

上 篇

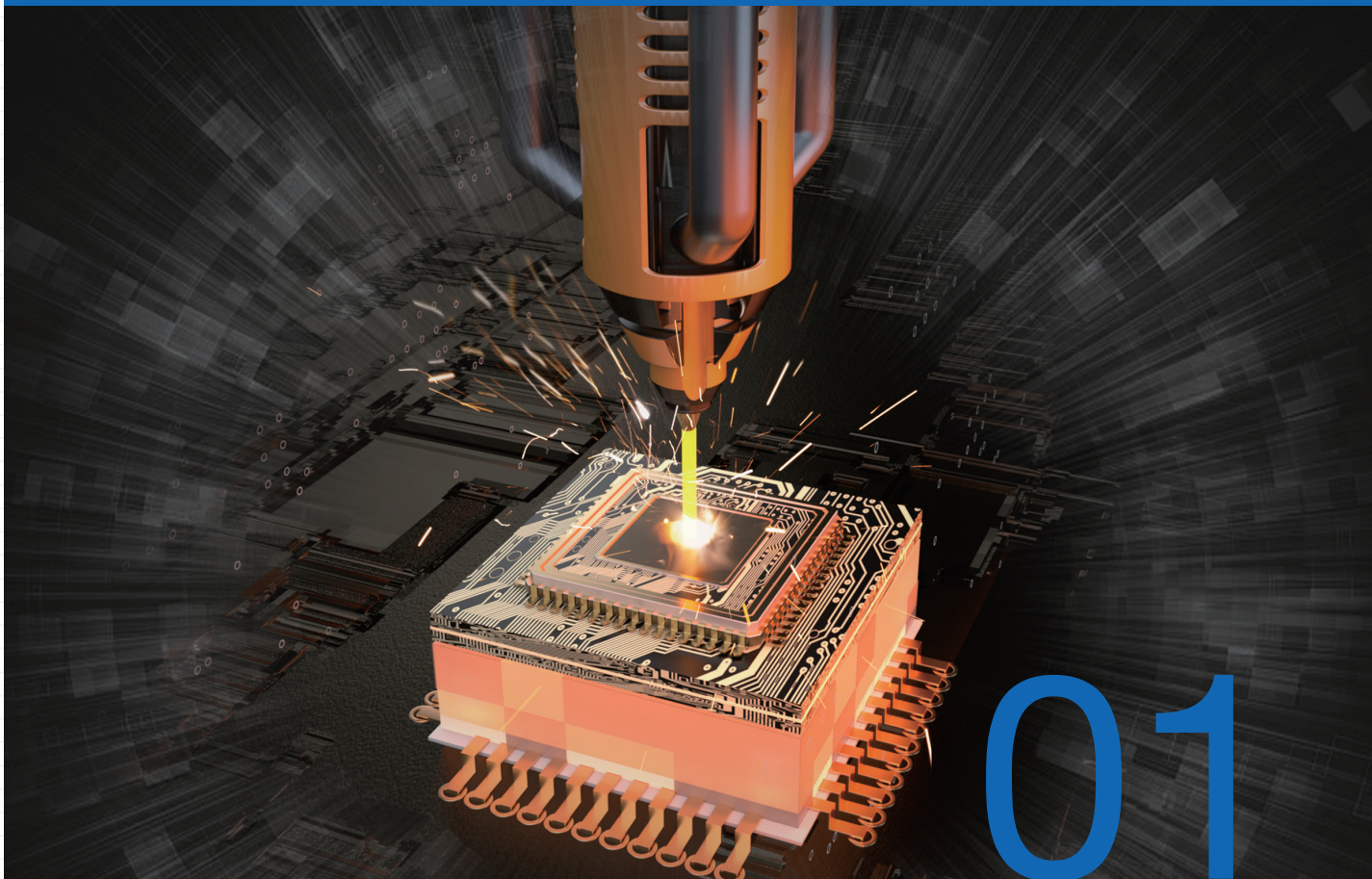
---

# 十大变革科技

Top Ten Transformative Technologies

---





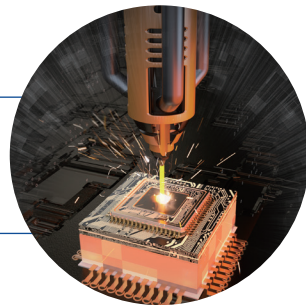
## 第 1 章

# 超快激光加工技术： 微纳制造领域的精密革命

激光制造是当前全球制造业的前沿和热点之一，以激光为工具对材料改性、去除和成形，如激光切割、焊接、打孔、3D 打印等，广泛应用于制造的各个领域。超快激光的出现则开辟了激光精密制造的新途径，超快激光具

有极大的瞬态功率和超短的作用时间，与物质作用往往形成强烈的非线性效应，可以实现金属、半导体、陶瓷、玻璃等多种材料的高分辨率、无损伤、超精密加工，为器件微型化、集成化提供关键技术支撑。

# 1.1 超快激光发展历程



## 1960

### 第一台激光器诞生

美国物理学家西奥多·哈罗德·梅曼(Theodore Harold Maiman)制造出了第一台激光器,这种激光器由宝石晶体制成,输出第一束波长为694纳米的红色激光。1960年8月,梅曼在*Nature*上发表了题为《红宝石的光散射作用》的论文。由于在激光上的贡献,梅曼获得过多个奖项,1984年入选“美国发明家名人堂”。

## 1961

### 纳秒短脉冲激光器出现

在红宝石激光器上通过调Q技术首次实现了脉冲宽度仅为几十纳秒的短脉冲激光输出,最短脉冲脉宽为10纳秒。调Q技术由于受到激光器腔长的限制( $2L/c$ ,  $L$ 为激光器谐振腔长度,  $c$ 是光速),脉冲宽度只能达到纳秒量级。

## 1962

### 第一台半导体激光器产生

美国贝尔实验室的霍耳(R. N. Hall)等人率先研制出砷化镓半导体激光器,这是世界上

第一台半导体激光器。次年,苏联也成功研制出半导体激光器。

## 1964

### 实现主动锁模纳秒级激光脉冲输出

基于相位锁定技术的进一步发展,激光器各自独立振荡的多纵模可以被调整成时间有序的纵模。通过锁模技术首次在氦氖激光器上实现了主动锁模的纳秒激光脉冲输出。

## 1970

### 实现室温连续半导体激光输出

半导体激光器实现室温下连续激发,为半导体激光器在光盘存储领域的广泛应用奠定了基础。

## 1975

### 提出激光冷却概念

科学家将可饱和染料吸收体运用在宽带可调染料激光介质体系中,首次实现了亚皮秒的超短激光脉冲输出。

## 1976

### 实现亚皮秒超短激光脉冲输出

---

汉斯 (T. W. Hänsch) 和肖洛 (A. L. Schawlow) 提出激光冷却的想法。激光冷却是利用激光和原子的相互作用减速原子运动以获得超低温原子的高新技术。

## 1981

### “超快激光”概念被广泛使用

---

碰撞脉冲锁模 (CPM) 技术的发明带来了飞秒激光的研究热潮。通过腔外压缩技术相继获得了 8 飞秒和 6 飞秒的最短脉冲世界纪录，将激光脉冲推进到了前所未有的飞秒时代。“超快激光”逐步代替了“超短脉冲激光”这一传统术语。

## 1985

### 高功率激光放大系统日趋成熟

---

1985 年，法国巴黎综合理工学院的杰拉德·穆鲁 (Gérard Mourou) 和加拿大滑铁卢大学的唐纳·史翠克兰德 (Donna Strickland) 等科学家发明了啁啾脉冲放大 (CPA) 技术，即由锁模激光振荡器产生的种子脉冲首先经过展宽器进行展宽，将其脉冲宽度增大、峰值功率降低。展宽后的脉冲进入放大器进行放大。由于此时峰值功率已经降低，可以在不破坏系统元件的情况下提取更多能量。放大后的脉冲经过压缩器进行压缩，将脉冲宽度恢复至展宽前。

由于获得了更多能量，峰值功率可以提高几个数量级。在 CPA 技术的推动下，高功率激光放大系统日趋成熟，所产生的聚焦功率密度最高达到  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>，进入了相对论光强领域。

## 1990

### 苏联成功研制出高功率半导体激光器

---

苏联成功研制出高功率半导体激光器，开始了激光大气通信系统技术的实用化研究。不久后便相继推出了 10 km 以内的半导体激光大气通信系统并在莫斯科、瓦洛涅什、图拉等城市得以应用。

## 1990s

### 自锁模技术助力超快激光发展

---

随着掺钛蓝宝石 (钛宝石) 晶体越来越多地用于激光增益介质，自锁模 (克尔透镜锁模, KLM) 可以持续运行，不仅大大简化了复杂的锁模激光结构，而且输出功率也大大超过染料飞秒激光，结合 CPA 技术，在约十年的时间里峰值功率从最初约吉瓦 (GW) 提高到了 1.5 拍瓦 (PW) 的水平，同时太瓦 (TW) 级的桌面钛宝石激光也成为许多大学实验室广泛使用的标准产品，创造了超快激光的超强时代。

## 2001

### 开启超快激光的阿秒时代

---

奥地利的费伦茨·克劳斯 (Ferenc Krausz)

研究团队等基于少周期飞秒钛宝石激光与惰性气体相互作用产生的高次谐波及振幅选通与测量技术，首次实现了单个阿秒脉冲的测量，得到了650阿秒激光，开启了超快激光的阿秒时代，成为激光历史上具有里程碑意义的重要进展。

## 2000s

### 成功研发高能量密度激光器

---

随着超快激光技术的不断发展和完善，该技术得到了广泛的应用并逐渐成熟。这个阶段的主要成果是实现了从低功率到高功率的跨越，以及光束质量的显著提高。在这个阶段，超快激光器在各个领域得到了广泛应用和认可，如工业制造、医疗、科研等领域。

随着高能量密度激光器的研发成功，超快激光技术实现了从传统光纤激光器到高能量密度激光器的跨越。这为超快激光技术的进一步发展提供了新的可能性。

## 2018

### 激光物理领域开创性的发明

---

2018年度的诺贝尔物理学奖授予“激光物理领域开创性的发明”，其中一半奖金授予美国贝尔实验室的阿瑟·阿什金 (Arthur Ashkin)，表彰他在“光镊及其在生物系统中的应用”领

域所做的开创性工作；另一半奖金由法国巴黎综合理工学院的 Gérard Mourou 和加拿大滑铁卢大学的 Donna Strickland 共同分享，以表彰他们在“产生高强度、超短光脉冲方法”方面的工作。其中，唐纳·史翠克兰德也成为了自1901年至今100多年来，第三位获得诺贝尔物理学奖的女性科学家。他们提出的啁啾脉冲放大 (Chirped Pulse Amplification, CPA) 技术为产生超短超强光脉冲提供了一种全新高效方法。

## 2023

### 阿秒光脉冲相关实验方法

---

2023年诺贝尔物理学奖被联合授予阿戈斯蒂尼 (Pierre Agostini)、克劳斯 (Ferenc Krausz) 和吕利耶 (Anne L'Huillier)，以表彰他们创造了产生阿秒光脉冲的实验方法用来研究原子、分子和物质中的电子动力学。瓦里拉斯 (Rocio Borrego Varillas)、卢基尼 (Matteo Lucchini) 和尼索利 (Mauro Nisoli) 发表了一篇全面的综述文章，描述了获奖者的研究对他们工作的促进作用：在利用强大的激光效应将探测时间范围放到阿秒尺度时，他们可以看到电子在原子、分子和物质的凝聚相中的移动过程。2023年的诺贝尔物理学奖打开了海森堡无法想象的窗口，可以探索以前无法观察到的现象。

# 1.2 超快激光制备微纳二级功能化表面

自然界的奇观如出淤泥而不染的荷叶、雨后飞行的蜻蜓翅膀以及人类眼睛角膜，它们表面的独特微纳结构赋予其超疏水、超亲水以及优异的生物兼容性等非凡特性。探索如何通过制备出类似的微纳米结构，以实现模仿甚至超越自然界的功能，成为材料科学和制造技术领域的一项关键挑战。超快激光加工技术作为一种灵活、高效、高精度的制备手段，在微纳结构的制备与调控中展现出诸多独特的优势。大量的研究者深入开展了超快激光在微米与纳米尺度结构制备领域的拓展研究，并针对仿生微纳结构的功能化进行了系统探索，创新性地发展了一系列超快激光微纳结构制备技术及精确调控新策略，为超疏水、高抗反射、高灵敏度以及生物医学检测等领域开创了前所未有的应用前景。

## 1.2.1 引言

纳米尺度的材料因其独特的物理化学性质，如显著的尺寸依赖效应、增强的表面活性以及量子尺寸效应，被广泛认为是推动技术创新的关键材料。在众多纳米材料中，表面微纳米功能结构材料因其表面的微观凸起或凹陷结构而备受关注<sup>[1, 2]</sup>。这些结构的精细调控使材料展现出一系列独特的物理化学性能，包括但不限于超疏水性、自清洁功能以及卓越的光学吸收特性。受到生物界中广泛存在的微纳米结构的

启发，科研人员正在研究如何借鉴自然界的策略，以开发具有仿生特征的微纳米功能结构。此类研究不仅为微电子工程、生物检测技术以及太阳能转换系统等领域提供了创新的解决方案，而且开辟了纳米材料应用的新领域，有望推动相关行业的技术进步。

超短脉冲激光，其脉冲持续时间介于数十飞秒至数十皮秒之间，以其极高的峰值功率密度、短暂的脉冲周期等特性，成为微纳米尺度加工领域的理想工具。在清华大学材料学院激光材料加工研究中心，经过十余年的深入研究，科研团队成功开发了多种超快激光微纳结构制备技术，涵盖纳米波纹、纳米颗粒、纳米菜花状等多种复杂结构。这些通过超快激光技术制备的微纳米结构在多个领域展现了其创新性的应用潜力，包括但不限于超疏水表面的宏量制备、超疏水-超亲水表面的图案化构造、水分解制氢及制氧用微纳米电极等方面。这些研究成果不仅为科学探索提供了坚实的理论和技術基础，也为实际应用开发了多项创新技术，极大地推动了超快激光在纳米与微米结构制备领域的技术进步。

## 1.2.2 超快激光调控微纳结构表面润湿性

### 1.2.2.1 超快激光制备高 Cassie 稳定性超疏水表面与抗结冰性能

特殊浸润性表面，如超亲水性、超疏水性、

超双疏性以及超滑性表面，其独特的润湿行为是通过精心设计的微纳结构来实现的。在这些表面性质的精确调控方面，超快激光技术已经证实是一种在毫米、微米乃至纳米尺度上实现高度控制的先进手段。该技术能够在微观层面上精细调整表面形态，从而赋予材料所需的浸润性特征，为表面工程领域提供了新的研究方向和技术途径。

清华大学钟敏霖教授领导的研究团队通过结合超快激光加工与热氧化技术，成功开发了一种具有三级微纳结构的超疏水表面，该表面的微观构造由微米级的柱状阵列、纳米级的草状结构以及微米级的花状结构组成。所以命名为MNGF (microcone, nanograsses, microflowers) 表面。MNGF 表面展现出极高的 Cassie 状态超疏水稳定性，其 Cassie-Wenzel 转变的临界拉普拉斯压力达到了 1450 Pa。同时，该表面的防结冰性能同样显著，表现为液滴的迅速滚落、优异的低温耐湿性以及非均匀形核的显著延迟。在低温环境下，微纳结构中的稳定气囊增加了液体与固体表面之间的热阻抗，有效减缓了结冰过程。此外，MNGF 表面的疏冰性能亦十分突出，其冰粘附强度低至 1.7 kPa，这在已知超疏水表

面中属于最低的冰粘附强度之一。

### 1.2.2.2 超亲水 / 超疏水叶脉状图案化高效集水表面

在水资源日益紧张的背景下，科研工作者深入探究了自然界中的水收集机制。生物如甲壳虫和仙人掌展示的高效水收集策略，为开发新型集水表面的设计提供了有益的启示。研究团队借助超快激光技术，设计并实现了一种具有超亲水和超疏水特性的叶脉网络结构 (图 1-1)，该结构融合了甲壳虫的亲疏水性特征和仙人掌的不对称结构特点<sup>[3]</sup>。紫荆花叶片的网状叶脉结构，作为一种典型的被子植物叶脉系统，包含多级叶脉结构。其中，一、二级叶脉构成主叶脉，呈枝状分布，其主要功能是将光合作用的产物输送到叶片其他需要养分的部位；而三、四级叶脉作为次级叶脉，从主叶脉周围延伸形成网络，负责收集叶片光合作用的多余产物。超亲 / 超疏叶脉网络集水系统借鉴了被子植物叶脉网络的工作原理，采用甲壳虫式的亲 / 疏水结构模拟三、四级叶脉，以实现水分的收集。同时，利用仙人掌式的不对称结构模

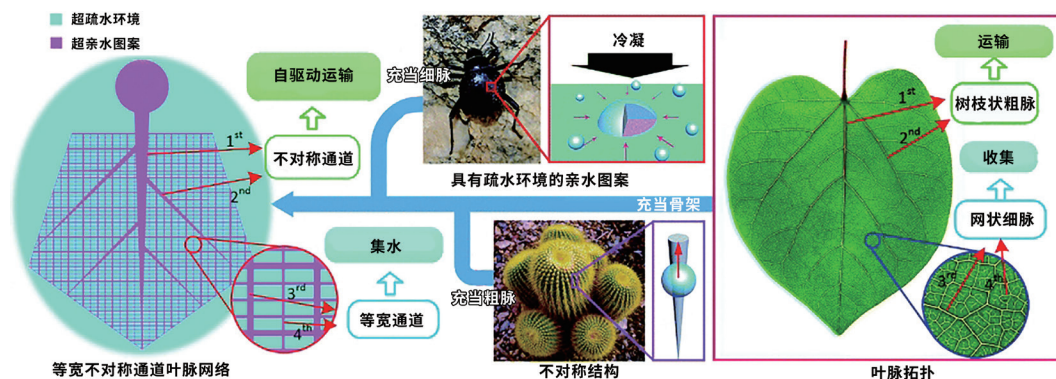


图 1-1 超亲 / 超疏叶脉网络高效集水方案

拟一、二级叶脉，负责将三、四级叶脉收集的水分定向输送。这种四级叶脉结构的相互协作，能够将系统收集到的水分有效地传输至叶脉系统的根部。

## 1.2.3 超快激光制备高抗反射金属微纳表面

### 1.2.3.1 超快激光分级调控微纳复合结构以及高抗反射金属表面

传统的金属表面吸收的增强通常依赖于表面等离子激元的激发和局域等离子激元共振的生成，然而这种方法的吸收光谱范围存在一定的局限性。为了突破这一限制，研究人员提出了一种新型的超快激光直写技术，该技术通过结合多次快速扫描和单次慢扫描两种不同的加工策略，实现了对金属表面微米及纳米结构的分级精确调控。在超快激光直写过程中，高能量的激光束通过烧蚀作用、等离子体生成以及纳米颗粒的沉积等复杂物理过程，对金属表面进行精细加工。多次快速扫描策略形成了有序的微米锥阵列结构，而单次慢扫描则导致了纳米颗粒的密集沉积。这种复合加工方法结合了两种扫描模式的优势，既控制了微米颗粒的形态和尺寸，也同步调节了表面纳米颗粒的尺寸和数量<sup>[4]</sup>。

采用这种超快激光分级调控技术，所制备的金属表面呈现出有序的微米锥阵列和富含纳米颗粒的微纳复合结构。与传统的表面结构相比，这种新型表面的抗反射性能得到了显著提高。实验测试数据表明，通过这种技术制备的铜（Cu）、钛（Ti）和钨（W）等金属表面，在紫外至近红外宽波段范围内的最小反射率分别低至 1.4%、

0.29% 和 2.5%，展现了卓越的光吸收性能。

### 1.2.3.2 菜花状微纳结构表面及高效光热转化效率

在追求太阳能高效吸收与光热转换效率的过程中，超快激光直写技术开辟了一种新颖的制备途径。研究者利用该技术在铜质基底上成功制备了具有菜花状微纳分级特征的表面结构<sup>[4]</sup>。该结构不仅在视觉上呈现出独特的深黑色外观，而且在微观尺度上展现了复杂的多级形态，从有序的微米锥到菜花状的层次结构（图 1-2），共同构成了卓越的抗反射特性。与市售的蓝色薄膜相比，这种菜花状的微纳米结构在整个光谱范围内展现了卓越的抗反射性能，其吸光效率高达 98% 左右。更为显著的是，随着入射角度的增大，该结构的抗反射优势愈发突出，在所有测试的入射角度下均保持了较低的反射率，证实了其全角度高抗反射的特性。

为了评估其在实际应用中的表现，将该菜花状结构应用于水蒸发实验。实验数据表明，与其他表面结构相比，菜花状结构在光热转换效率上表现卓越，达到了约 62%。这表明该结构不仅能够高效吸收光能，还能有效地将其转换为热能，并迅速传递至周围介质。

## 1.2.4 超快激光制备纳米结构用于电催化

超快激光直写技术制备的菜花状微纳米结构表面，以其优异的抗反射性能和高效的光热转换效率，为太阳能利用和光热转换领域贡献了一种创新且实用的技术方案。

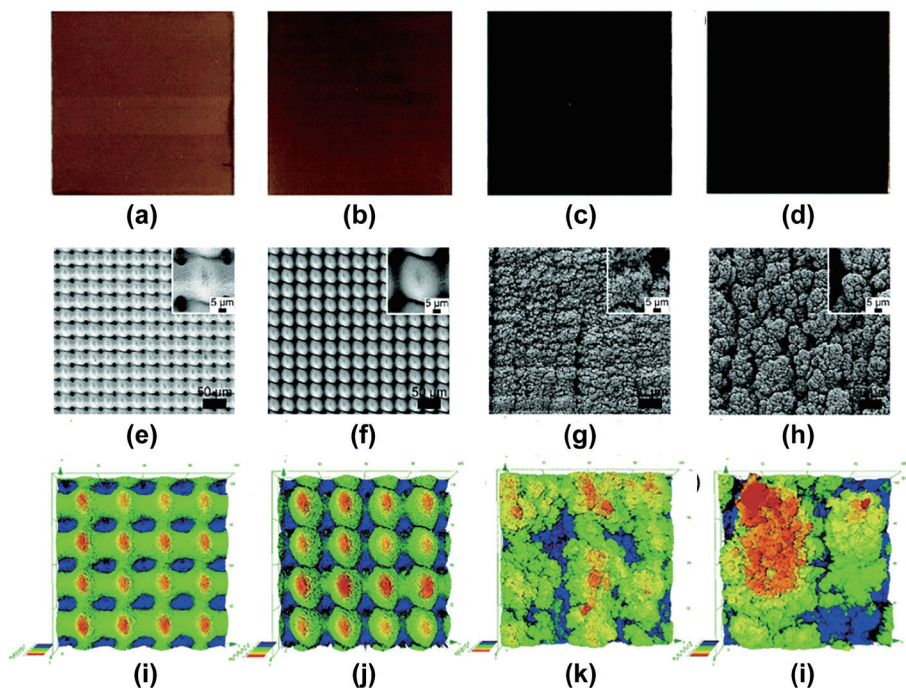


图 1-2 不同微纳米结构表面的宏观和微观形貌

(a)~(d) 光学照片; (e)~(h) SEM 照片; (i)~(l) 激光共聚焦 3D 图像; (a)、(e)、(i) 结构 1; (b)、(f)、(j) 结构 2; (c)、(g)、(k) 结构 3; (d)、(h)、(l) 结构 4, 菜花状微纳米分级结构

#### 1.2.4.1 纳米颗粒结构的激光制备与 OER 性能

为了提升电解水制氢技术的效率, 研究团队利用超快激光直写技术成功合成了一种镍掺杂的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子团簇 (Ni-Fe-O 团簇)。该团簇结构独特, 呈现多孔特性, 由相互连接的纳米颗粒构成, 其平均粒径约为 5 纳米。在激光辐射的作用下, 材料经历了熔化与再沉积过程, 从而形成了这种高度无序的镍掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子团簇。Ni-Fe-O 团簇在析氧催化反应中展现了显著的活性, 特点为较低的 Tafel 斜率 (39.4 mV/dec) 和优良的操作稳定性, 在连续运行 18 小时后, 其催化活性未见明显衰减。在电流密度达到  $10 \text{ mA/cm}^2$  的条件下, 该结构能够实现 272 mV 的过电压。由此, 超快激光技

术制备的 Ni-Fe-O 团簇结构为电解水过程中的析氧反应提供了一种高效且持久的催化剂。

#### 1.2.4.2 三维多级微纳结构的激光调控与 HER 性能

通过飞秒激光烧蚀技术处理金属钨 (W), 研究者成功制备了有序的、周期性约为 50 微米的微米锥阵列结构。在此结构基础上, 进一步构筑了分层的三维自支撑  $\text{WO}_3$  微纳结构。经过低温硫化处理, 该结构转变为  $\text{WS}_2$  纳米复合物, 其在析氢催化反应中展现了显著的活性。

该分层三维自支撑  $\text{WO}_3$  微纳结构经过低温硫化过程形成的  $\text{WS}_2$  纳米复合物, 在催化析氢方面表现出卓越的性能, 其特点是较低的过电

压 (119 mV)。这种多尺度 WS<sub>2</sub> 纳米复合物不仅实现了高效的氢气生成,同时保持了出色的性能稳定性。该研究为超快激光技术制备的微纳结构在水分解催化应用领域提供了关键的实验依据。

### 1.2.5 结 语

在材料科学的研究前沿,纳米结构材料与超快激光技术已成为两大关键研究领域。超快激光技术以其皮秒、飞秒乃至阿秒级的脉冲宽度,为观测极端快速过程和材料精细加工提供了独特的能力。该技术广泛应用于金属、非金属以及高分子等多种材料的形状塑造和性质调控<sup>[5-9]</sup>。在近年的研究中,科研人员在利用超快

激光制备表面微纳米结构及其功能化方面取得了显著成就,开发了多种制备技术,涵盖超疏水表面、抗结冰表面、低反射率金属表面以及高灵敏度的表面增强拉曼散射 (SERS) 基底等方面。这些研究成果为未来的科学探索和工业应用奠定了坚实的基础。

尽管如此,目前超快激光技术在材料加工领域仍面临一些挑战,包括衍射极限的限制、多维复杂微纳结构制备以及大面积高效制造等问题。随着这些挑战的解决,超快激光技术在材料加工领域的应用范围将进一步扩大,并为其带来更广阔的发展机遇。

王立众 

## 参考文献

- [1] Bae W G, Kim H N, Kim D, et al. 25th anniversary article scalable multiscale patterned structures inspired by nature the role of hierarchy[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(5): 675-700.
- [2] Dorrer C, Rhe J. Some thoughts on superhydrophobic wetting[J]. *Soft Matter*, 2009, 5 (1): 51-61.
- [3] Liu W J, Fan P X, Cai M Y, et al. An integrative bioinspired venation network with ultra-contrasting wettability for large-scale strongly self-driven and efficient water collection[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(18): 8940-8949.
- [4] Fan P X, Wu H, Zhong M L, et al. Large-scale cauliflower-shaped hierarchical copper nanostructures for efficient photothermal conversion[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(30): 14617-14624.
- [5] Wang F, Xiao S B, Zhuo Y Z, et al. Liquid layer generators for excellent icephobicity at extremely low temperatures[J]. *Materials Horizons*, 2019, 6(10): 2063-2072.
- [6] Jin M M, Shen Y Z, Luo X Y, et al. A combination structure of microblock and nanohair fabricated by chemical etching for excellent water repellency and icephobicity[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 455: 883-890.

- [7] Parker A R, Lawrence C R. Water capture by a Desert beetle[J]. *Nature*, 2001, 414(6859): 33-34.
- [8] Bai H, Wang L, Ju J, et al. Efficient water collection on integrative bioinspired surfaces with star-shaped wettability patterns[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5025-5030.
- [9] Lee A, Moon M W, Lim H et al. Water harvest via dewing[J]. *Langmuir*, 2012, 28(27): 10183-10191.