到细菌聚集，但细菌更多地位于沟槽底部，尤其是在类型 3 上。细菌破裂可能发生在纳米结构顶部，形成片状形态；也可能发生在两个微结构之间，形成撕裂状形态。对于表面织构类型 1，主要观察到破裂后呈片状的死菌；而对于结构类型 3，则主要呈现撕裂状形态 [Luo, 2020]。

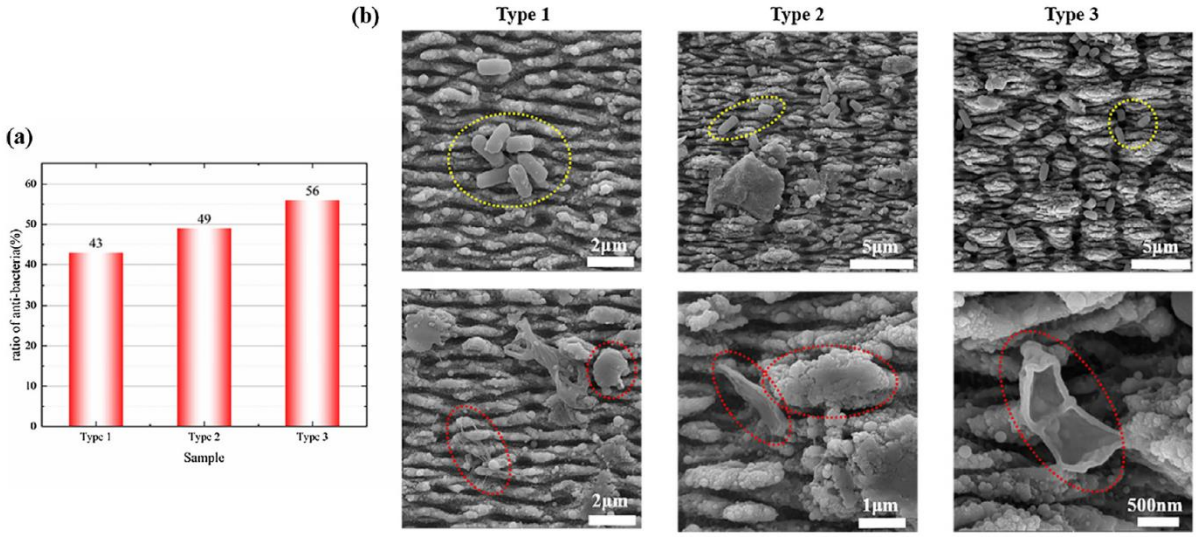


图 20：（a）三种表面结构对大肠杆菌的抗菌率（LIPSS 上的死亡细胞总数与抛光钛表面上的细胞总数之比）。（b）细菌细胞培养 24 小时后，三种表面形貌上细菌细胞黏附状态的俯视扫描电子显微镜图像。黄色椭圆表示细菌的存活策略，例如在多个 LIPSS 波峰上形成簇，或细胞躺在 LIPSS 之间并保持原有形状。红色椭圆表示两种死亡细胞形态，包括片状和撕裂状。片状是指死亡细胞铺展并包裹在表面结构顶部；撕裂状则是指死亡细胞被拉伸并悬挂在表面结构之间。（转载自 [Luo、2020]，《光学与激光技术》第 124 卷，Luo 等人，《飞秒激光诱导的生物相容性纳米波纹结构表面抵御细菌定殖和生物膜形成》，105973，版权归 2019年 爱思唯尔所有，经许可转载。）

从概念上讲，可以区分不同的表面粗糙度效应或纳米尺度形貌介导的效应，它们都可能导致细菌定殖减少，例如

- 杀菌效应，即表面形貌中的尖锐或纳米级尖刺状特性能够刺穿细胞膜 [Elbourne, 2017];
- 阻碍或抑制细菌细胞的增殖，例如通过对其进行空间限制 [Mahanta, 2021];
- 生物膜形成早期细菌细胞黏附减少；
- 等。

在后一种情况下，表面形貌诱导的疏水性可表现为较低的表面润湿性和较低的表面能，从而在流动条件下形成低阻力表面，最终通过降低细菌对表面的黏附强度，防止微生物在表面定殖 [Linklater，2021]。

此外，最近 Richter 等人 [Richter，2021] 证明，通过控制聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）薄膜上经紫外纳秒激光加工的亚微米级激光诱导周期性表面结构（LSFL）的空间周期，E. Coli 细菌的排斥率最高可达 ~90%。该研究指出，当表面纳米结构削弱细菌纳米纤维附属结构（如菌毛）的黏附时，排斥细菌表面的效能可得到显著提升。这些菌毛的直径通常小于 10 nm，并形成细菌与表面以及细胞间的接触，如图 21 所示的扫描电子显微镜显微图像所示。

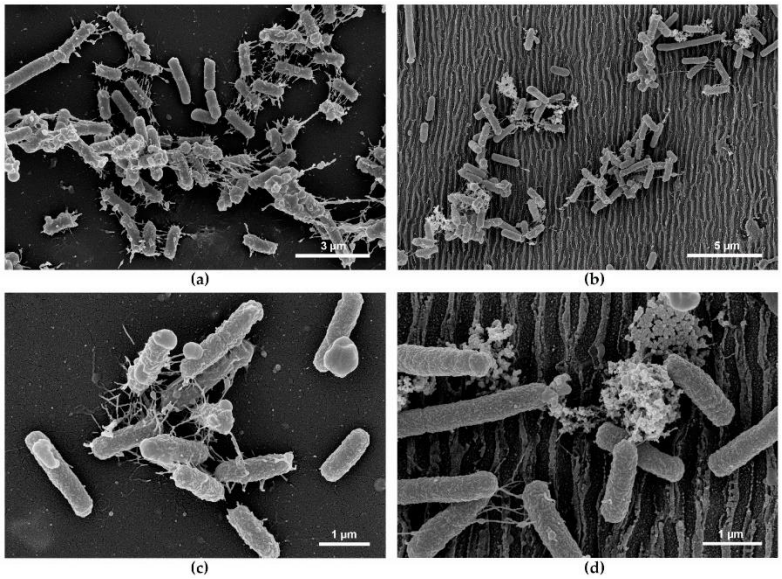


图 21：扫描电子显微镜显微图像，显示了大肠杆菌细菌在（a、c）未经辐照（平坦）的聚对苯二甲酸乙二醇酯表面，以及（b、d）覆盖有空间周期为 < 300 nm 的激光诱导周期性表面结构的激光加工结构化聚对苯二甲酸乙二醇酯表面上的分布。请注意不同的比例尺。（转载自 [Richter，2021],Richter 等人，《聚对苯二甲酸乙二醇酯表面激光诱导纳米波纹的空间周期决定了 大肠杆菌的排斥性》。《纳米材料》 **11**:3000（2021年），版权所有 © 2021年，依据知识共享署名 4.0 许可协议发布。来源：https://doi.org/10.3390/nano11113000）

必须注意的是，由于摩擦和磨损增加，某些微纳结构并不适用于关节假体中的金属-聚合物承载表面，这会导致关节假体使用寿命缩短 [van der Poel, 2019]。然而，对于静态植入物而言，激光表面织构化可提供一种控制植入物表面生物膜生长的有效技术。此外，在水性介质中，激光加工表面的表面润湿效应（见第 2.2 节液体管理与表面润湿）可能与细菌膜形成相关。

细胞生长与排列在表面添加微米

和纳米结构的另一个原因，是为了控制生物组织在植入物表面的生长与排列（另见第 31 章（Buchberger 等人）。）。对于骨组织与承载植入物（如牙科植入物或髋关节假体）之间的界面而言，加快并引导细胞生长有助于改善骨整合；而对于一些计划在一段时间后取出的其他植入物，如导管、心脏起搏器或避孕器具，则希望成纤维细胞的生长减缓 [Li, 2020a], [Heitz, 2017]。

Ti6Al4V钛合金是牙科和骨科植入物的标准材料之一，这是因为它具有优异的机械性能，例如重量轻、耐腐蚀性高且硬度高，但它也是一种生物惰性材料，其骨整合能力仍可进一步提高，以降低长期植入物失效的可能性 [Li, 2020a]。聚苯乙烯是一种

广泛用于细胞培养应用的生物材料，因其无毒性且生产成本低 [Rebollar, 2008 / Wang, 2008], 但其疏水表面会阻碍细胞黏附和生长 [Wang, 2008]。因此，相对快速、无接触的一步激光诱导周期性表面结构加工是一种可行的选择，可通过拓扑和化学变化增强生物相容性，因为它适用于广泛的材料，从强吸收金属到透明聚合物 [Heitz, 2017 / Petrovic, 2020 / Mezera, 2019]。

研究表明，钛合金和聚苯乙烯上的规则纳米结构（激光诱导周期性表面结构）可提高哺乳动物细胞的生长速率、黏附能力和密度 [Rebollar, 2008], 成骨细胞[Li, 2020a], 胶质瘤细胞 [Wang, 2008] 以及成纤维细胞 [Petrovic, 2020]。此外，细胞会沿激光诱导周期性表面结构波峰平行排列，其形状也会沿波峰方向拉长。Rebollar 等人绘制的图 22 [Rebollar, 2008] 展示了哺乳动物细胞沿聚苯乙烯表面上经纳秒紫外激光辐射加工形成的激光诱导周期性表面结构拉长并平行排列的情况。当激光诱导周期性表面结构的周期超过细胞类型特定的临界值时，便会出现这种排列现象。

相比之下，钛合金和硅片上由激光生成、覆盖纳米级激光诱导周期性表面结构的分级微米尖峰结构 [Ranella, 2010] 能够抑制成纤维细胞的生长，尤其是在激光加工后再进行阳极氧化处理时 [Heitz, 2017年 / Fosodeder, 2020年 / Lone, 2020]。Klos 等人 [Klos, 2020], 的研究表明，通过选择性组合纳米尺度的激光诱导周期性表面结构和微米尺度的尖刺，可以控制细胞生长、黏附以及向预定区域迁移。

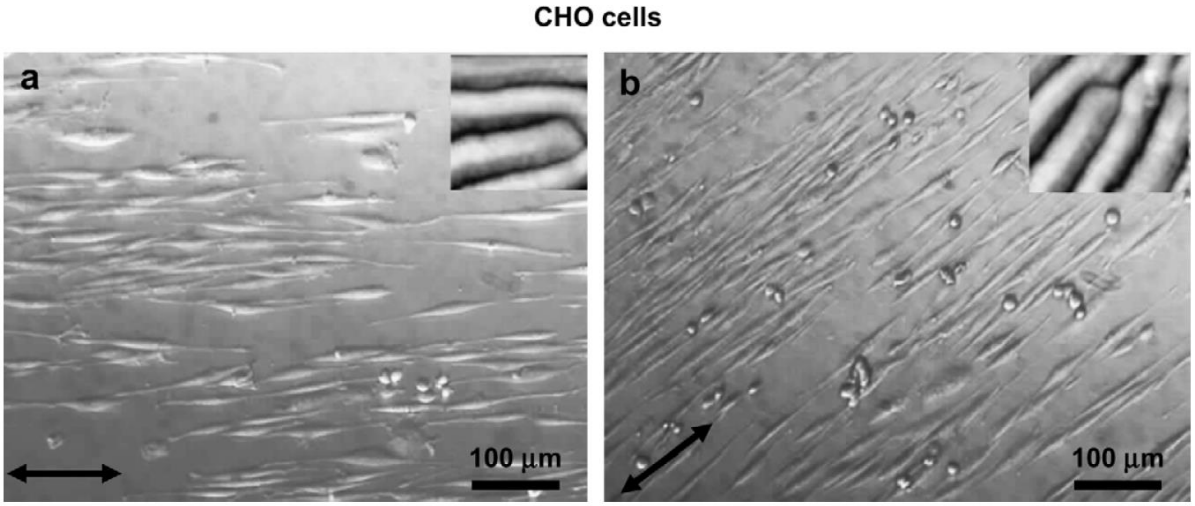


图22：在以θ = 45°入射角进行激光加工的聚苯乙烯薄膜上接种后（a）27小时和（b）52小时的CHO-K1细胞相差光学显微图。箭头表示激光诱导周期性表面结构的方向。插图中显示了激光诱导周期性表面结构纹理化聚苯乙烯薄膜的典型放大原子力显微镜图像（1.4 µm × 1.4 µm）。（转载自[Rebollar，《生物材料》，第29卷，Rebollar等，《激光纳米结构化聚苯乙烯上排列整齐的哺乳动物细胞的增殖》，1796–1806页，版权所有（2008年），经爱思唯尔许可。）

SERS芯片实验室

多位作者[Chang，2011年 / Buividas，2012年 / Li，2020年b] 证明，在合适的材料上制备激光诱导周期性表面结构有助于实现表面增强拉曼散射（SERS），与平坦样品相比，灵敏度最高可提升2000倍[Buividas，2012]。这种方法或可应用于食品安全、生物科学和生态污染领域。此外，凭借其灵活性，激光加工能够构造复杂形状[Chang，2011], 且可通过简单、精确、可控的加工过程制备流体入口、亲水表面和液体自传播结构，因此是制造SERS芯片实验室产品的理想选择。

通过单一激光加工装置制备微通道和激光诱导周期性表面结构[Li，2020年b]。此类激光加工的SERS芯片实验室示例如图所示：23 [Li，2020年b], 其中，（A）展示整个芯片的概览，（B）展示液体入口，（C）展示微通道，（D）展示经激光诱导周期性表面结构加工的SERS活性位点。

通过将这种利用激光纹理化表面对化学分析物进行空间限制和输运的概念与蒸发浓缩增强相结合，还可以进一步拓展该概念。Hu等人 [Hu, 2020] 通过对聚四氟乙烯表面进行飞秒激光加工，生成极端超疏水表面，实现了这一方法。为了对分析物液滴进行空间限制，表面保留了一些未经加工的小方形区域，作为分析物的“捕获区域”。结合分析物的蒸发浓缩，例如浓度为 10^{-6} M 的罗丹明6G染料分子，研究表明，与未经加工的表面相比，在激光加工样品上，通过SERS效应检测到的相应光谱强度最高可增强两个数量级。Pavliuk等人展示了一种易于实施的激光打印器件，用于基于SERS的超灵敏识别溶解于水滴中的各种分析物，其痕量浓度灵敏度低至 10^{-12} M [Pavliuk, 2020]。

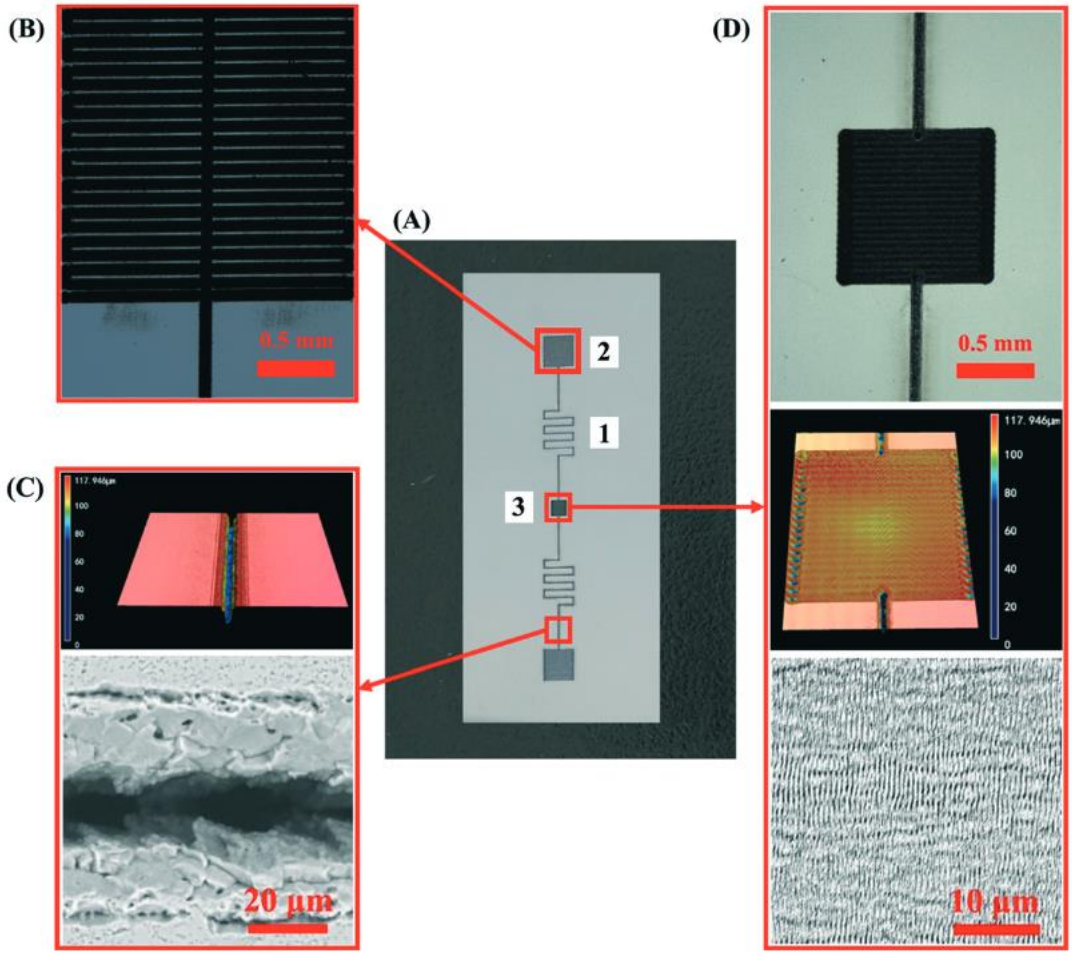


图 23：（a）整个微流控平台的照片。（b）2 × 2 mm^2 方形入口的光学图像。（c）微通道的三维形貌和扫描电子显微镜图像。（d）SERS活性位点的光学图像、三维形貌图像和扫描电子显微镜图像。（经英国皇家化学会许可转载，摘自 [Li, 2020年b], 飞秒激光加工的用于检测 Hg^{2+} 的自驱动微流控表面增强拉曼散射装置，Li, X. 等，《芯片实验室》20：414–423，2020年；许可由版权许可中心公司授予。）

2.4 摩擦学应用

本节简要概述了激光诱导周期性表面结构（LIPSS）覆盖的表面如何提供有益的摩擦学性能，例如，减小处于机械接触状态的不同固体之间的摩擦系数（CoF）或磨损，甚至实现液体润滑剂向摩擦接触区域的被动定向输运。即使摩擦系数的减小幅度在名义上较小，但如果将其累积效应计算在技术设备的整个使用寿命内，也可能具有巨大的节能（燃料）和 CO_2 减排潜力 [Holmberg, 2017]。与此同时，磨损的减小能够显著延长维护间隔，并延长设备的使用寿命。因此，LIPSS 和其他定制微结构在摩擦学领域的应用具有巨大的社会和经济潜力。

减摩抗磨

必须充分认识到，摩擦系数（CoF，通常用符号 μ 表示）或磨损率等性能并非单纯的材料性能，而必须视为系统属性 [Czichos, 2015]。摩擦学系统通常由至少两个通过表面相互接触的物体组成，接触方式可以是共形接触或非共形接触，并且局部可能形成非常复杂、甚至瞬态的（多重）接触区域。此外，两个物体之间通常会受到某些宏观力的作用（例如剪切力或法向力 F_N），同时还存在温度、湿度等其他相关环境参数。此外，摩擦学接触区域中还可能添加液态或固态润滑剂（例如石墨、润滑脂、油、水等）。两个物体之间的相对运动通常还可通过相对速度 $v_{rel,}$ 特定的行程轨迹和长度 S, 或不同的相对运动运行模式（旋转、反向、往复）以及一定数量的重复滑动循环等进一步描述。许多此类复杂条件都可以通过所谓的“摩擦磨损试验机”进行设定、控制和测试[Czichos, 2015]。

已有多位作者报道，在不同材料上覆盖激光诱导周期性表面结构的表面，于各种无润滑或有润滑的摩擦学测试条件下表现出改善的摩擦学性能 [Yu, 1999 / Mizuno, 2006 / Eichstädt, 2011 / Pfeiffer, 2013 / Bonse, 2014 / Gnilitskyi, 2019 / Ayerdi, 2019] ；此外，通过探索一些特定应用，包括改善机械密封 [Chen, 2012], 、优化切削工具的性能 [Kawasegi, 2009], 、医用植入材料 [van der Poel, 2019 / Kunz, 2020], 等，也取得了相关成果。总结这些研究，使用激光诱导周期性表面结构开展摩擦学应用的基本思路包括：(i) 改变几何接触面积或粗糙度；(ii) 将润滑剂限制在处于摩擦学接触状态的激光诱导周期性表面结构沟谷中，使其充当储液槽；(iii) 增强润滑剂在激光加工表面的润湿性；或者通过激光诱导产生(vi) 化学或(v)表面结构改性，例如氧化或石墨化，从而可能进一步提高许多商业润滑剂中所含减磨添加剂的效率。关于激光诱导周期性表面结构摩擦学性能的更多详情, 读者可参阅相关文献，例如文献 [Bonse, 2018 / Bonse, 2021]。

下面将通过图24至图27介绍三个激光诱导周期性表面结构加工表面因摩擦系数降低而表现出有益摩擦学性能的具体实例。这些结果展示了几种典型的摩擦学测试几何结构/条件，即，直线往复球-盘测试（称为往复滑动摩擦学测试，RSTT，见图24右侧）以及旋转式销-盘（图26左侧）或环-盘（图27(b)）测试。

图24总结了采用基于振镜激光扫描器的方法，在Al_2O_3- ZrO_2-Nb介电金属复合材料上加工激光诱导周期性表面结构的过程（左）。飞秒激光辐照条件经过选择，使激光诱导周期性表面结构仅形成于复合材料中细长的Nb薄片上（中）。随后，对这些激光加工样品进行线性往复滑动摩擦学测试（RSTT：反转频率为1 Hz，法向力为F_N = 1.0 N）；测试中使用直径为10 mm的抛光Al_2O_3, 球，滑动行程为S = 1 mm，滑动方向垂直于金属薄片的长轴方向，并以林格氏液作为水性润滑剂（右）[Kunz, 2020]。

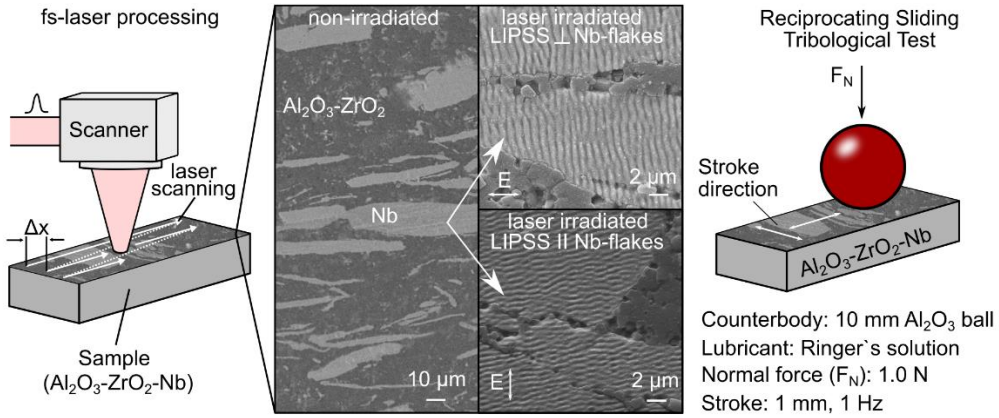


图24：对经选择性激光诱导周期性表面结构加工的Al_2O_3-ZrO_2-Nb复合材料进行飞秒激光加工及往复滑动摩擦学测试（RSTT）的示意图。（经许可转载自[Kunz, 2020], 《应用表面科学》, 第499卷，Kunz等，《采用飞秒激光诱导周期性表面结构进行选择性结构化的金属增强陶瓷复合材料的摩擦学性能》，143917，版权所有（2019年），经爱思唯尔许可。）

图 25 展示了采用飞秒激光 [1025 nm、300 fs、1 kHz] 在三种不同激光峰值能量密度下加工的样品，以及未经辐照的（抛光）参考样品的 RSTT 结果。图中显示了摩擦系数与滑动循环次数（此处最多为 1000 次）的关系，行程方向分别垂直于激光诱导周期性表面结构脊或与其平行。在这两种情况下，与抛光参考表面相比，覆盖激光诱导周期性表面结构的 Nb 薄片样品的摩擦系数均可降低最多约三倍。

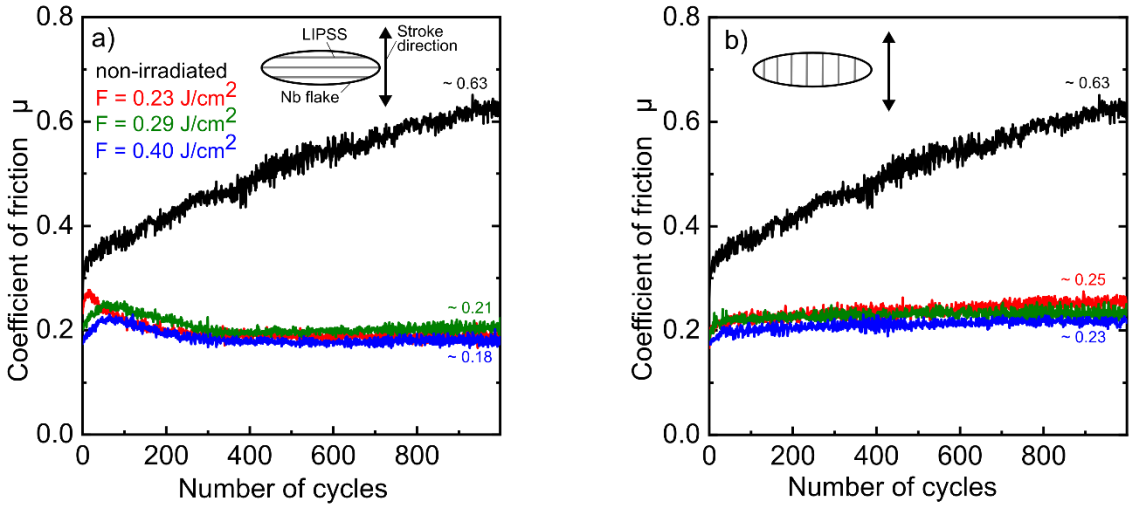


图 25：选择性构造了 LIPSS 的 Al_2O_3-ZrO_2-Nb 复合材料表面在采用三种不同峰值能量密度（0.23 J/cm², 0.29 J/cm², 0.40 J/cm²）进行飞秒激光加工后，摩擦系数（μ）随 RSTT滑动循环次数的变化，并以未辐照材料作为参照。插图标示了 LIPSS（LSFL）相对于 RSTT 中行程方向的取向（a：垂直，b：平行）。（经许可转载自 [Kunz、2020]，《应用表面科学》第 499 卷，Kunz 等人，《采用飞秒激光诱导周期性表面结构进行选择性构造的金属增强陶瓷复合材料的摩擦学性能》，143917，版权 2019，爱思唯尔。）

Gnilitskyi 等人也报道了激光诱导周期性表面结构类似的有益摩擦学效应：他们对经飞秒激光加工的 [1030 nm、213 fs、600 kHz] 初始抛光不锈钢（X5CrNi1810）样品进行了测试，采用直径 2 mm 的铬钢（100Cr6）销，在商用发动机油中作为润滑剂进行销盘试验 [F_N = 0.5 至 7.5 N，v_{rel} = 7mm/s]。图 26 展示了飞秒激光加工表面与抛光表面的所谓斯特里贝克曲线（摩擦系数与斯特里贝克数的关系），测试范围涵盖边界润滑至混合润滑状态。斯特里贝克数 SN = $\eta \times v_{rel}/P$ 考虑了油的动力黏度 η 、销与旋转盘表面之间的相对速度 v_{rel} 以及面压力 P。在整个测试的 SN 范围内，将激光诱导周期性表面结构覆盖的表面（红色空心圆）与抛光参考表面（黑色空心方块）的结果进行比较，可以在图 26(b) 中看到摩擦系数降低了 10% 至 25%。与此同时，磨损降低了 ~65% [Gnilitskyi, 2019]。

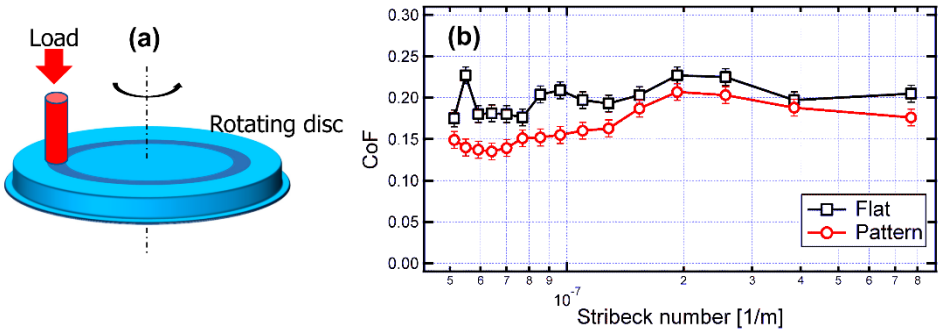


图 26：（a）销-盘摩擦学测试示意图。（b）不锈钢表面 LIPSS（LSFL，称为“图案”）的斯特里贝克曲线，并附有抛光（平坦）表面的参照曲线。（转载自[Gnilitskyi，2019]Gnilitskyi 等人，《不锈钢上的高速均匀飞秒激光图案化的摩擦学性能》，《润滑剂》（瑞士巴塞尔）7:83，版权 2019，依据知识共享署名 4.0 许可协议发布。取自https://doi.org/10.3390/lubricants7100083）。

Chen 等人也报告了激光诱导周期性表面结构带来的有益效果。[Chen, 2012], 他们在水环境下采用环盘式摩擦学测试装置（图 27(b)），研究了部分经飞秒激光处理的[800 nm、120 fs、1 kHz] 初始抛光碳化硅（SiC）表面（图 27(a)）的摩擦系数。此类完全纹理化 SiC 密封件的摩擦系数比传统抛光密封件低 ~20%（图 27(c)）。

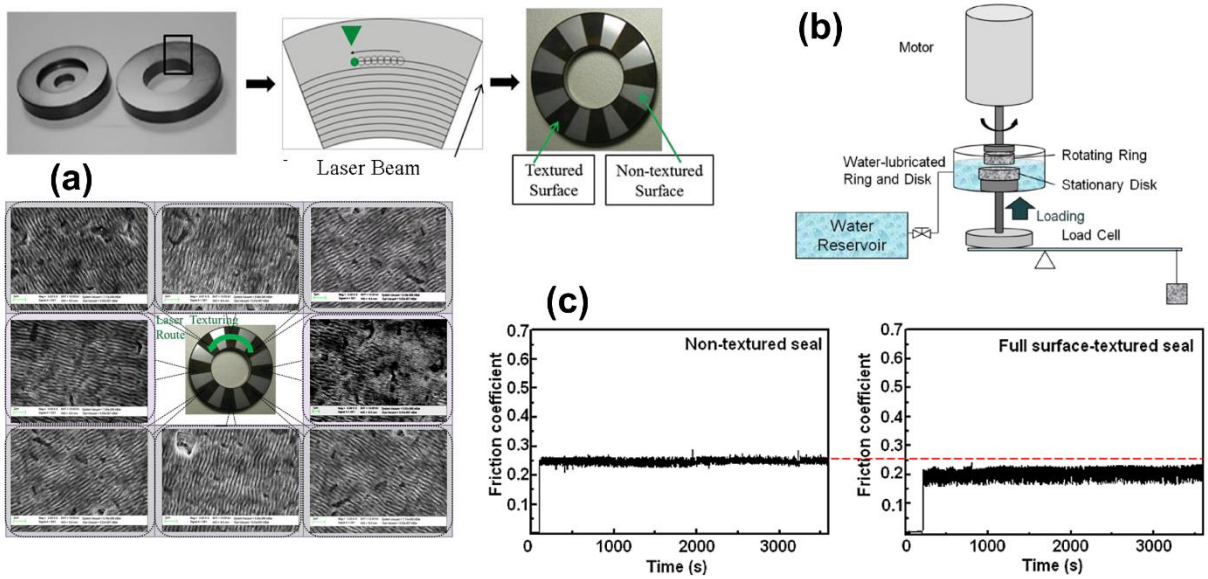


图 27: （a）由两个圆盘组成的 SiC 密封件，其中一个圆盘的八个独立区域经飞秒激光处理，形成了激光诱导周期性表面结构。（b）水润滑环盘式摩擦仪示意图。（c）非纹理化密封件（左）和激光诱导周期性表面结构纹理化密封件（右）的摩擦仪摩擦系数随运行时间的变化。图像（a）–（c）取自 [Chen 2012]。（经施普林格出版社许可转载：《应用物理 A》107:345–350（《超快激光脉冲纹理化碳化硅密封件的微观结构和润滑性能》，Chen, C.Y. 等），版权所有（2012年）。）

《润滑剂》的管理

Stark 等人 [Stark, 2019] 研究了另一种与润滑饥饿条件相关的摩擦学情形（图28）。作者通过原位光学显微镜和旋转式三球盘摩擦仪证明，在不锈钢（X90CrMoV18）表面上采用激光直接干涉图案化（DLIP；1030 nm、6 ps、400 kHz）制备的平行微通道，其周期为数微米、深度小于 1.5 µm，可将润滑剂（此处为室温下的聚α烯烃油 PAO）被动定向输送至直径为 <250 µm 的摩擦接触区域 [Stark, 2019]。该效应主要由润滑剂在微通道表面结构中的毛细力驱动（另见第 2.2 节“液体管理与表面润湿”）。

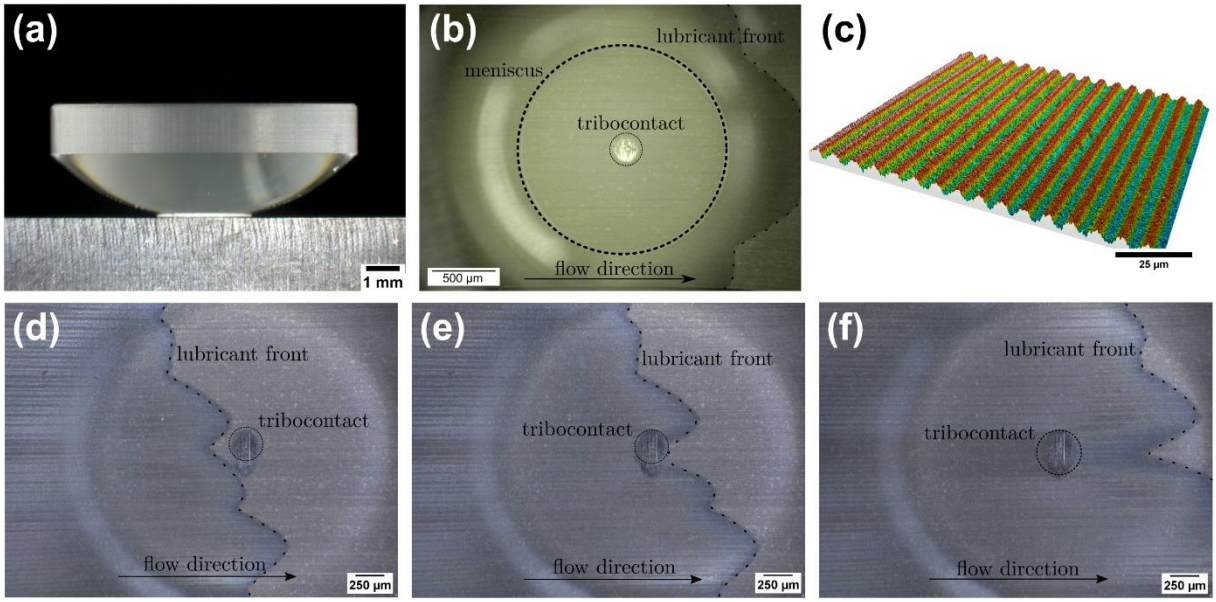


图28：（a）用于原位观察润滑剂流入摩擦接触区域（中间）的激光加工样品（下方）和透明玻璃透镜（上方）的侧视图。（b）透镜显微成像显示，摩擦接触区域（中央亮斑）位于透镜与样品之间受限的润滑剂弯月面中心。（c）ps-DLIP在不锈钢上形成的平行微通道的表面形貌，用于被动定向输运润滑剂（PAO）。（d-f）PAO在毛细力作用下，通过水平取向微通道输运至摩擦接触区域的时间演化。（转载自 [Stark、2019], Stark 等人，《通过激光纹理化表面中的主动润滑剂输运避免摩擦接触润滑剂匮乏》，《润滑剂》（瑞士巴塞尔）7:54，版权 © 2019，依据知识共享署名 4.0 许可协议转载。来源：https://doi.org/10.3390/lubricants7060054）。

2.5 能源应用

全球能源需求不断增长，这为研究人员和工程师在开发高效方法和基础设施，以采集、输送和储存能量时带来了多学科挑战。利用激光诱导周期性表面结构对材料进行激光微纳加工，是一种用途广泛的加工方法，可用于某些能源应用中的表面功能化。制造激光诱导周期性表面结构可以通过产生形貌变化来改变表面性质（增强光吸收/透射/散射，改变电导率等电子性质，或增大用于基于表面的化学过程的有效表面积），也可以通过激光能量密度调制印记引发局部化学变化。下文将讨论一系列应用，其中激光诱导周期性表面结构会影响最终材料器件的功能，包括太阳能电池、氧化铟锡掺杂物（ITO）基底上的异质导电结构、超导表面以及增强的电池储能能力。

太阳能电池

太阳能电池的制造通常需要组装至少三种以堆叠层形式排列的材料：顶部的透明电接触层、其下的掺杂半导体，最后是背面电接触层。通过加工激光诱导周期性表面结构，可以通过以下两种基本方式修改其中一种层状材料，从而提高整体效率：修改透明表面，以增加进入半导体有源层的光传输 [Knüttel，2013 / Liu，2018b /

Nigo，2020], 或在半导体活性材料中诱导局部化学变化[Cui，2016 / Rodriguez-Rodriguez, 2018]。

图 29 展示了最早在功能完整的有机太阳能电池上实现激光诱导周期性表面结构的实验之一。图 29(a) 示意了薄膜太阳能电池的一般结构。在本例中，采用输出波长为 532 nm（二次谐波）的纳秒脉冲 Nd:YAG 激光器，对预先沉积在 ITO 衬底上的聚(3-己基噻吩)薄膜（P3HT）进行激光辐照。有关层的具体化学组成和厚度的详细信息，请参见 [Cui, 2016]。通过原子力显微镜（AFM）数据表征激光诱导周期性表面结构的形貌，结果显示，平行的聚合物线状结构高度变化约为 ~100 nm，空间周期为 ~430 nm（图 29(b)）。通过电流-电压（I-V）曲线表征常规太阳能电池和基于激光诱导周期性表面结构的太阳能电池的效率（图 29(c)）。根据报告的数据，与组成和结构相同但未形成激光诱导周期性表面结构的太阳能电池相比，这种带有激光诱导周期性表面结构的太阳能电池整体效率提高了 10%。

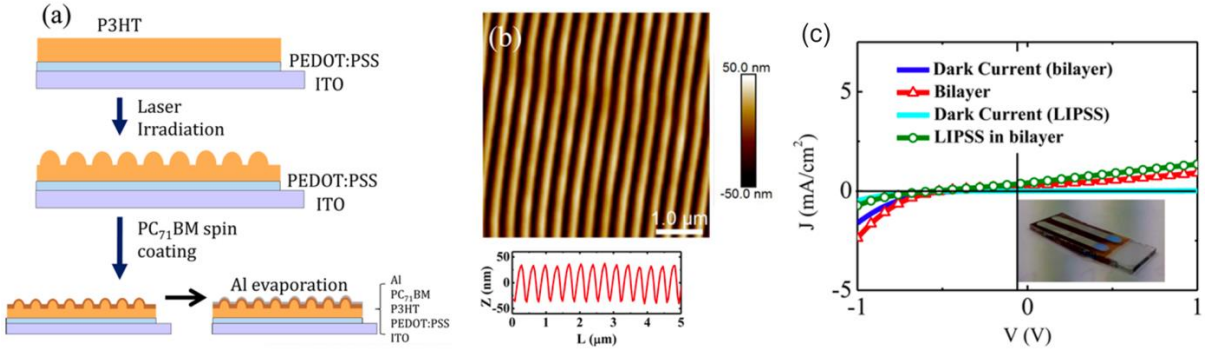


图29：（a）用于光伏表征的双层器件结构示意图；（b）激光辐照后 P3HT 表面的形貌。图像底部给出了激光诱导周期性表面结构的截面高度轮廓。（c）激光诱导周期性表面结构太阳能电池在黑暗条件和光照下的 I-V 特性。请注意，此处将电流（I）转换为电流密度 J。（经 [Cui, 2016] (Cui 等，《P3HT 及其与 $PC_{71}BM$ 光伏共混物上的激光诱导周期性表面结构》，《ACS Appl. Mater. Interfaces》8:31894–31901) 许可转载。版权归美国化学会所有（2016年）。）

各向异性电导率 y

在导电薄膜表面制造激光诱导周期性表面结构，有望制造出彼此独立、平行且周期排列的导电表面丝状结构，可用于微纳尺度的能量传输应用。已有研究报道了在沉积于玻璃上的 ITO 薄膜中制造激光诱导周期性表面结构，并通过原子力显微镜电导测量进行电学表征，证实了这一潜力 [Gutierrez-Fernandez，2020]。研究表明，导电畴向激光诱导周期性表面结构沟谷的部分偏析，可使沿其波峰方向的电导率具有优先性（各向异性）。

通过宏观和微观四探针电阻率测量进行直接电学表征的实验实现已由 [Lopez-Santos、2021]报道。在此，空间周期约为 ~900±50 nm的激光诱导周期性表面结构导致沿LIPSS取向（“Micro-L”）或横向（“Micro-T”）的电阻率差异。各向异性自然由LIPSS取向决定，而大范围的电阻率主要源于飞秒脉冲作用导致ITO层晶体结构的变化。通过四探针法进行的实际微观表征如图30(a)所示，其中微探针分别沿LIPSS取向方向和横向放置。两个区域的电流-电压（I-V）曲线

制备的 低（LF：0.64 J/cm^2）和高（HF：0.89 J/cm^2）峰值激光通量水平样品分别如图30(b)和图30(c)所示。在两幅图中，直线斜率对应于各自情况下的电阻率，显示出Micro-L和Micro-T表征之间的明显差异。特别是对于低通量样品，Micro-L构型的斜率比Micro-T构型高两倍。这些发现表明，各向异性电导率的存在是由LIPSS形貌与激光辐照引起的局部电阻率变化共同诱导的。

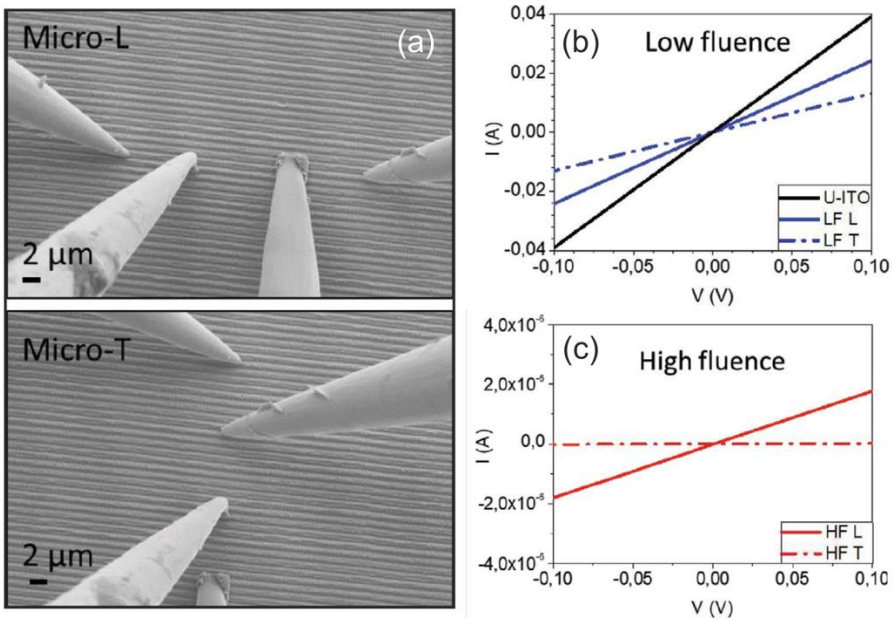


图30：(a) 微观构型四点探针测量。电极之间的实际距离根据扫描电子显微镜图像确定。指尖状金属电极被小心地放置在结构的波峰处。(b)、(c) *I-V*曲线，分别是在宏观构型下的低能量通量（LF）条件以及微观构型下的高能量通量（HF）条件下测得，电极与激光诱导周期性表面结构方向对齐，分别呈纵向（Micro-L）和横向（Micro-T）。(b)中还列出了未辐照薄膜的*I-V*曲线作为参考。（转载自[Lopez-Santos, 2021], Lopez-Santos 等人。《各向异性电阻率表面》：激光诱导纳米尺度自组织在 ITO薄膜中产生的结构，《先进光学材料》**9**：2001086，版权所有 2020年，依据知识共享署名 4.0 许可协议。取自 https://doi.org/10.1002/adom.202001086）。

表面超导性

用于制造激光诱导周期性表面结构的飞秒激光辐照可用于改变材料的磁响应。这为通过基于激光诱导周期性表面结构的表面加工技术获得最终表面性质，开辟了广阔而鲜少探索的可能性。近期研究表明，磁响应会随着包括激光诱导周期性表面结构在内的激光处理所引起的形貌和化学变化而改变 [Czajkowski，2017 / Sanchez，2020]。对于材料的磁响应起决定性作用的应用，例如表面超导性，激光诱导周期性表面结构的制备是一个重要的研究参数。

在铌等超导材料上实现 LIPSS 的情况已有报道[Cubero, 2020a / Cubero，2020b], 其中分析并报告了在低温下、施加不同幅值和取向的外部磁场时，对有无 LIPSS 的样品进行的直流（DC）磁化和交流（AC）磁化率测量。这些样品在不同气氛中制备，如图31(a)–31(d) 所示。

电学表征显示，表面超导性能与 LIPSS 取向存在相关性。事实上，发现上临界磁场H_{c2}不受 LIPSS 影响，而表面临界磁场H_{c3}在外部磁场（H）平行于 LIPSS 取向（图 31(e)）时呈现较高值。因此，可以根据表面压印结构的取向来确定优选的超导方向。有趣的是，尽管激光辐照会对表面超导性能产生影响，H_{c3} 的值几乎不受 LIPSS 周期差异的影响 [Cubero, 2020a]。

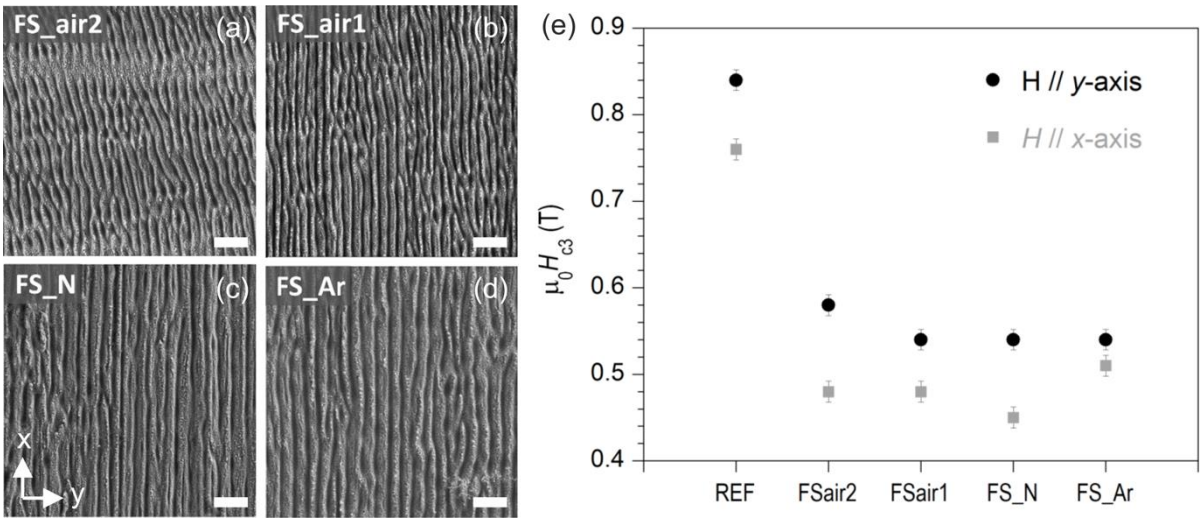


图 31：不同气态环境条件下制备的飞秒激光辐照表面的扫描电子显微镜显微图像（二次电子）：(a) 和 (b) 在空气中，(c) 在氮气中，(d) 在氩气中。所有显微图像中的比例尺均对应 2 μm。除 (a) 中的 FS_air2 外，所有样品中原始铌片材料的轧制方向均平行于 y轴；FS_air2 中则平行于 x。(e) 所有分析样品的临界表面场，$\mu_0 H_{c3}$。（转载自 [Cubero, 2020a], Cubero 等，《飞秒激光诱导周期性纳米结构对铌片表面超导性变化的影响》，《纳米材料》（瑞士巴塞尔）**10**:2025，版权所有 © 2020，依据知识共享署名 4.0 许可协议。来源：https://doi.org/10.3390/nano10122525）。

能量存储

据报道，[Neale, 2014] 通过激光诱导周期性表面结构优化镍金属电极，使其作为微型电池应用的阴极材料实现功能化。研究表明，以 4 cm^2/s 的吞吐量制造激光诱导周期性表面结构，是一种有价值且快速的单步方法，可对镍基电池电极进行可靠、可重复的微尺度表面改性。

通过扫描电子显微镜显微图像展示了制备的激光诱导周期性表面结构的形貌，如图 32(a)-32(d) 所示，其中结构的周期约为 ~1 μm。对覆盖有激光诱导周期性表面结构和未受激光照射的镍样品进行循环伏安法表征后发现，在 0.35 V 至 0.40 V 电位范围内，激光加工样品的阳极峰值电流密度（图 32(e)）是未加工镍电极对应峰值电流密度的 2.5 倍以上（25.6 mA/cm^2，而非 9.9 mA/cm^2）。这对应的净电荷密度分别为：未加工镍箔为 1.2 mC/cm^2，加工后样品为 4 mC/cm^2。这种电化学活性的提升，一方面归因于相较于未经改性的镍表面，有效表面积整体增大；另一方面则归因于氧化层增厚等化学变化，这可能有助于提升整体性能。研究还考察了不同飞秒和皮秒

激光加工条件对形成激光诱导周期性表面结构的影响，其中包括不同的激光波长（532 nm、775 nm 和 1064 nm），以确定不同表面形貌/周期对所达到的最大峰值电流密度的影响。研究表明，表面覆盖率会影响电极性能，这一点可从图 32(f) 所示的数据中看出。

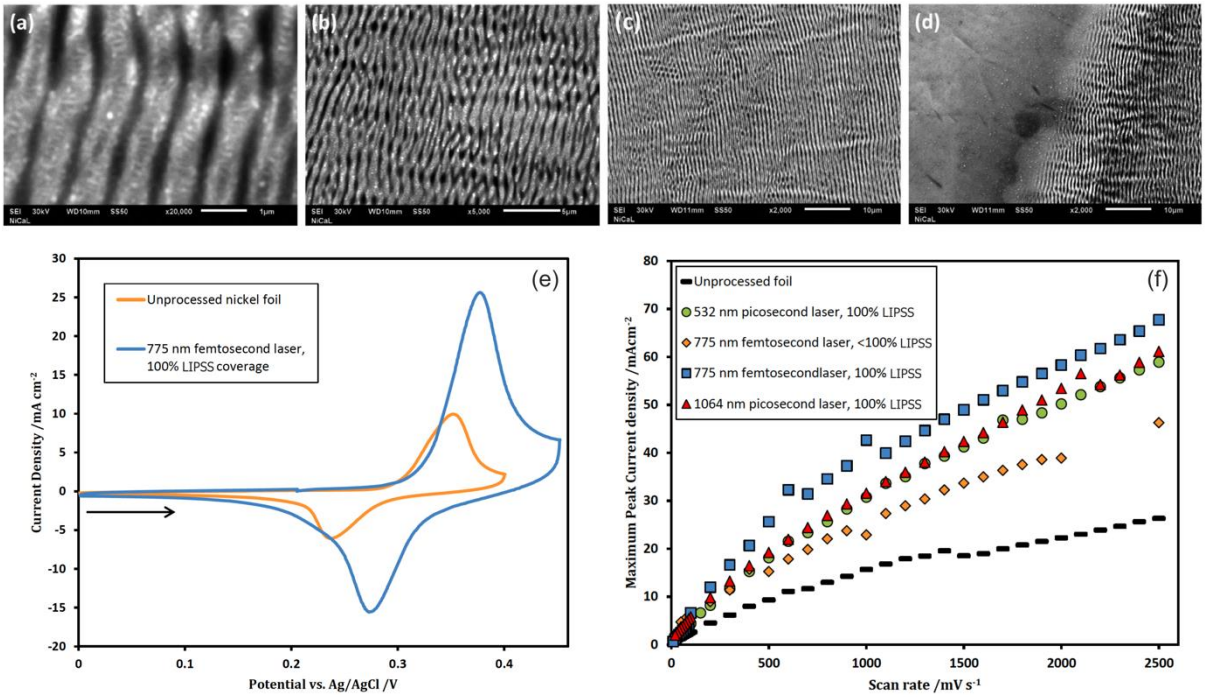


图32：（a）–（c）不同放大倍数下，采用波长为1064 nm的激光在镍表面制备的激光诱导周期性表面结构的俯视扫描电子显微图。（d）以激光加工边界为中心的扫描电子显微镜显微图，显示左侧相对平坦的未辐照镍表面和右侧的激光诱导周期性表面结构。（e）激光诱导周期性表面结构覆盖的镍电极（蓝色曲线）与作为参照的未辐照镍箔电极（橙色曲线）在500 mV/s下的循环伏安曲线。（f）所有扫描速率和辐照波长下的阳极峰值电流密度值。“% LIPSS”表示镍表面上激光诱导周期性表面结构的覆盖率。（转载自[Neale、2014], Neale等人，《激光微结构化羟基氧化镍阴极的电化学性能》，《电源杂志》271:42，版权所有2014年，依据知识共享署名3.0许可协议。取自https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.167）。

2.6 其他技术应用

本节在上述其他应用领域中，本文将讨论激光诱导周期性表面结构如何提升冲孔冲头工具的性能，以及如何改进汽油喷射喷嘴和电极的催化活性。

提升冲孔冲头工具性能

Aizawa等人[Aizawa, 2020], 证明，在冲压过程中，金刚石涂层圆柱形WC（Co）冲头工具曲面区域上的LIPSS纳米结构图案会转印到金属板冲孔的侧壁上，最终使金属板孔表面更加光滑。图33展示了扫描电子显微镜

金刚石涂层冲头工具在无LIPSS（a）和有LIPSS（b）情况下的显微图像，以及无LIPSS（c）和有LIPSS（d）冲压后金属孔表面的图像。

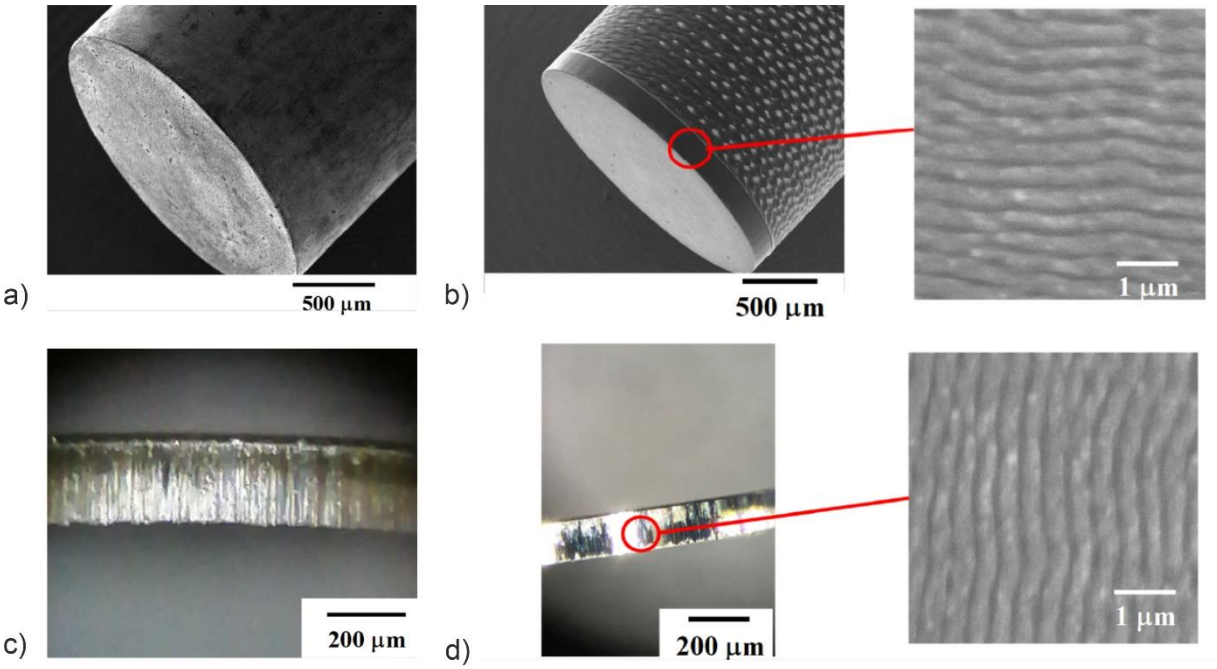


图 33：（a）未加工结构化的 CVD（化学气相沉积）金刚石涂层碳化钨冲头的扫描电子显微镜显微图；（b）激光加工结构化的 CVD（化学气相沉积）金刚石涂层碳化钨冲头的扫描电子显微镜显微图，附有激光诱导周期性表面结构入口的放大图；（c）未加工结构化的碳化钨冲头冲出的孔的侧视图，孔表面粗糙；（d）激光加工结构化的碳化钨冲头冲出的孔的侧视图，孔内有光滑区域，并附有扫描电子显微镜显微图入口的放大图，显示冲孔侧壁上压印的微结构。（转载自 [Aizawa,2020], Aizawa等人，《飞秒激光修整实现CVD金刚石涂层冲孔冲头的同步纳米织构化》，《Applied Sciences》（瑞士巴塞尔）10:2674，版权归属2020年，依据知识共享署名 4.0 许可协议。取自 https://doi.org/10.3390/app10082674）。

改进型汽油喷射喷嘴

研究表明，汽油直喷喷嘴喷孔中的激光诱导周期性表面结构可通过使平均液滴尺寸减小约10%，同时使喷雾角增大20%，从而改善燃料的雾化过程；与常规激光环切孔相比，[Romoli, 2014]。图34展示了飞秒激光钻制喷孔横截面的扫描电子显微镜显微图像，以及孔内表面相应的激光诱导周期性表面结构 [Romoli，2014]。此外，与微细电火花加工（µ-EDM）或激光微射流（LMJ）加工相比，覆有激光诱导周期性表面结构的飞秒激光钻制喷孔具有更小的表面特征；前两种工艺产生的加工相关凹坑（µ-EDM）和沟槽（LMJ）尺寸达数微米。飞秒激光加工还能形成最锐利的边缘，边缘半径小于1 µm；而微细电火花加工的边缘半径通常为2至4 µm，激光微射流加工则会产生不必要且不可控的凸起[Romoli, 2015]。

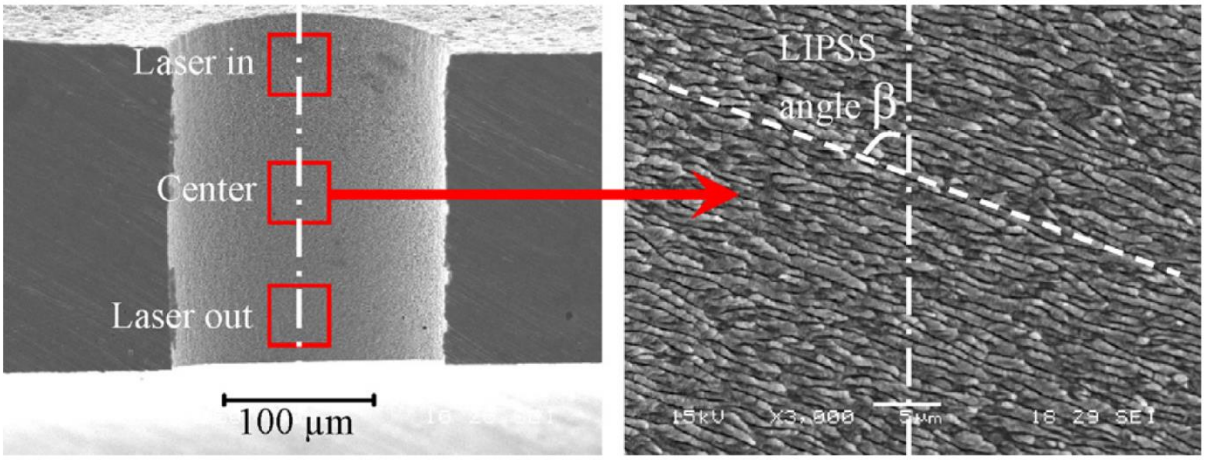


图34：飞秒激光钻制喷孔的横截面扫描电子显微镜显微图像（左）以及喷孔表面中心处放大的纳米结构（右）。（转载自[Romoli，2014]，《CIRP年刊》第63卷，Romoli等，《不锈钢微孔的超短脉冲激光钻孔与表面结构化》，第229–232页，版权所有（2014），经CIRP许可。）

催化活性增强

激光诱导周期性表面结构的制造通常会增加纳米尺度的表面粗糙度和总表面积。因此，激光诱导周期性表面结构可增强催化活性[Neale, 2014年 / Lange,2017]，，具体效果取决于界面相互作用和化学反应。Lange等人发现，激光加工铂板在氧还原反应中的电化学活性提高了1500 [Lange, 2017]倍。

3. 产业化

本小章通过简要分析现有市场细分（第3.1节“市场分析”），根据当前可用技术提供估算LIPSS生产成本的示例（第3.2节“生产成本”），并概述依托LIPSS的专利申请（第3.3节“专利状况”），从而阐述LIPSS当前的产业化现状。

3.1 市场分析

尽管人们已对激光诱导周期性表面结构及其应用进行了广泛研究，但其实用化制造仍停留在实验阶段（技术就绪度等级 TRL 3 至 5），尚未进入工业应用阶段（TRL > 5）。造成这一障碍的一个主要原因是，通过振镜扫描器将脉冲激光束扫过工件表面时，单位面积加工速率相对较低；这类扫描器的线扫描速度通常最高可达 10 m/s。然而，即将面世的新一代激光系统具备千瓦级高平均激光功率和兆赫兹级脉冲重复频率，再配合扫描速度最高可达 1000 m/s 的多面镜扫描器 [Streek, 2019]，将为实现工业级加工时间打开大门 [Fraggelakis, 2017 / Schille, 2020]。目前，激光诱导周期性表面结构的面加工速率

处于 m^2/min 级 [Schille, 2020]。不过，可以预期，未来超快激光技术的进步将实现吉赫兹级（突发）重复频率下的高能量激光脉冲 [Mishchik, 2019] 再加上先进的激光扫描器技术，并结合能够控制激光辐照材料残余热负荷的智能扫描策略，将使激光诱导周期性表面结构的面加工速率达到 m^2/s 级 [Bonse, 2020年b]。

此外，必须指出，大多数科学出版物中介绍的具体激光诱导周期性表面结构加工参数，并非针对所用激光波长和给定材料优化以实现最低总加工时间。Mezera 等人提出了一种方法，可根据所用激光器和材料预测激光加工参数，从而优化生产率。[Mezera, 2019]。

尽管如此，许多应用并不依赖大面积加工，而是需要对商品、工具等进行定制标记。一个例子是外科手术中使用的医疗工具，这些工具必须在整个使用寿命期间都可追踪，例如通过标记序列号、条形码或具有高光学对比度的数据矩阵码。针对这一应用，业界已建立一种采用超短激光生成的激光诱导周期性表面结构的工业加工工艺，称为“黑色标记”。使用含铬钢时，超快激光形成的黑化表面区域具有良好的耐腐蚀性。[Neugebauer, 2017]。

鉴于激光器市场的快速发展，值得注意的是，超短激光器的平均功率遵循一条类似于著名的摩尔定律的规律。数十年来，摩尔定律一直描述着计算机技术领域的发展：复杂度每两年翻一番。更准确地说，[Han, 2021] 指出，自 2000 年以来，超短（亚皮秒）脉冲激光器平均功率的增长可以用幂律来描述，即增长率为 $\sim 2^{Q/2}$，其中 Q 为该趋势开始以来的年数；这与 [Schille, 2021] 中提供的数据一致。

要对市场进行精准分析并做出准确预测并不容易。不过，近年来超快激光的价格一直在下降[StrategiesUnlimited, 2020] 而且，仅举一个标志性例子：据估计，未来5年，激光在精密金属加工细分市场创造的全球年收入将以9.4%的速度增长，从2019年的 ~420 百万美元增至2025年的 ~700 百万美元[StrategiesUnlimited, 2020]。考虑到其广泛的应用领域、LIPSS制造工艺正逐步扩大规模以满足工业需求、超短脉冲激光器和扫描器的成本持续下降，以及首批提供基于激光的表面功能化商业服务的公司已经出现，LIPSS成为标准工业制造技术只是时间问题。

3.2 生产成本

为了估算制造激光诱导周期性表面结构所需的单位面积总体制造成本，有必要考虑配置标准激光直写装置所需的一组基本设备和光学元件的单项成本。通常，超短脉冲激光源会发出连续的脉冲序列，脉冲经过聚焦元件后照射到目标材料的表面。最终，沉积能量

剂量 （有时称为 累积激光能量密度）由激光能量密度 ϕ_0 与照射到单位光斑面积上的有效激光脉冲数 N_{eff} 的乘积给出（$\phi_{acc} = \phi_0 \times N_{eff}$）。对于单条扫描线，在焦点处激光光斑几何形状给定时，后者由激光脉冲重复频率与扫描速度之间的关系决定（见公式（1））。在传统系统中，激光束保持静止，平移台则将样品定位在用户设定的位置并以设定速度移动。然而，高重复频率超短脉冲激光器日益普及，要求激光扫描速度达到常规机械平移台难以实现的最低值。因此，高重复频率激光器通常与快速激光扫描仪配合使用，这些扫描仪由一组独立控制的振镜或多面镜构成。随后，激光扫描系统与F-θ透镜耦合，以确保即使在较大的表面区域内也能保持相同的聚焦条件。

表1总结了给定组件的一般要求和估算价格。需要注意的是，此估算未包含运营成本（所需物理空间、能耗、保险费用、地方规章税费和操作员薪资），主要是因为这些费用取决于激光加工系统所在的国家。对于目前采用振镜或多面镜的三轴激光加工系统，按5年投资回收期估算的总成本分别为~254,000,- €和~294,000,- €。

类别	元件/设备	特性	平均价格 估算（2021年）
激光系统 **(Ls)**	高重复频率 超短脉冲激光器	红外波长，重复 频率 < 5 MHz，脉冲 能量 < 100 µJ，脉冲 持续时间 ~500 飞秒	~180,000 欧元
扫描器 **(Sc)**	a. 电流计式的 基于镜像的 扫描器 + F-theta 带 AR 的镜头 涂层	<15 米/秒	~10,000 €
	b. 多面镜- 基于.....的扫描仪	48–256 米/秒	~50,000 欧元
安全 **(Sf)**	辐射安全与 剂量控制	铅屏蔽帘、被动式 剂量计	~5,000 €
	空气过滤、排气 系统	移动站	~3,000 €
	眼部防护	护目镜	~1,000 €
维护 **(Ma)**	一般维护 和技术服务	过滤器、冷水机组制冷 液体，最终系统 优化	~5,000 欧元/年
杂项 **(Ms)**	光学元件	反射镜、镜架	~5,000 欧元
	平移台	独立的 X-Y-Z 轴	~5,000 欧元/每轴
	光学平台	带主动式的光学平台 隔离支腿	~10,000 欧元

表1：通用激光加工系统所需的元件及其市场估算价格（信息查询于 26th，2021年）。

每个光束光斑直径的有效脉冲数（$N_{\text{eff 1D}}$）、激光在材料表面的束腰半径（w_0）、激光脉冲重复频率（ν）和扫描速度（v_{scan}）之间的关系通常由公式（1）表示：

$$N_{\text{eff_1D}} = \frac{2*w_0*v}{v\text{scan}}, \qquad (1)$$

根据 [Florian，2018], 使用高重复频率激光器并采用 N_{eff_1D} = 10，可以在钢上制备低空间频率激光诱导周期性表面结构（LSFL）。取该值，并考虑激光束腰半径 w_0 = 50 μm，以及运行速度为 v_{scan} = 15 m/s 的振镜扫描器，根据公式（1），最大激光重复频率为 ν = 1.5 MHz。在这些条件下，理论上可达到 0.45 m^2/h 的吞吐量（面加工速率）。另一方面，在表面处保持相同束腰半径时，以 50 m/s 运行的常规多面体扫描器可实现 ν = 5 MHz 的激光重复频率，同时保持 N_{eff_1D} = 10，从而达到 1.5 m^2/h 的吞吐量。值得注意的是，最近的研究表明，以 950 m/s 运行的多面体扫描器在对金属进行大面积表面织构化时，面加工速率可达 ~1.5 m2/min [Schille，2020]。

在此计算中，我们假设在一个面积为 1 m × 1 m 的正方形区域内进行辐照，共包含 20,000 条长度为 1 m、宽度为 100 μm 的平行线，各线之间的线间距为 Δ= 50 μm（横向光束重叠率为 50%）。此外，对于反射镜定位时间，假设多面镜为 100 ms，振镜为 333 ms（每条线的加工时间的 ~5 倍，即 1 m/v_{scan}）。

为了估算总激光加工时间，我们考虑每年平均工作日数为 t_{year}，例如 t_{year} = 260，并假设系统平均每天运行（生产）时间为 t_{op} = 18 小时。为估算在上述指定条件下生产激光诱导周期性表面结构的<风格 id='4'>“光子成本”</风格>，我们参照 [Bonse, 2015], 采用类似的计算方式，考虑了 5 年的投资回收期（p = 5）。该计算公式列于公式（2）中，并考虑了表1中列出的成本：

$$\text{光子成本 } [€/m^2] = \text{总设备购置价格 总吞吐量} = \frac{Ls+Sc+Sf+Ma*p+Ms\left(\right.}{\frac{1200*w_0*v*\Delta}{N}\ \text{eff 1D s h}\left.\right)*t_{op}*t_{year}*p}, \qquad (2)$$

总之，对于目前典型的采用振镜扫描器的超短脉冲激光加工系统，激光诱导周期性表面结构的加工光子成本为 ~24 €/m^2, ； 采用多面体扫描器时则为 ~9 €/m^2。

3.3 专利状况

出于工业利益考虑，技术进步通常以专利而非科学论文的形式发表，以便授予该技术的

发明人和开发者知识产权，从而保护其业务。重要的是，专利公开文本与科学文献有着明显区别，尤其是因为其中涉及经济和法律利益。由于专利的授予因国家而异，且专利文件会经历不同阶段，因此本文将重点关注公众可查阅的专利申请，不论其是否已获法律批准。下表 2 列出了一些使用激光诱导周期性表面结构的已公开专利。在可能的情况下，仅提供国际 WO 专利号；若无法提供，则列出欧洲或国家专利号。此外，还说明了激光诱导周期性表面结构的申请类型。

专利号	标题	申请	发布日期
WO2004035255	环状结构形成方法及表面 治疗方法	激光诱导周期性表面结构 制造	2004年4月 29日
WO2006027850	增强薄膜黏附性的方法	表面附着	2006年3月 16日
WO2006065356	激光诱导周期性表面结构在聚合物医疗器械中的应用	抗菌 表面	2006年6月 22日
WO2007012215	一种定域结构化方法及装置，用于对.....进行定域结构化的冰 表面进行定域结构化的方法和装置	激光诱导周期性表面结构 制造	2007年2月 1日
WO2008097374	用于.....的超短时长激光方法 材料纳米结构化的超短脉冲激光方法	激光诱导周期性表面结构 制造	2008年8月 14日
CN101319347	晶体表面自组织生长 飞秒激光精细纳米结构	激光诱导周期性表面结构 制造	2008年12月 10日
US20080299408	飞秒激光脉冲表面结构化方法 及由此产生的材料	激光诱导周期性表面结构 制造	04/12/2008
WO2009090324	使用表面标记的方法和设备 受控周期性纳米结构标记表面的方法和装置	标记	23/7/2009
WO2009117451	基于激光的材料加工方法和系统	激光诱导周期性表面结构 制造	2009年9月24日
WO2012019741	用于制造压印工具的方法，以制备 微结构元件，采用超短激光脉冲	表面附着	2012年2月 16日
EP2692855	用于细胞学和/或医疗的表面结构化 应用	抗菌 表面	2013年7月 17日
US2014083984	激光诱导周期性表面结构的形成 （利用皮秒脉冲形成的）激光诱导周期性表面结构	激光诱导周期性表面结构 制造	2014年3月 27日
WO2014102008	在.....表面上制造结构的方法 工件	激光诱导周期性表面结构 制造	2014年7月 3日
WO2014111697	测量刻度	光学	24/7/2014年
WO2014111696	一种读取由周期性 偏振纳米结构表示的数据的方法	数据存储	2014年7月 24日
KR1427688*	激光加工设备和加工方法	激光诱导周期性表面结构 制造	2014年8月 1日
RU2544892	微纳结构的制造方法 材料表面	激光诱导周期性表面结构 制造	2015年3月 20日
US20150136226	超疏水表面及其制备方法 超疏水表面	表面润湿	2015年5月 21日
WO2016039419	氧化锆基的表面结构形成方法 陶瓷，以及氧化锆基陶瓷	激光诱导周期性表面结构 制造	2016年3月 17日
WO2016090496	激光诱导金属表面着色工艺， 由此产生的金属纳米结构以及 由此制成的金属制品	光学	2016年6月16日
WO2017053198	飞秒激光诱导形成单晶 图案化半导体表面	激光诱导周期性表面结构 制造	30/3/2017
WO2017063844	散射光学单元的制造方法， 散射光学单元，以及具有散射 光学单元的灯	光学	20/4/2017
WO2017153750	降低光电子产额和/或的方法 陶瓷表面的二次电子产额； 相应的设备和产品	表面 增强	14/09/2017
WO2018010707	高度规则的超快激光写入方法和系统 周期性结构	激光诱导周期性表面结构 制造	18/1/2018

US20180117797	制作疏水性轮廓表面的方法 以及由疏水性轮廓表面和设备制成的 由此产生的	表面附着	2018年3月 5日
WO2018100952	制造转印模具辊的方法，其中具有 精细周期性结构的转印模具辊的方法及转印模具辊	表面附着	2018年7月 6日
US 10,876,193	结构色的方法和设备 金属表面	光学	2019年1月 1日
CN109132998	用于诱导 采用单脉冲 纳秒激光的透明介电材料	润湿性和细胞黏附 黏附	2019年4月 1日
US20190054571	基于纳秒激光的高通量表面纳米 结构化（NHSN）工艺	激光诱导周期性表面结构 制造	2019年2月 21日
US20190168905	带有内部抗菌纹理的饮料容器	抗菌 表面	2019年6月 6日
WO2019141626	用于注塑成型工艺的模具及成型 使用模具进行加工	表面附着	2019年7月 25日
WO2019166836	利用激光降低透明固体的反射率， 涂层以及采用透明固体的设备	光学	6/9/2019年
WO2020003090	用于模制型坯的模具部件、模具 用于模制型坯的模具以及获取该部件的工艺 部件	表面附着	2020年2月 1日
WO2020012137A1	通过激光对材料表面进行纳米结构化的工艺 ；实现该工艺的组件 实施	激光诱导周期性表面结构 制造	2020年1月 16日
WO2020039217	激光制造的超亲油金属组件 具有保油性能，可实现摩擦减阻	《摩擦》 减小	2020年2月 27日
KR1020200053368	金属表面颜色实现方法及金属 其上实现有表面颜色的板材	光学	2020年5月 18日
CN111168233	在……表面诱导周期性结构的方法 利用皮秒激光处理光学玻璃	光学	2020年5月 19日
WO2020104370	传感器装置及传感器装置的制造方法 装置	表面润湿	2020年5月 28日
CN111250874	多脉冲皮秒激光诱导方法 半导体材料周期性表面结构	激光诱导周期性表面结构 制造	2020年6月 9日
US20200198063	制造透明基底的方法 导电薄膜、具有透明导电层的基底 薄膜和太阳能电池	光学	2020年6月 25日
KR102131165	采用表面反射率控制的激光打标方法	光学	2020年7月 7日
US 10,786,874 B2	飞秒激光脉冲表面结构化方法 以及由此产生的材料	激光诱导周期性表面结构 制造	2020年9月29日
US 10,876,193 B2	纳米结构材料、方法及应用	激光诱导周期性表面结构 制造	2020年12月 29日
WO2021041166	用于减轻电子反射的元件及真空 包含用于……元件的电子器件 减轻电子反射	光学	2021年3月 4日
WO2021048704	金属部件的粘接方法	表面附着	2021年3月 18日
US20210121983A1	通过以下方式对材料表面进行纳米结构化的方法 激光背景和技术背景	激光诱导周期性表面结构 制造	2021年3月 25日

表 2：汇总了描述中包含激光诱导周期性表面结构的形成过程，且专利申请权利要求中也包含相关内容的专利（专利号、标题、申请类型、发布日期）。列表按发布日期排序，范围为2004年4月至2021年4月。

4. 展望

自发现激光诱导周期性表面结构（LIPSS）逾 50 年以来，这一主题已从基础研究领域迈向产业化前阶段，目前正系统地筛选大量潜在应用——这些应用都得益于 LIPSS 丰富多样的表面功能（参见图 5，回顾本章内容）。鉴于激光和扫描器技术持续快速发展，进一步降低了 LIPSS 的生产成本，同时提高了制造速率，可以预期，在接下来的

五年里，一些激光诱导周期性表面结构（LIPSS）的工业应用将得以实现，并走进我们的日常生活。

致谢

作者感谢 Laser4Fun、CellFreeImplant、BioCombs4Nanofibers 项目，以及 LaserImplant 项目。这些项目获得了欧盟“地平线2020年”研究与创新计划的资助，资助协议编号分别为 675063（Laser4Fun，https://www.laser4fun.eu）、800832（CellFreeImplant）、862016（~~BioCombs4Nanofibers~~，http://biocombs4nanofibers.eu）和 951730（LaserImplant，http://laserimplant.eu）。C.F. 感谢玛丽·居里个人奖学金项目 FOCUSIS，该项目的资助协议编号为 844977。

参考文献

[Abere, 2016] Abere, M.J.; Zhong, M.L.; Krüger, J.; Bonse J.: 超快激光-<escape>诱导的形态转变。《MRS Bulletin》**41**, 969–974（2016年）https://doi.org/10.1557/mrs.2016.271</escape>

[Ahmmed，2016] Ahmmed, K.M.T.; Kietzig, A.-M.：激光图案化表面的减阻分层超疏水表面。《Soft Matter》**12**，4912–4922（2016年）https://doi.org/10.3390/mi5041219

[Aizawa，2020] Aizawa，T.；Tomomi，S.；Yoshihiro，K.；Tadahiko，I.：同时蕴使用飞秒激光修整在涂覆CVD金刚石的冲孔冲头上进行纳米织构化。《Applied Sciences》**10**，2674（2020年）https://doi.org/10.3390/app10082674

[Akhmanov，1985] Akhmanov，S.A.；埃梅利亚诺夫，V.I.；Koroteev, N.I.；Seminogov, V.N.：强激光辐射与半导体和金属表面的相互作用：非线性光学效应与非线性光学诊断。《Soviet Physics Uspekhi》**28**，1084–1124（1985年）https://doi.org/10.1070/PU1985v028n12ABEH003986

[Arnaldo del Cerro，2014] Arnaldo del Cerro, D.：用于微流体的金属皮秒脉冲激光微结构加工。博士学位论文。荷兰特温特大学（2014年）https://doi.org/10.3990/1.9789036537261

[Ayerdi，2019] Ayerdi, J.J.；Slachciak, N.；Llavori, I.；Zabala, A.；Aginagalde, A.；Bonse, J.；Spaltmann, D.：关于ZDDP在钛合金上飞秒激光诱导周期性表面结构与不同对偶材料间的摩擦学性能中的作用。《润滑剂》**7**，79（2019年）https://doi.org/10.3390/lubricants7090079

[Bäuerle, 2011] Bäuerle, D.《激光加工与化学》，4th 版。施普林格，柏林，2011年。https://doi.org/10.1007/978-3-642-17613-5

[Barthlott, 2017] Barthlott, M.; Mail, M.; Koch, K.：植物表面：结构与仿生创新的功能。《纳米-微米快报》**9**，23（2017年）https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1

[Birnbaum, 1965] Birnbaum, M.：红宝石激光器产生的半导体表面损伤。《应用物理学杂志》**36**，3688–3689（1965年）https://doi.org/10.1063/1.1703071

[Bonch-Bruevich，1992] Bonch-Bruevich，A.M.；Libenson，M.N.；Makin，V.S.；Trubaev, V.V.：光学中的表面电磁波。《光学工程》**31**，718–730（1992年）https://doi.org/10.1117/12.56133

[Bonse, 2009] Bonse, J.; Rosenfeld, A.; Krüger, J.: 飞秒激光脉冲辐照硅时，表面等离激元在激光诱导周期性表面结构形成中的作用。《应用物理学杂志》**106**，104910（2009年）https://doi.org/10.1063/1.3261734

[Bonse, 2012] Bonse, J.; Krüger, J.; Höhm, S.; Rosenfeld, A. 飞秒激光-诱导的周期性表面结构。激光应用期刊 **24**，042006（2012年）https://doi.org/10.2351/1.4712658

[Bonse, 2014] Bonse, J.; Koter, R.; Hartelt, M.; Spaltmann, D.; Pentzien, S.; Höhm, S.; Rosenfeld, A.; Krüger, J.: 钢和钛合金上的飞秒激光诱导周期性表面结构及其摩擦学应用。《应用物理学A》**117**，103–110（2014年）https://doi.org/10.1007/s00339-014-8229-2

[Bonse, 2015] Bonse, J.; Koter, R.; Hartelt, M.; Spaltmann, D.; Pentzien, S.; Höhm, S.; Rosenfeld, A.; Krüger, J: 钛和高韧性轴承钢上飞秒激光诱导周期性表面结构的摩擦学性能。《应用表面科学》**336**，21–27（2015年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.111

[Bonse, 2017] Bonse, J.; Höhm, S.; Kirner, S.V.; Rosenfeld, A.; Krüger, J: 激光-诱导周期性表面结构–一种经久不衰的科学主题。《IEEE精选主题量子电子学期刊》**23**，9000615（2017年）https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2614183

[Bonse, 2018] Bonse, J.; Kirner, S.V.; Griepentrog, M.; Spaltmann, D.; Krüger, J.: 用于摩擦学应用的飞秒激光表面纹理化。《材料》**11**，801（2018年）https://dx.doi.org/10.3390/ma11050801

[Bonse, 2020a] Bonse, J.; Gräf, S.: 麦克斯韦遇上马兰戈尼 – 关于各种理论的综述激光诱导周期性表面结构。《激光与光子学评论》**14**, 2000215 (2020)https://doi.org/10.1002/lpor.202000215

[Bonse, 2020年b] Bonse, J. LIPSS何去何从？—激光诱导周期性表面结构的近期趋势与未来发展。《纳米材料》**10**, 1950 (2020)https://doi.org/10.3390/nano10101950

[Bonse, 2021] Bonse, J.; Kirner, S.V.; Krüger, J.: 激光诱导周期性表面结构（LIPSS）。载于《激光微纳加工手册》；Sugioka, K.，编；施普林格：瑞士沙姆，2021年。https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_17-2

[Buividas, 2012] Buividas, R.; Stoddart, P.R.; Juodkazis, S: 激光制备的波纹用于表面增强拉曼散射的基底。《物理年鉴》**524**，L5-L10（2012年）https://doi.org/10.1002/andp.201200140

[Buividas, 2014] Buividas, R.; Mikutis, M.; Juodkazis, S: 表面和体材料结构化利用长、短激光脉冲形成波纹：最新进展。《量子电子学进展》**38**，119–156（2014年）https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.03.002

[Cassie, Baxter, 1944] Cassie, A.B.D.; Baxter, S.: 多孔表面的润湿性。《法拉第学会会刊》**40**, 546–551 (1944) https://doi.org/10.1039/TF9444000546[Chan, 2017] Chan, C.-W.; Carson, L.; Smith, G.C.; Morelli, A.; Lee, S.: 通过光纤激光表面工程增强骨科植入材料的抗菌性能。《应用表面科学》**404**, 67–81 (2017) https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.233

[Chang, 2011] Chang, H.W.; Tsai, Y.C.; Cheng, C.W.; Lin, C.Y.; Lin, Y.W.; Wu, T.M.: 采用飞秒激光制备用于表面增强拉曼散射的纳米结构化银表面。《胶体与界面科学杂志》360, 305–308 (2012年) https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.04.005[Chen, 2012] Chen, C.Y.; Chung, C.J.; Wu, B.H.; Li, W.L.; Chien, C.W.; Wu, P.H.; Cheng, C.W.: 超快激光脉冲织构化碳化硅密封件的微观结构与润滑性能。《应用物理学A》107, 345–350 (2012年) https://dx.doi.org/10.1007/s00339-012-6822-9[Comanns, 2016] Comanns, P.; Winands, K.; Pothen, M.; Bott, R.A.; Wagner, H.; Baumgartner, W.: 以德州角蜥为模型，构建用于冷却润滑剂被动定向输运的稳健毛细结构。SPIE会议论文集9797, 979711 (2016年) https://doi.org/10.1117/12.2218873[Cunha, 2016] Cunha, A.; Elie, A.-M.; Plawinski, L.; Serro, A.P.; Botelho do Rego, A.M.; Almeida, A.; Urdaci, M.C.; Durrieu, M.-C.; Vilar, R.: 钛的飞秒激光表面织构化，以降低金黄色葡萄球菌的黏附和生物膜形成。《应用表面科学》360, 485–493 (2016年) https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.102[Cubero, 2020a] Cubero, Á.; Martínez, E.; Angurel, L.A.; de la Fuente, G.F.; Navarro, R.; Legall, H.; Krüger, J.; Bonse, J.: 飞秒激光诱导周期性纳米结构对铌片表面超导性的影响。《纳米材料》10, 2525 (2020年) https://doi.org/10.3390/nano10122525[Cubero, 2020b] Cubero, A.; Martínez, E.; Angurel, L.A.; de la Fuente, G.F.; Navarro, R.; Legall, H.; Krüger, J.; Bonse, J.: 激光诱导周期性表面结构对铌超导性能的影响。《应用表面科学》 **508**, 145140 (2020年)https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145140

[Cui, 2016] Cui, J.; Rodríguez-Rodríguez, A.; Hernández, M.; García-Gutiérrez, M.C.; Nogales, A.; Castillejo, M.; Moseguí González, D.; Müller-Buschbaum, P.; Ezquerra, T.A.; Rebollar, E: 《P3HT及其与$PC_{71}BM$光伏共混物上的激光诱导周期性表面结构》。ACS Appl. Mater. Interfaces 8, 31894–31901（2016年）https://doi.org/10.1021/acsami.6b09053[Czajkowski, 2017] Czajkowski, K.; Ratzke, M.; Varlamova, O.; Reif, J.: 磁性层靶材上的飞秒激光诱导周期性表面结构：飞秒激光相互作用与磁化的作用。《应用表面科学》418, 84–87（2017年）https://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.148[Czichos, 2015] Czichos, H.; Habig, K.-H}摩擦学手册——摩擦测量学、摩擦材料、摩擦技术，4th 编；Springer Vieweg：德国威斯巴登，2015年。[Dubnack, 2020] Dubnack, O.; Kunz, C.; Gräf, S.; Müller, F.A.: 激光诱导莱顿弗罗斯特表面。《应用表面科学》532, 147407（2020年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147407[Dusser, 2010] Dusser, B.; Sagan, Z.; Soder, H.; Faure, N.; Colombier, J.-P.; Jourlin, M.; Audouard, E.: 利用超快激光脉冲可控地形成纳米结构以进行彩色标记。Opt. Express 18, 2913–2924（2010）https://doi.org/10.1364/OE.18.002913

[Elbourne, 2017] Elbourne, A; Crawford, R.J.; Ivanova, E.P.：纳米结构抗菌表面：从自然界到合成仿制品。《胶体与界面科学杂志》508, 603–616（2017年）http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.021[Epperlein, 2017] Epperlein, N.; Menzel, F.; Schwibbert, K.; Koter, R.; Bonse, J.; Sameith, J.; Krüger, J.; Toepel, J.：飞秒激光制备的纳米结构对钢表面生物膜生长的影响。《应用表面科学》418, 420–424（2017年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.174[Eichstädt, 2011] Eichstädt, J.; Römer, G.R.B.E.; Huis in't Veld, A.J.：利用激光诱导周期性表面结构实现摩擦控制。《物理学Procedia》12, 7–15（2011年）https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.099[Fadeeva, 2011] Fadeeva, E.; Truong, V.K.; Stiesch, M.; Chichkov, B.N.; Crawford, R.J.; Wang, J.; Ivanova, E.P.：飞秒激光烧蚀制备的超疏水钛表面上的细菌滞留。《朗缪尔》27, 3012–3019（2011年）https://doi.org/10.1021/la104607g[Florian, 2018] Florian, C.; Skoulas, E.; Puerto, D.; Mimidis, A.; Stratakis, E.; Solis, J.; Siegel, J.：调控飞秒激光脉冲加工钢表面的润湿性。ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 36564–36571（2018年）https://doi.org/10.1021/acsami.8b13908[Florian, 2020a] Florian, C.; Kirner, S.V.; Krüger, J.; Bonse, J.：通过激光诱导周期性表面结构进行表面功能化。J. Laser Appl. 32, 022063（2020年）https://doi.org/10.2351/7.0000103[Florian, 2020年b] Florian, C.; Déziel, J.L.; Kirner, S.V.; Siegel, J.; Bonse, J.：激光诱导氧化层在激光诱导周期性表面结构形成中的作用。《纳米材料》10, 147（2020年）。https://dx.doi.org/10.3390/nano10010147[Florian, 2020c] Florian, C.; Wonneberger, R.; Undisz, A.; Kirner, S.V.; Wasmuth, K.; Spaltmann, D.; Krüger, J.; Bonse, J.：钛合金上各种类型的飞秒激光生成表面结构形成过程中的化学效应。《应用物理学A》126, 266（2020年）。https://dx.doi.org/10.1007/s00339-020-3434-7[Fraggelakis, 2017] Fraggelakis, F.; Mincuzzi, G.; Lopez, J.; Manek-Hönninger, I.; Kling, R.：利用MHz超短激光脉冲对金属表面进行纹理化。Opt. Express 25, 18131–18139（2017年）https://doi.org/10.1364/OE.25.018131[Fraggelakis, 2018] Fraggelakis, F.; Mincuzzi, G.; Lopez, J.; Kling, R.; Manek-Hönninger, I.：利用工业飞秒激光器控制不锈钢表面微米及亚微米尺度的激光诱导表面结构。J. Laser Micro/Nanoeng. 13, 206–210（2018年）http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2018.03.0010[Fosodeder, 2020] Fosodeder, P.; Baumgartner, W.; Steinwender, C.; Hassel, A.W.; Florian, C.; Bonse, J.; Heitz, J.：钛圆柱上的排斥环可防止成纤维细胞过度生长。Adv. Opt. Technol. 9, 113–120（2020年）https://doi.org/10.1515/aot-2019-0070[Fraggelakis, 2019] Fraggelakis, F.; Mincuzzi, G.; Lopez, J.; Manek-Hönninger, I.; Kling, R.：利用双飞秒脉冲实现大面积二维激光纳米结构化的控制。《应用表面科学》470, 677–686（2019年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.106

[Gnilitskyi, 2019] Gnilitskyi, I.; Orazi, L.: 飞秒激光图案化Rota不锈钢Galileo的性能：Valentini Orazi, L.; Tribodynamics 1倍速均匀飞秒激光图案化性不锈钢生的性能。《润滑剂》7，83（2019年）https://doi.org/10.3390/lubricants7100083

[Gräf, 2020] Gräf, S.：激光诱导周期性表面结构的形成于不同材料：基础、性能与应用。Adv. Opt. Technol. **9**, 11–39（2020年）https://dx.doi.org/10.1515/aot-2019-0062

[Gregorčič, 2021] Gregorčič, P.：关于“仿生的评论 可逆切换于纳秒激光烧蚀的超疏水钛表面上的水下超疏油性/超疏气性、亲油性/亲气性及增强的抗反射性能”。ACS Appl. Mater. Inter. **13**，2117（2021年）https://doi.org/10.1021/acsami.9b23462

[Guay, 2017] Guay, J.-M.；Calà Lesina, A.；Côté, G.；Charron, M.；Poitras, D.；金属上的激光诱导等离激元色彩。Nat. Commun. **8**，16095（2017年）https://doi.org/10.1038/ncomms16095

[Gutiérrez-Fernández, 2020] Gutiérrez-Fernández, E.; Rodríguez-Rodríguez, A.; Solano, E.; García-Gutiérrez, M.-C.; Vilas-Vilela, J.L.; Rubio-Escudero, C.; Nogales, A.；Cirera, A.；Ezquerra, T.；Rebollar, E.：ITO 上 PEDOT:PSS 薄膜的激光纳米结构化：形貌、分子结构和电学性能。《应用表面科学》**509**，145350（2020年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145350

[Han, 2021] Han, M.；Smith, D.；Ng, S.H.；Anand, V.；Katkus, T.；Juodkazis, S.：超短脉冲激光器–材料–应用。会议论文集（2021年），即将出版 https://sciforum.net/manuscripts/11143/manuscript.pdf

[Hanif, 2017] Hanif, A.；Qureshi, S.；Sheikh, Z.；Rashid, H.：并发症种植牙科。《欧洲牙科杂志》**11**，135–140（2017年）https://dx.doi.org/10.4103%2Fejd.ejd_340_16

[Heitz, 2017] Heitz, J.；Plamadeala, C.；Muck, M.；Armbruster, O.；Baumgartner, W.；Weth, A.；Steinwender, C.；Blessberger, H.；Kellermair, J.；Kirner, S.V.；Krüger, J.；Bonse, J.；Gunter, A.S.；Hassel, A.W.：用于减少细胞黏附的钛基底上的飞秒激光诱导微结构。《应用物理学A》**123**，734（2017年）https://doi.org/10.1007/s00339-017-1352-0

[Hermens, 2017] Hermens, U.; Kirner, S.V.; Emonts, C.; Comanns, P.; Skoulas, E.; Mimidis, A.; Mescheder, H.; Winands, K.; Krüger, J.; Stratakis, E.; Bonse, J.：无机材料经超短激光脉冲辐照后形成的仿蜥蜴状表面结构。《应用表面科学》**418**，499–507（2017年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.112

[Holmberg, 2017] Holmberg, K.；Erdemir, A.：摩擦学对全球能量的影响消耗、成本和排放。《摩擦》**5**，263–284 (2017年) https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5

[Hu, 2020] Hu, X.; Pan, R.; Cai, M.; Liu, W.; Luo, X.; Chen, C.; Guochen, J.; Zhong, M.：用于通过蒸发浓缩增强表面增强拉曼散射检测的超快激光微纳结构超疏水特氟龙表面。Adv. Opt. Technol. **9**, 89–100（2020年）https://doi.org/10.1515/aot-2019-0072

[Hwang, 2010] Hwang, T.Y.; Guo, C.：金属上覆盖纳米结构的飞秒激光诱导周期性表面结构的角度效应。《应用物理学杂志》108，073523（2010）http://dx.doi.org/10.1063/1.3487934[Jagdheesh, 2010] Jagdheesh, R.; Pathiraj, B.; Gomez Marin, A.; Arnaldo del Cerro, D.; Lammertink, R.G.H.; Lohse, D.; Huis in 't Veld, A.J.; Römer, G.R.B.E.：用于减少层流阻力的超快激光加工疏水不锈钢表面。第11届国际激光精密微加工研讨会（LPM）会议论文集，6月7日至10日，德国斯图加特（2010）[Jagdheesh, 2011] Jagdheesh, R.; Pathiraj, B.; Karatay, E.; Römer, G.R.B.E.; Huis in ‘t Veld, A.J.：金属表面上激光诱导的纳米级超疏水结构。《朗缪尔》27，8464–8469（2011）https://doi.org/10.1021/la2011088[Karkantonis, 2020] Karkantonis, T.; Gaddam, A.; See, T.L.; Joshi, S.S.; Dimov, S.：用于食品包装应用的耐久润滑剂浸渍表面的飞秒激光诱导亚微米及多尺度表面形貌。《表面与涂层技术》399，126166（2020年）https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126166[Kawasegi, 2009] Kawasegi, N.; Sugimori, H.; Morimoto, H.; Morita, N.; Hori, I.：开发具有微米和纳米尺度纹理的切削工具以改善摩擦特性。《精密工程》33，248–254（2009）https://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.07.005[Kietzig, 2009] Kietzig, A.M.; Hatzikiriakos, S.G.; Englezos, P.：图案化超疏水金属表面。《朗缪尔》25，4821–4827（2009）https://dx.doi.org/10.1021/la8037582[Kirner, 2017a] Kirner, S.V.; Wirth, T.; Sturm, H.; Krüger, J.; Bonse, J.：钛上飞秒激光诱导周期性表面结构的纳米级分辨化学分析。《应用物理学杂志》122，10490（2017年）https://dx.doi.org/10.1063/1.4993128

[Kirner，2017年b] Kirner, S.V.; Hermens, U.; Mimidis, A.; Skoulas, E.; Florian, C.; Hischen, F.; Plamadeala, C.; Baumgartner, W.; Winands, K.; Mescheder, H.; Krüger, J.; Solis, J.; Siegel, J.; Stratakis, E.; Bonse, J.：仿生虫状表面结构及其流体输运：通过超短激光脉冲辐照钢制备。《应用物理学A》**123**，754（2017年）https://doi.org/10.1007/s00339-017-1317-3

[Kirner，2018] Kirner, S.V.; Slachciak, N.; Elert, A.M.; Griepentrog, M.; Fischer, D.; Hertwig, A.; Sahre, M.; Dörfel, I.; Sturm, H.; Pentzien, S.; Koter, R.; Spaltmann, D.; Krüger, J.; Bonse, J.：通过飞秒激光辐射、热加热或电化学阳极氧化处理的钛样品的摩擦学性能。《应用物理学A》**124**，326（2018）https://dx.doi.org/10.1007/s00339-018-1745-8[Klos，2020] Klos, A.; Sedao, X.; Itina, T.E.; Helfenstein-Didier, C.; Donnet, C.; Peyroche, S.; Vico, L.; Guignandon, A.; Dumas, V.：利用超快激光加工纳米结构图案，以控制钛合金上的细胞黏附和迁移。《纳米材料》**10**，864（2020年）https://doi.org/10.3390/nano10050864[Knüttel，2013] Knüttel, T.; Bergfeld, S.; Haas, S.：薄型表面的激光纹理加工-

薄膜硅光伏技术 — 潜在工艺的比较。激光微纳加工学报 **8**,222–229（2013年）https://doi.org/10.2961/jlmn.2013.03.0007

[Kunz, 2020] Kunz, C.; Bonse, J.; Spaltmann, D.; Neumann, C.; Turchanin, A.; Bartolomé, J.F.; Müller, F.A.; Gräf, S.: 采用飞秒激光诱导周期性表面结构选择性结构化的金属增强陶瓷复合材料的摩擦学性能。《应用表面科学》**499**, 143917（2020年）https://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143917[Lange, 2017] Lange, K.; Schulz-Ruhtenberg, M.; Caro, J.: 通过超短脉冲激光结构化设计用于氧还原催化的铂电极。化学电化学**4**, 570–576（2017年）https://doi.org/10.1002/celc.201600630[Larrañaga-Altuna, 2021] Larrañaga-Altuna, M.; Zabala, A.; Llavori, I.; Pearce, O.; Nguyen, T.D.; Caro, J.; Mescheder, H.; Endrino, J.L.; Goel, G.; Ayre, W.N.; Seenivasagam, R.K.; Tripathy, D.K.; Armstrong, J.; Goel, S.: 杀菌表面：21世纪新兴的超精密制造与材料难题。《应用物理评论》**8**, 021303（2021年）https://doi.org/10.1063/5.0028844[Li, 2020a] Li, C.; Yang, Y.; Yang, L.; Shi, Z.; Yang, P.; Cheng, G.: 体外经激光微纳结构化改性的仿生 Ti-6Al-4V 合金表面的生物活性和生物相容性。Molecules **25**, 1494（2020年）https://doi.org/10.3390/molecules25071494

[Li, 2020年b] Li, X.; Yuan, G.; Yu, W.; Xing, J.; Zou, Y.; Zhao, C.; Kong, W.; Yu, Z.; Guo, C.: 一种通过飞秒激光制造的自驱动微流控表面增强拉曼散射装置，用于检测 Hg(2+) 。Lab Chip **20**, 414–423 (2020 年)https://doi.org/10.1039/c9lc00883g

[Linklater, 2021] Linklater, D.P.; Baulin, V.A.; Juodkazis, S.; Crawford, R.J.; Stoodley, P.; Ivanova, E.P: 纳米结构表面的机械杀菌作用。《自然综述：微生物学》**19**, 8–22（2021年）https://doi.org/10.1038/s41579-020-0414-z

[Liu, 2017] Liu, Z.; Siegel, J.; Garcia-Lechuga, M.; Epicier, T.; Lefkir, Y.; Reynaud, S.; Bugnet, M.; Vocanson, F.; Solis, J.; Vitrant, G.; Destouches, N.: 通过超快激光脉冲在纳米复合层状系统中实现三维自组织。ACS Nano **11**, 5031–5040 (2017年) https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01748

[Liu, 2018a] Liu, Q.; Zhang, N.; Yang, J.; Qiao, H.; Guo, C.: 通过两束飞秒激光束的非线性光刻，在钨表面直接制备大面积纳米三角形结构阵列。Opt. Express **26**, 11718–11727 (2018)https://doi.org/10.1364/OE.26.011718

[Liu, 2018b] Liu, P.; Wang, W.; Pan, A; 向, Y.; Wang, D.: 周期性表面 <escape>使用皮秒激光在氧化铟锡薄膜表面获得的结构。Opt. Laser Technol. **106**, 259–264 (2018) https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.04.019</escape>

[Liu, 2019] Liu, H.; Lin, W.; Hong, M.: 通过激光辐照固体基底实现表面着色。APL Photonics **4**, 051101（2019年）https://doi.org/10.1063/1.5089778

[Lone, 2020] Lone, S.A.; Muck, M.; Fosodeder, P.; Mardare, C.C.; Florian, C.; Weth, A.; Krüger, J.; Steinwender, C.; Baumgartner, W.; Bonse, J.; Heitz, J.; Hassel, A.W.: 飞秒激光处理结合钛合金阳极氧化对成纤维细胞生长的影响。Phys. Stat. Sol. (a) **217**, 1900838（2020年）https://doi.org/10.1002/pssa.201900838

[Löwik, 2017] Löwik, C.A.M.; Wagenaar, F.C.; van der Weegen, W.; Poolman, R.W.; Nelissen, R.; Bulstra, S.K.; Pronk, Y.; Vermeulen, K.M.; Wouthuyzen-Bakker, M.; van den Akker-Scheek; I., Stevens, M.; Jutte, P.C.：LEAK研究：一项全国性随机对照试验的设计，旨在确定治疗初次髋关节和膝关节置换术后伤口渗漏的最佳方法。BMJ Open **7**, e018673（2017年）https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-018673

[Lopez-Santos, 2021] Lopez-Santos, C。 ；Puerto、D.；Siegel、J.；Macias-Montero, M. ；Florian, C.; Gil-Rostra, J.； López-Flores, V.； Borras, A.； González-Elipe, A.R.； Solis, J.：各向异性电阻率表面：通过激光诱导的纳米尺度自组织在ITO薄膜中制备。先进光学材料 **9**，2001086（2021年）https://doi.org/10.1002/adom.202001086

[Luo, 2020] Luo, X.；Yao, S.；Zhang, H.；Cai, M.；Liu, W.；Pan, R.；Chen, C.；Wang, X.；Wang, L.；Zhong, M.：飞秒激光诱导的生物相容性纳米波纹结构表面，可抵御细菌定殖和生物膜形成。Opt. Las. Technol.**124**，105973（2020年）https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105973

[Lutey, 2018] Lutey, A.H.A.; Gemini, L.; Romoli, L.; Lazzini, G.; Fuso, F.; Faucon, M.; Kling, R.：实现激光纹理化抗菌表面。《科学报告》**8**，10112（2018年）https://doi.org/10.1038/s41598-018-28454-2

[Mahanta, 2021] Mahanta, U.; Khandelwal, M.; Deshpande, A.S.：抗微生物表面：合成方法、适用性与展望综述。《材料科学杂志》**56**，17915–17941（2021年）。https://doi.org/10.1007/s10853-021-06404-0

[Makin，2020] Makin, V.S.; Pestov, Y.I.; Makin, R.S.：通过一系列偏振方向正交的辐射超短双脉冲，在金属表面形成六方对称性纳米结构的机制。《光谱学与光谱分析》**128**，264–268（2020年）https://doi.org/10.1134/S0030400X20020149

[Marín，2012] Marín, A.G.; Arnaldo del Cerro, D.; Römer, G.R.B.E.; Pathiraj, B; Huis in 't Veld, A.J.; Lohse, D.：《莱顿弗罗斯特微棘轮上的毛细液滴》。《流体物理学》**24**，122001（2012年）https://doi.org/10.1063/1.4768813

[Mezera，2019] Mezera，M.；Römer，G.R.B.E.：采用基于模型的优化来优化工艺参数，以制备大面积均匀的激光诱导周期性表面结构。Opt. Express **27**，6012–6029（2019年）https://doi.org/10.1364/OE.27.006012

[Mezera，2020] Mezera M.，皮秒激光诱导周期性表面结构–金属、硅和聚合物的工艺策略，博士论文，特温特大学，荷兰，2020年。https://doi.org/10.3990/1.9789036550529[Mishchik，2019] Mishchik, K.; Bonamis, G.; Qiao, J.; Lopez, J.; Audouard, E.; Mottay, E.; Hönninger, C.; Manek-Hönninger, I.：采用GHz重复频率激光光源对硅进行高效飞秒烧蚀。《光学快报》**44**，2193–2196（2019年）https://doi.org/10.1364/OL.44.002193[Milles，2019] Milles, S.; Soldera, M.; Voisiat, B.; Lasagni, A.F.：利用单尺度和多尺度周期性纹理在纯铝上制造超疏水防冰表面。《科学报告》**9**，13944（2019年）https://doi.org/10.1038/s41598-019-49615-x[Milles，2020] Milles, S.; Soldera, M.; Kuntze, T.; Lasagni, A.F.：对通过直接激光

写入和激光直接干涉图案化制造的超疏水铝表面的自清洁性能进行表征。《应用表面科学》525，146518（2020年）https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146518[Mizuno，2006] Mizuno, A.; Honda, T.; Kiuchi, J.; Iwai, Y.; Yasumaru, N.; Miyazaki, K.：具有纳米尺度周期性结构的类金刚石碳薄膜的摩擦性能。《在线摩擦学》1，44–48（2006年）https://doi.org/10.2474/trol.1.44[Müller，2020] Müller, D.W.; Lößlein, S.; Terriac, E.; Brix, K.; Siems, K.; Moeller, R.; Kautenburger, R.; Mücklich, F.：通过超短脉冲激光直接干涉图案化进行定向表面功能化，提高铜表面的抗菌效率。《先进材料界面》8，2001656（2020年）https://doi.org/10.1002/admi.202001656[Neale，2014] Neale, A.R.; Jin, Y.; Ouyang, J.; Hughes, S.; Hesp, D.; Dhanak, V.; Dearden, G.; Edwardson, S.; Hardwick, L.J.：激光微结构化羟基氧化镍阴极的电化学性能。《电源杂志》271，42–47（2014年）https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.167[Neugebauer，2017] Neugebauer, C.; Aalderink, D.; Maurer, E.; Faisst, B.; Budnicki, A.：用于外科用钢精密无腐蚀标记的超快激光器。SPIE会议录10092，1009204（2017年）https://doi.org/10.1117/12.2252029[Nigo，2020] Nigo, F.; Hashida, M.; Tsukamoto, M.; Sakabe, S.; Kusaba, M.：氯化氩准分子激光脉冲产生的激光诱导周期性表面结构对硅太阳能电池反射率和结晶度的影响。《应用物理A》126，129（2020年）https://doi.org/10.1007/s00339-020-3305-2[Nishimoto，2013] Nishimoto, S.; Bhushan, B.：具有超疏水性、超疏油性和超亲水性的仿生自清洁表面。《英国皇家化学学会进展》3，671–690（2013年）https://doi.org/10.1039/C2RA21260A[Nivas，2021] Nivas, J.J.; Amoruso, S.：硅的飞秒激光表面结构化中超波长沟槽的生成。《纳米材料》11，174（2021年）https://doi.org/10.3390/nano11010174[Papadopoulos，2019] Papadopoulos, A.; Skoulas, E.; Mimidis, A.; Perrakis, G.; Kenanakis, G.; Tsibidis, G.D.; Stratakis, E.：通过直接超快激光纳米结构化制造仿生全向减反射玻璃。《先进材料》31，1901123（2019年）https://doi.org/10.1002/adma.201901123[Pavliuk，2020] Pavliuk, G.; Pavlov, D.; Mitsai, E.; Vitrik, O.; Mironenko, A.; Zakharenko, A.; Kulinich, S.A.; Juodkazis, S.; Bratskaya, S.; Zhizhchenko, A.; Kuchmizhak, A.：通过直接激光写入制造的、带有分析物富集系统的超灵敏基于表面增强拉曼散射的等离激元传感器。《纳米材料》10，49（2020年）https://doi.org/10.3390/nano10010049[Petrovic，2020] Petrovic, S.; Perusko, D.; Mimidis, A.; Kavatzikidou, P.; Kovac, J.; Ranella, A.; Novakovic, M.; Popovic, M.; Stratakis, E.：NIH 3T3成纤维细胞对15层(Ti/Zr)/Si多层系统上激光诱导周期性表面结构的响应。《纳米材料》10，2531（2020年）https://doi.org/10.3390/nano10122531[Pfeiffer，2013] Pfeiffer, M.; Engel, A.; Gruettner, H.; Guenther, K.; Marquardt, F.; Reisse, G.; Weissmantel, S.：飞秒激光辐照导致多种金属和超硬四面体非晶碳薄膜形成波纹。《应用物理学A》110，655–659（2013年）https://doi.org/10.1007/s00339-012-7146-5

[Piccolo, 2020] Piccolo, L.; Sorgato, M.; Batal, A.; Dimov, S.; Lucchetta, G.; Masato, D.: 塑料零件功能化：通过复制变周期激光诱导周期性表面结构实现。《微型机械》11, 429 (2020) https://doi.org/10.3390/mi11040429[Ranella, 2010] Ranella, A.; Barberoglou, M.; Bakogianni, S.; Fotakis, C.; Stratakis, E.: 通过控制三维微纳硅结构的粗糙度和润湿性来调节细胞黏附。《生物材料学报》6, 2711–2720 (2010) https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.01.016[Rebollar, 2008] Rebollar, E.; Frischauf, I.; Olbrich, M.; Peterbauer, T.; Hering, S.; Preiner, J.; Hinterdorfer, P.; Romanin, C.; Heitz, J.: 排列整齐的哺乳动物细胞在激光纳米结构化聚苯乙烯上的增殖。《生物材料》29, 1796–1806 (2008) https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.12.039[Richter, 2021] Richter, A.M.; Buchberger, G.; Stifter, D.; Duchoslav, J.; Hertwig, A.; Bonse, J.; Heitz, J.; Schwibbert, K.: 聚对苯二甲酸乙二醇酯表面激光诱导纳米波纹的空间周期决定其对大肠杆菌的排斥作用。《纳米材料》11, 3000 (2021). https://doi.org/10.3390/nano11113000[Rodriguez-Rodriguez, 2018] Rodriguez-Rodriguez, A.; Rebollar, E.; Ezquerra, T.; Castillejo, M.; Garcia-Ramos, J.V.; Garcia-Gutierrez, M.C.: 激光图案化共轭聚合物：全聚合物异质结 P3HT/PCDTBT 中纳米结构形成的协同作用。《朗缪尔》34, 115–125 (2018) https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03761[Römer, 2009] Römer, G.R.B.E.; Arnaldo del Cerro, D.; Sipkema, R.C.J.; Groenendijk, M.N.W.; Huis in ‘t Veld, A.J.: 用于航空防冰应用的超短脉冲激光生成表面织构。国际激光与电光应用大会（ICALEO）会议论文集，11月2—5日，美国奥兰多，第30–37页 (2009) https://doi.org/10.2351/1.5061570[Romano, 2018] Romano, J.M.; Garcia-Giron, A.; Penchev, P.; Dimov, S.: 用于不锈钢表面功能化的激光诱导三角形亚微米织构。《应用表面科学》440, 162–169 (2018) https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.086[Romoli, 2014] Romoli, L.; Rashed, C.A.A.; Lovicu, G.; Dini, G.; Tantussi, F.; Fuso, F.; Fiaschi, M.: 不锈钢微孔的超短脉冲激光钻孔与表面结构化。《CIRP年刊》63, 229–232 (2014) https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.053[Romoli, 2015] Romoli, L.; Lovicu, G.; Rashed, C.A.A.; Dini, G.; De Sanctis, M.; Fiaschi M.: 超短脉冲激光在燃油喷嘴微钻孔过程中引起的微观结构变化。《CIRP论文集》33, 508–513 (2015) https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.064[Rudenko, 2017] Rudenko, A.; Colombier, J.-P.; Höhm, S.; Rosenfeld, A.; Krüger, J.; Bonse, J.; Itina, T.E.: 超快激光辐照电介质后，其表面和体内自发形成周期性有序结构：共同的电磁起源。《科学报告》7, 12306 (2017) https://doi.org/10.1038/s41598-017-12502-4[Rudenko, 2020] Rudenko, A.; Abou-Saleh, A.; Pigeon, F.; Mauclair, C.; Garrelie, F.; Stoian, R.; Colombier, J.-P.: 非辐射场与马兰戈尼对流不稳定性耦合作用，驱动激光激发金属表面形成高频周期性图案，《材料学报》194, 93–105 (2020) https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.058

[Sanchez, 2020] Sanchez, E.; Rodriguez-Rodriguez, G.; Aragon, R.; Arranz, M. ; Rebollar, E.; Castillejo, M.; Colino, J.: 软薄膜的各向异性工程，发表于 th e 起伏磁性态。《磁学与磁性材料杂志》514, 167149（2020年）。) https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167149[Samanta, 2020] Samanta, A.; Wang, Q.; Shaw, S.K.; Ding, H.: 化学的作用

y

用于实现极端表面润湿行为的激光纹理化金属合金改性 .
《材料与设计》192，108744（2020）
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108744[Schille, 2020] Schille, J.; Schneider, L.; Mauersberger, S.; Szokup, S.; Höhn, S.; Pötschke, J.; Reiß, F.; Leidich, E.; Löschner, U.: 用于提升摩擦学功能的高速激光表面织构化。《润滑剂》 8，33（2020）https://doi.org/10.3390/lubricants8030033[Schille, 2021] Schille, J.; Löschner U.: 高速激光微加工中的超短脉冲激光——何去何从？《先进光学技术》10，233–237（2021）https://doi.org/10.1515/aot-2021-0049[Schwibbert, 2019] Schwibbert, K.; Menzel, F.; Epperlein, N.; Bonse, J.; Krüger, J.: 细菌在飞秒激光改性聚乙烯上的黏附。《材料》12，3107（2019） https://dx.doi.org/10.3390%2Fma12193107[Selvamani, 2020] Selvamani, V.; Zareei, A.; Elkashif, A.; Maruthamuthu, M.K.; Chittiboyina, S.; Delisi, D.; Li, Z.; Cai, L.; Pol, V.G.; Seleem, M.N.; Rahimi, R.: 通过激光表面织构化制备具有增强抗菌性能的分级微/介孔铜结构。《先进材料界面》7，1901890（2020） https://doi.org/10.1002/admi.201901890[Sharma, 2019a] Sharma, N.; Vangheluwe, M.; Vocanson, F.; Cazier, A.; Bugnet, M.; Reynaud, S.; Ver meulin, A.; Destouches, N.: 用于隐藏多幅图像的激光驱动等离激元光栅。《材料视野》6，978–983（2019）https://doi.org/10.1039/C9MH00017H[Sharma, 2019b] Sharma, N.; Destouches, N.; Florian, C.; Serna, R.; Siegel, J.: 利用超短激光脉冲调控金属-介电纳米复合材料，实现二向色颜色控制。《纳米尺度》11，18779（2019）https://doi.org/10.1039/C9NR06763A[Siddiquie, 2020] Siddiquie, R.Y.; Gaddam, A.; Agrawal, A.; Dimov, S.S.; Joshi, S.S.: 飞秒激光诱导弹性体表面亚微米形貌的抗生物污损性能。《朗缪尔》36，5349–5358（2020） https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00753[Siegman, 1986] Siegman, A.E.; Fauchet, P.M.: 激光上的受激伍德异常

-

受照射表面。《IEEE》《量子电子学杂志》**22**，1384–1403（1986年） https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1073133[Singh, 2020] Singh, S.C.; ElKabbash, M.; Li, Z.; Li, X.; Regmi, B.; Madsen, M.; Jalil, S.A.; Zhan, Z.; Zhang, J.; Guo, C.: 用于光热水净化的太阳能跟踪超疏水黑色金属板。《自然·可持续性》**3**, 938–946（2020年）。https://doi.org/10.1038/s41893-020-0566-x[Sipe, 1983] Sipe, J.E.; Young, J.F.; Preston, J.S.; van Driel; H.M.: 激光诱导周期性表面结构。I. 理论。《物理评论B》**27**，1141–1154（1983年） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.27.1141

[Skolski, 2012] Skolski, J.Z.P.; Römer, G.R.B.E; Obona, J.V.; Ocelik, V.; Huis in ’t Veld, A.J.; De Hosson, J.T.M.: 《激光诱导周期性表面结构：光局域化的指纹》。Phys. Rev. B 85, 075320 (2012) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.075320[Sorgato, 2018] Sorgato, M.; Masato, D.; Lucchetta, G.; Orazi, L.: 《不同激光诱导周期性表面结构对PET注塑成型中聚合物滑移的影响》。《CIRP年刊》67, 575–578 (2018) https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.102[Stark, 2019] Stark, T.; Kiedrowski, T.; Marschall, H.; Lasagni, A.F.: 《通过激光织构化表面中的主动润滑剂输运避免摩擦接触润滑剂匮乏》。《润滑剂》7, 54 (2019) https://doi.org/10.3390/lubricants7060054[Stratakis, 2020] Stratakis, E.; Bonse, J.; Heitz, J.; Siegel, J.; Tsibidis, G.D.; Skoulas, E.; Papadopoulos, A.; Mimidis, A.; Joel, A.-C.; Comanns, P.; Krüger, J.; Florian, C.; Fuentes- Edfuf, Y.; Solis, J.; Baumgartner, W.: 《仿生表面的激光加工》。《材料科学与工程：综述》141, 100562 (2020) https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100562[StrategiesUnlimited, 2020] Strategies unlimited: 《全球激光市场——趋势与五年预测（2019–2025）》。 (2020) https://store.strategies-u.com/products/the-worldwide-market-for-lasers-market-review-and-forecast-2020.html[Streek, 2019] Streek, A.; Loeschner, U.; Liebers, R.: 《超快激光加工：高速激光微加工处理大面积基底》。《激光聚焦世界》（2019年10月） https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14039800/highrate-laser-microprocessing-handles-largearea-substrates[Tomita, 2009] Tomita, T.; Kumai, R.; Matsuo, S.; Hashimoto, S.; Yamaguchi, M.: 《硅、碳化硅和高定向热解石墨上波纹的横截面形貌轮廓》。《应用物理学A》97, 271–276 (2009) https://doi.org/10.1007/s00339-009-5364-2[Tripathy, 2017] Tripathy, A.; Sen, P.; Su, B.; Briscoe, W.H.: 《天然及仿生纳米结构杀菌表面》。《胶体与界面科学进展》248, 85–104 (2017) https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.07.030[Truong, 2012] Truong, V.K.; Webb, H.K.; Fadeeva, E.; Chichkov, B.N.; Wu, A.H.; Lamb, R.; Wang, J.Y.; Crawford, R.J.; Ivanova, E.P.: 《球状细菌在气流引导下附着于超疏水类荷叶钛表面》。《生物污损》28, 539–550 (2012) https://doi.org/10.1080/08927014.2012.694426[Tuteja, 2007] Tuteja, T.; Choi, W.; Ma, M.; Rutledge, G.C.; McKinley, G.H.; Cohen, R.E.: 《超疏油表面的设计》。《科学》318, 1618–1622 (2007) https://doi.org/10.1126/science.1148326[van der Poel, 2019] van der Poel, S.H.; Mezera, M.; Römer, G.R.B.E.; de Vries, E.G.; Matthews, D.T.A.: 《医用级钴铬钼合金上激光诱导周期性表面结构的制备：摩擦学、润湿及浸出性能》。《润滑剂》7, 70 (2019)。https://doi.org/10.3390/lubricants7080070[van Driel, 1982] van Driel, H.M.; Sipe, J.E.; Young, J.F.: 《固体上的激光诱导周期性表面结构：一种普遍现象》。《物理评论快报》49, 1955–1958 (1982) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1955

[Volpe，2020] Volpe, A.; Gaudiuso, C.; Ancona, A.: 抗结冰表面的激光制备 g 表面：综述。《纳米材料》**13**，5692（2020年）https://doi.org/10.3390/ma13245692[Vorobyev，2009a] Vorobyev, A.Y.; Makin, V.S.; Guo, C.: 黑色金属产生更明亮的光源：白炽光源发射效率显著提高。《物理评论快报》**102**，234301（2009年） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.234301[Vorobyev，2009b] Vorobyev, A. Y. and Guo, C.：金属使液体逆坡流动。《应用物理学快报》**94**，224102（2009年）。 https://doi.org/10.1063/1.3117237[Vorobyev，2013] Vorobyev, A.Y.; Guo, C.: 飞秒激光表面纳米/微结构化及其应用。《激光与光子学评论》**7**，385–407（2013年） https://doi.org/10.1002/lpor.201200017[Vorobyev，2021] Fang, R.; Zhang, X.; Zheng, J.; Pan, Z.; Yang, C.; Deng, L.; Li, R.; Lai, C.; Yan, W.; Maisotsenko, V.S.; Vorobyev, A.Y.: 高温下飞秒激光纹理化铝的超强毛细芯吸功能。《纳米材料》**11**，2964（2021年）https://doi.org/10.3390/nano11112964[Wang，2008] Wang, X.; Ohlin, C.A.; Lu, Q.; Hu, J.: 细胞定向迁移及

聚苯乙烯上三维激光诱导周期性表面结构的定向分裂。《生物材料》**29**，2049–2059 (2008)https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.12.047

[Wenzel，1936] Wenzel，R.M.：固体表面对水润湿的抵抗力。《工业与工程化学》28，988–994（1936）http://dx.doi.org/10.1021/ie50320a024[Yasumaru，2017] Yasumaru，N.；Sentoku，E.；Kiuchi，J.：飞秒激光诱导周期性表面结构上有机层的形成。《应用表面科学》405，267–272（2017年） https://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.084[Yong，2015] Yong，J.；Chen，F.；Yang，Q.；Hou，X.：飞秒激光调控固体表面的润湿性。《Soft Matter》，11，8897–8906（2015）https://www.doi.org/10.1039/c5sm02153g[Young，1805] Young，T.：论流体的内聚力。《伦敦皇家学会哲学汇刊》95，65–87（1805）https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005[Yu，1999] Yu，J.J.；Lu，Y.F.：镍磷基底上的激光诱导波纹结构。《应用表面科学》148，248–252（1999）https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00900-3[Zhang，2020] Zhang，N.；Chen，S.-C.：通过飞秒激光形成纳米结构和无质量狄拉克粒子的光学模拟物。《Opt. Express》28，36109–36121（2020年） https://doi.org/10.1364/OE.403336[Zheng，2021] Zheng，S.；Bawazir，M.；Dhall，A.；Kim，H.-E.；He，L.；Heo，J.；Hwang，G.：表面性质、细菌运动性和流体动力学条件的影响

s

关于细菌表面感知及其初始黏附。Front. Bioeng. Biotechnol. **9**, 643722 (2021年) https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.643722[Zwahr, 2019] Zwahr, C.; Helbig, R.; Werner, C.; Lasagni, A.F.：通过激光基

d

烧蚀方法。《科学报告》**9**，6721（2019年）https://doi.org/10.1038/s41598-019-43055-3