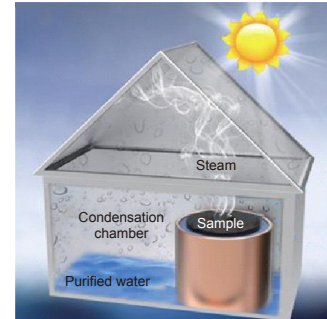


DOI: 10.12086/oe.2022.210313

# 激光微纳制造太阳能海水淡化材料研究进展

余星<sup>1</sup>, 严俊森<sup>1</sup>, 吴志鹏<sup>1</sup>, 吴婷妮<sup>1</sup>, 银恺<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中南大学物理与电子学院纳米光子学与器件湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083;<sup>2</sup>中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083

**摘要:** 海水淡化技术在解决水资源短缺的问题上起着重要的作用, 其中太阳能海水技术的研究更是备受关注。激光微纳制造技术作为一种先进、便捷的加工方法, 近年来在制备海水淡化材料领域取得了一定的研究成果。本文以太阳能海水淡化技术以及激光加工技术作为研究背景, 根据研究材料的多样性, 从材料的构成本质出发, 将近年来关于激光微纳制造海水淡化材料的研究分为碳基类、金属基类和复合基类材料三个部分来进行阐述, 最后结合当前研究, 阐明该方向面临的挑战并对其前景进行展望。

**关键词:** 激光; 微纳制造; 太阳能; 海水淡化

**中图分类号:** TN249; S214; P747

**文献标志码:** A

余星, 严俊森, 吴志鹏, 等. 激光微纳制造太阳能海水淡化材料研究进展 [J]. 光电工程, 2022, 49(1): 210313

Yu X, Yan J S, Wu Z P, et al. Research progress of solar desalination materials produced by laser micro-nano fabrication [J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(1): 210313

## Research progress of solar desalination materials produced by laser micro-nano fabrication

Yu Xing<sup>1</sup>, Yan Junsen<sup>1</sup>, Wu Zhipeng<sup>1</sup>, Wu Tingni<sup>1</sup>, Yin Kai<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Hunan Key Laboratory of Nanophotonics and Devices, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

**Abstract:** The seawater desalination technology plays an important role in solving the problem of water shortage. In particular, the research of solar seawater technology has attracted more research and industry attentions. As an advanced and convenient processing method, laser micro/nano-manufacturing technology has made some achievements in the field of preparing seawater desalination materials in recent years. Based on the solar desalination and laser processing technologies as the research background, according to diverse research materials, we summarize the research progress of laser micro/nano-manufacturing technology in the preparation of seawater desalination materials from three different aspects, including carbon-based, metal-based and composite

收稿日期: 2021-09-28; 收到修改稿日期: 2021-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075557, 51805553); 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ20067); 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室自主课题 (ZZYJKT2019-12)

通信作者: 银恺, kaiyin@csu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

materials. Finally, challenges and prospects of this field are provided.

**Keywords:** laser; micro and nano-fabrication; solar; desalination

## 1 引言

淡水资源和生态平衡、工业生产、生物健康、人类生存、社会发展等方面密切相关。虽然地球 71% 的部分被水覆盖, 但人类可利用的淡水资源却不到总水量的 1%, 很多地区都面临着淡水短缺的问题<sup>[1-6]</sup>。为了解决这一问题, 研究人员致力于发展海水淡化技术, 基于不同原理设计了不同的工艺方法, 包括蒸馏法、反渗透法、电渗析法、冷冻法<sup>[7-9]</sup>等。与南水北调这类大规模引水工程不同, 海水淡化技术可以实现淡水资源总量的增长, 且能得到水质好、水量稳定的淡水, 在沿海地区更适合推广。目前, 反渗透和多级闪蒸技术已经在沙特阿拉伯、以色列等国用于商业化产水。然而, 这些方法耗电量高, 产生大量二氧化碳, 对环境影响较大<sup>[10-12]</sup>。自然界中水循环的重要途径是蒸发, 这一过程由太阳能驱动。太阳能是迄今为止最大的可开发、可再生的能源, 而其驱动的汽化技术是一种具有较大潜力的海水淡化技术, 有低成本、环保的特点<sup>[13-16]</sup>。研究表明, 通过功能材料在空气/水界面对水的局部加热, 蒸发效率能够显著提高<sup>[17-20]</sup>。功能材料的制备可由不同的方法来完成, 如喷涂法、化学处理法、物理切割法等。而传统材料加工方法不能精确调控材料表面性能, 随着人们不断地研究, 激光加工由于工艺简单、精确可控、环境友好等优点备受关注<sup>[21-24]</sup>。

激光加工是利用高功率密度的激光束辐照工件, 对材料进行处理。其近年来发展迅猛, 是当前具有较大发展潜力的微纳结构制备方法, 在材料加工领域得到广泛应用<sup>[25-31]</sup>。相较传统材料加工, 激光加工为无接触加工, 故无刀具磨损和机械变形。激光加工方法材料适用性广, 对实现高效太阳能蒸发的材料如, 金属及其氧化物、碳基材料等均可进行有效加工。此外, 通过激光加工可实现材料表面结构的精密调控, 同一种材料, 其表面性质如, 亲疏水性、光吸收率等取决于激光加工的参数。将激光加工技术应用于海水淡化, 为海水淡化材料的选择拓宽了思路, 也满足了人们对材料海水淡化率高、寿命长的需求, 推动着太阳能海水淡化技术向商业化方向发展, 激光加工技术正逐渐

成为海水淡化材料制备的重要方法之一<sup>[32-41]</sup>。

本文系统总结了近年来利用激光微纳加工技术制备太阳能海水淡化材料的相关研究。以太阳光海水淡化及激光加工技术的介绍作为研究背景, 从碳基类、金属基类、复合材料类三个不同的材料种类进行系统的概述。最后对该项研究当前面临的挑战进行总结, 并对其未来进行展望。

## 2 研究背景

### 2.1 太阳能海水淡化

利用太阳能蒸发技术生产净水一直是人们研究的热点, 自然条件下, 太阳直接照射在海水, 太阳能转化为热能, 促进水的相变, 产生蒸汽, 再通过蒸汽冷凝, 进而得到纯净水<sup>[42-43]</sup>。为提高这一过程对太阳能的利用率, 引入了由激光制备的功能材料作为太阳能吸收器。水和太阳能吸收器的相互作用是高效产水的关键因素, 这很大程度上取决于材料在水中的位置, 如图 1, 可简单分为三种模式: 1) 太阳能吸收器固定在底部; 2) 太阳能吸收器分散在液体中; 3) 太阳能吸收器漂浮在液体表面。

如图 1(a) 所示, 将太阳能吸收器固定在底部, 入射的太阳光透过大体积的水在功能材料上转化为热能, 水的温度逐渐升高, 相变速率提高。考虑到入射过程中水的反射, 以及在水中热传导过程中的热量损失, 该模式的光利用率并不理想<sup>[44-45]</sup>。第二种模式如图 1(b) 所示, 纳米级太阳能吸收器分散在液体中, 由于纳米颗粒具有很好的光热转换能力, 当受到阳光照射时, 颗粒表面可迅速升温, 与颗粒接触的液体汽化, 形成一薄层蒸汽<sup>[46-48]</sup>。在持续的太阳光照下, 随着水蒸气的增加, 被水蒸气包裹着的纳米颗粒最终漂移到液/气界面, 并释放水蒸气, 最后液化得到纯净水<sup>[49-51]</sup>。这一过程较之第一种模式, 以水中的纳米颗粒作为汽化位置, 整体减少了太阳光在水中的反射, 但仍有很大的热能从流动的蒸汽转移到大量的水中, 这限制了水的汽化效率<sup>[52]</sup>。当太阳能吸收器浮于水面, 如图 1(c), 则是一种更高效的蒸发模式, 光热被限制在功能材料中, 即液体表面。由于毛细现象, 水被吸附在功能材料的孔隙中, 太阳能吸收器吸收的能量直接

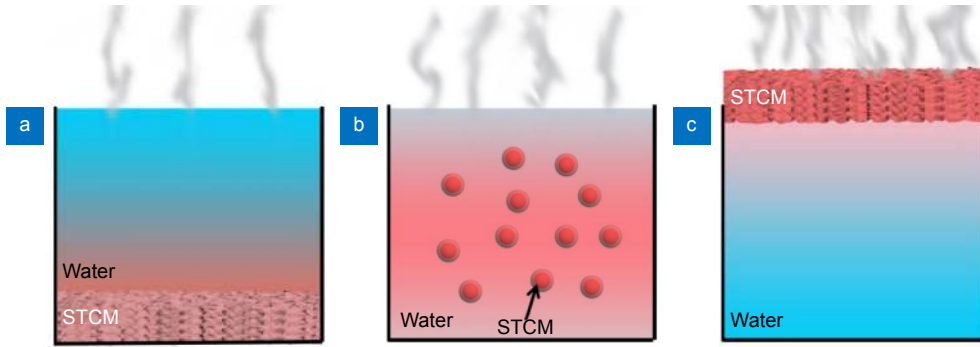


图 1 根据太阳能光热转换材料 (STCM, 即 solar thermal conversion materials) 位置所划分的太阳能蒸发水的三种模式。

(a) 固定在底部; (b) 分散在液体中; (c) 漂浮在水面上<sup>[44]</sup>

Fig. 1 The three modes of solar water evaporates according to the location of the material.

(a) Fixed at the bottom; (b) Dispersed in the liquid; (c) Floating on the water surface<sup>[44]</sup>

对表面的液体进行局部加热, 最大限度地减少了热损失, 大大增强了空气/水界面的相变, 提高了水蒸发率<sup>[53-64]</sup>。

为比较不同材料之间的差异, 利用图 2(a) 所示简易水蒸发装置, 将加工样品置于小容器的水面上, 经过一段时间确定强度的阳光照射, 称量小容器内剩余水量, 可直观得出水蒸发的效率<sup>[65]</sup>。为进一步提高水蒸发率, 保证绝大多数能量被用于实现水的相变, 则可在材料选择、成分调整、表面结构等方面做进一步的研究。不仅要求加工所得材料有优良的光学性能, 能保证高效的宽带太阳能吸收, 还需要有良好的热管理, 即吸收的光产生的热量有效地转移到汽化过程中 (图 2(b)), 而其他的热损失应该最小化。同时, 材料内的孔隙需保证可以不断向蒸发表

面提供少量的水, 以保证持续工作。此外, 为了满足工业化的需求, 海水淡化材料还要具有经济效益、易于大规模生产、防污耐用、适于盐水或污水的汽化应用等特性<sup>[66-70]</sup>。

### 2.2 激光微纳加工

随着研究的深入, 人们对加工精度要求不断提高, 同时对材料的功能性有了更高的要求。传统的微纳加工方法如化学处理法等并不能很好地满足人们的需求, 所以, 经过长时间的探索, 激光微纳加工因其功率密度大、精密度高、适用范围广等特点备受青睐, 并逐渐成为微纳加工领域的重要方法之一。通过调节激光的强度、频率等参数, 便可以对材料的性质进行细微的调控, 由于操作简单, 也更容易得到理想的性能。

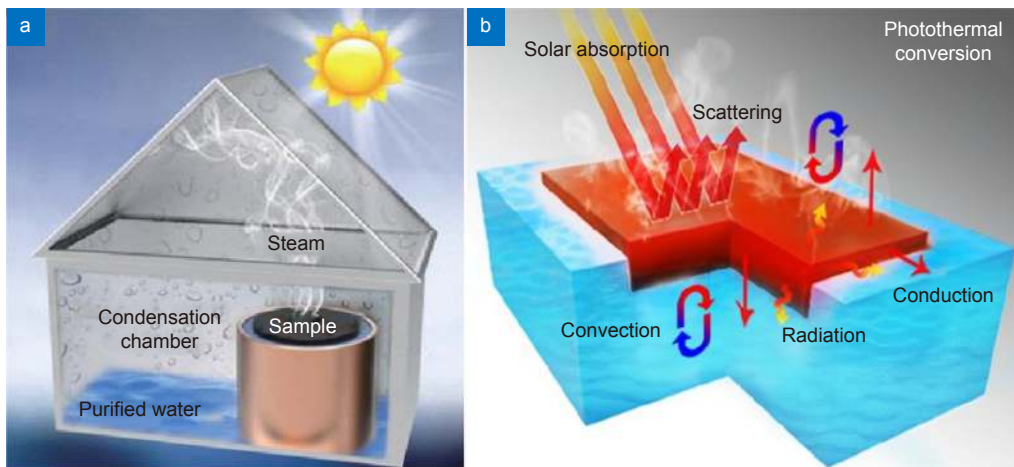


图 2 (a) 太阳能海水淡化实验装置示意图<sup>[65]</sup>; (b) 太阳能海水淡化材料光热转换过程<sup>[66]</sup>

Fig. 2 (a) Schematic diagram of solar water desalination experimental device<sup>[65]</sup>;

(b) Solar absorption material photothermal conversion process<sup>[66]</sup>



激光微纳加工作为一种先进、便捷的加工技术, 充分展示出它巨大的发展潜力<sup>[71-72]</sup>。

激光微纳加工系统一般包括激光器、光路控制系统以及 X-Y-Z 平移台, 如图 3 所示。图中所示为飞秒激光加工装置示意图, 其他激光微纳加工方法与飞秒激光基本相同, 其中, 激光器用于产生激光脉冲; 光路控制系统通常由反射镜、透镜等光学器件组成; X-Y-Z 三维移动平台即样品的加工平台, 可由计算机控制, 实现样品位置的调整。此外, 可在聚焦透镜上方安装与计算机连接的 CCD, 以实时监控制造过程<sup>[73]</sup>。在激光加工过程中, 激光光束通过反射镜、透镜等将其聚焦到 X-Y-Z 平移台上, 再控制平台移动从而实现扫描加工, 如图 3(a), 也可由计算机控制的扫描振镜系统加工, 如图 3(b)<sup>[75-76]</sup>。

近年来大量研究将激光微纳加工技术应用于太阳能海水淡化材料的制备, 由于激光能量密度大, 利用激光直接烧蚀材料表面即可完成加工, 稳定的光源可以使样品表面具有更精密、更规则的结构<sup>[77-79]</sup>。在材料化学成分和表面微纳结构的共同作用下, 材料表面得以表现出超亲/疏水性、抗腐蚀性等性能, 同时表面变黑, 扩大了材料的吸收光谱的范围, 直接增加了对光的利用率。材料本身的性质还会影响其热辐射、热传导等热管理能力, 所以用于海水淡化的材料不应过于局限, 激光微纳加工的方法并不受限于加工材料, 通过激光进行微纳加工, 不同的材料均可实现表面性能的改变。因此, 研究激光微纳加工技术在太阳能海水淡化中的应用具有相当重要的意义。

### 3 激光加工在太阳能海水淡化中的应用

近几年来, 科技不断进步, 太阳能海水淡化技术也在不断完善。其中所用方法很多, 它们的主要原理为渗透效应和光热效应, 且其大部分的过程需要使用膜, 普通加工得到的膜虽然能进行海水淡化, 但是会存在效率低下, 使用寿命较短、制备方法复杂等问题。激光加工作为近几年兴起的制备方法, 具有能改变物体光热效应、浸润性, 同时制备方法简单便捷等特点。因此, 将激光加工技术应用于海水淡化领域是非常有意义的研究。同时由于材料的多样性, 我们从材料的构成本质出发, 将太阳能海水淡化材料大体分为碳基类、金属基类、复合基类材料。

#### 3.1 碳基类海水淡化材料

自 2004 年从单体石墨中成功剥离出几层石墨烯<sup>[80-85]</sup>(LIG) 后, 就引起了石墨烯研究的指数式增长。而 10 年后, 人们发现一种简单且成本较低的制备方法, 即在特定环境下使用激光直接刻蚀聚合物来合成石墨烯。石墨烯是一种单原子厚度的碳原子薄片, 以蜂窝状晶格排列。由于独特的晶体结构和电子结构相结合, 石墨烯在物理、化学和材料科学方面都有着广泛的应用价值。同时石墨烯表现出优越的性能, 其中包括高表面积、高载流子迁移率、高热导率和高透光率。而这些性能较为契合海水淡化, 因此研究人员将石墨烯应用于海水淡化。激光加工得到的石墨烯与普通方法得到石墨烯存在不同之处。通过激光诱导石墨

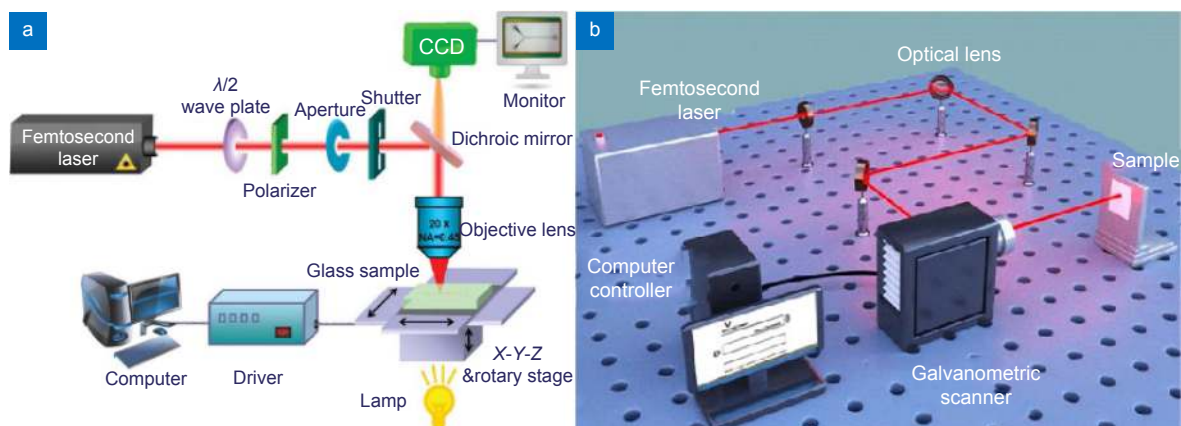


图 3 激光加工装置示意图。

(a) 激光加工模式一<sup>[74]</sup>; (b) 激光加工模式二<sup>[75]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of laser processing device.

(a) Laser processing mode one<sup>[74]</sup>; (b) Laser processing mode two<sup>[75]</sup>



烯, 能够改变石墨烯的表面结构, 使得其表面具有超疏水或超亲水的性能, 以此达到海水淡化或油水分离的效果。

Janus 膜<sup>[86-87]</sup> 在海水淡化中的应用是十分重要的, 不对称的特性 (Janus 膜是膜领域一个新兴的概念, 它一般是指具有不对称结构或者性质的分离膜) 让它具有自发将水从膜的一面传输到另一面的能力。而这在海水淡化中, 能够通过自身运输水、不需要额外的能量, 从而达到节省成本的目的。通过实验, 证明了石墨烯能够被制成这种功能的膜。Li<sup>[88]</sup> 等人对比以往用于海水淡化的膜, 发现因环保而被推广的轻质碳基材料, 并不能在海水淡化中实现高效的工作。在此之前, 有文章报道, 对 PI 膜进行激光诱导能够得到石墨烯, 而且其 Janus 性能可以由激光加工以及后处理决定。但通过加工 PI 膜得到的石墨烯也存在缺点, 在未被激光直射的另一侧, 存有残留的非石墨烯物质。Li 等人通过控制激光波长, 改变加工材料的光学吸收系数, 当控制激光波长达到 1064 nm 左右时, 膜的底部也能够被激光加工。虽然此时底部并不能与顶部一样完全转换为石墨烯, 但顶部的超亲水与底部的超疏水<sup>[89]</sup>

以及多孔膜结构已经使其具备了优良的海水淡化性能。如图 4(a) 所示, 即为激光加工 PI 膜得到石墨烯的具体过程。最终得到微观结构图如图 4(c) 所示, 其中由超疏水表面的微观结构图也可以观察到加工过后的材料是多孔结构。由于此加工方式得到石墨烯为 Janus 膜, 且 PI 膜密度小能够漂浮在海面, 所以适合于太阳能海水淡化研究。与此同时, 在进行模拟海水淡化实验时发现, 其海水蒸发率与不同厚度 PI 膜加工所得到的石墨烯膜有关。如图 4(b) 所示, 不同厚度对应着不同蒸发率, 50  $\mu\text{m}$  厚度的膜效率最高, 而 25  $\mu\text{m}$  的膜与其他厚度膜相比较差。除了膜的厚度、激光的波长以外, 形状上的差异也能导致蒸发效率变化。蘑菇形状的效率较低, 仅有 78%, 而氧化石墨烯气凝胶发生器有 83%, 3D 伞状的则有 85%, 效率最高的便是块状的石墨烯膜。接触面积较大导致蒸发率也提高。利用 PI 膜加工得到的石墨烯膜, 具有无污染、可浮动、高效率且可扩展等优良性能, 具有较大的应用潜力。

由于海水淡化所使用的部分材料应用成本较高, 导致它们并不能被广泛应用。而木材作为可塑性较好的低价碳基材料, 被研究人员所关注。且由于是碳基

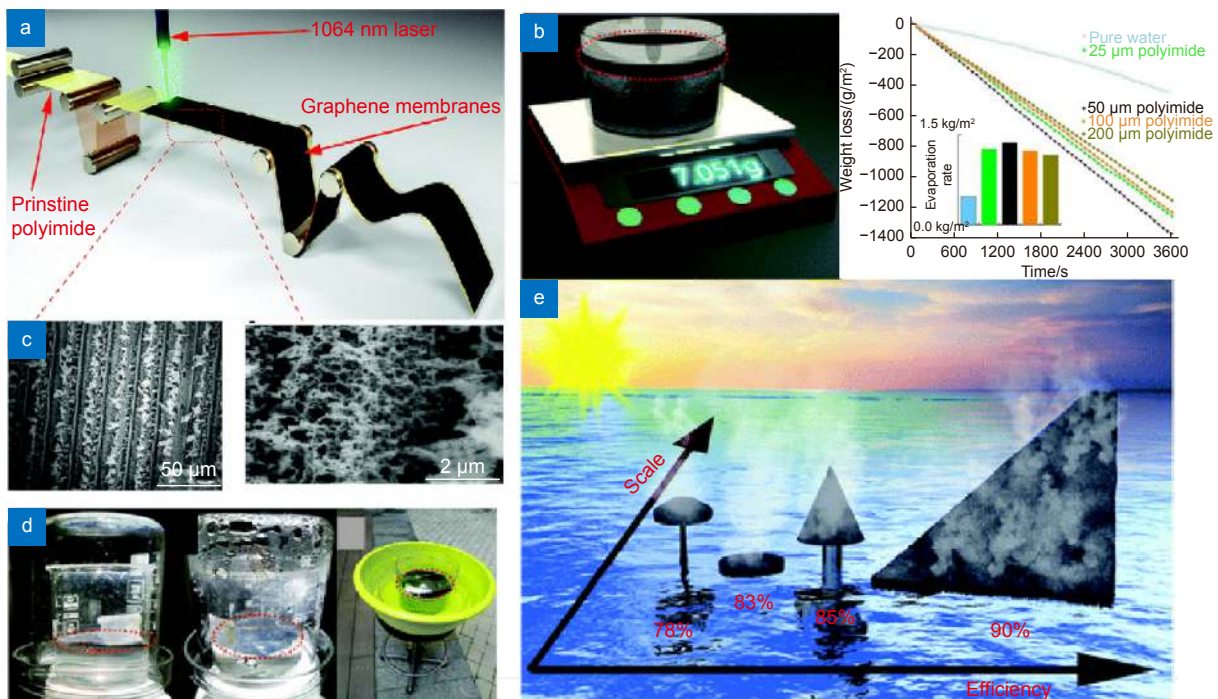


图 4 激光加工 PI 膜得到多孔石墨烯<sup>[88]</sup>。

(a) 激光加工示意图; (b), (d) 海水淡化示意图; (c) 微观结构示意图; (e) 石墨烯形状影响效率

Fig. 4 The porous graphene obtained by laser treated PI films<sup>[88]</sup>.

(a) Schematic of laser processing; (b), (d) Schematic of seawater desalination;

(c) Schematic of microstructure; (e) Graphene shape affects efficiency

材料, 可利用激光将其转换为石墨烯进行海水淡化。相较于其他材料, 其还具有成本低、可塑性高、环保等特点。

Jang<sup>[90]</sup> 等人对木材进行了激光诱导, 使用CO<sub>2</sub>激光器将椴木的表面转化为石墨碳层<sup>[91]</sup>(GCL)。当木材表面转换为石墨碳层后, 再利用激光进行加工就能得到一定形状的石墨烯。木材表面加工得到的沟槽存在褶皱, 且通过毛细作用, 能存储一定的水, 海水蒸发过程即发生于沟槽上。利用太阳能蒸发方式进行海水淡化时, 存在一定问题。蒸发过后, 盐会结晶留在表面, 时间一久便会形成较大污垢, 进而影响蒸发过程。利用激光加工木材表面即可解决这个问题, 其中表面加工出的沟槽能够通过毛细作用持续引入水, 表面产生结晶污垢的问题便能得到解决。同时由于石墨烯表面能够有效吸收太阳能, 光热效应较高。且木材基底的使用, 使其本身的热耗散较少, 整个装置的热利用率就得到很大的提高。如图 5(b)、(c) 所示, 木材表面为疏松多孔微结构。通过实验发现, 该材料的性能在 20% 的 NaCl 溶液中保持不变 (2 周), 这表明该木材有可能在盐水中长期使用。结合木材的成本, 以及其淡化效率和循环周期, 展现出较好的海水淡化性能。

如图 5(a)~(c) 所示, 木材被激光加工后, 其表面形成碳层和石墨烯层。将这种被加工木材制成 SSG(太阳能蒸发器), 并进行蒸发实验, 研究影响蒸发速率的因素。具体数据如图 5(e)、(f) 所示, 研究因素有木材厚度、沟槽深度和网格间隔, 以及表面有凹槽与制成石墨烯但无凹槽等。而根据实验数据, 转化为石墨烯且有凹槽的表面, 其蒸发效率明显最优, 与普通蒸发方式相比较, 这种方式效率提高且成本降低, 总体性能较好。

与木材相比, 金属的光热效应更强, 而纳米级金属的光热效应更为突出。木材作为一种能充当基质的材料, 亦适合海水淡化。Ghafurian<sup>[92]</sup> 等将这两者结合研究, 发现将铁 (Fe) 和铅 (Pb) 的纳米颗粒一起添加于脱去木质素的木材上方, 并应用于海水淡化, 其蒸发效率能达到 75.6%。虽然大多数面状蒸汽发电系统的光热转换效率合理, 但是它们的长期性能还是受到界面盐分积累的限制, 为了抑制界面盐分的积累, 并更快地将水输送到表面, 木质素 (细胞壁结构的疏水性部分) 被从木材中部分去除。在去木质化后, 木材孔隙的直径增加, 导致其导热性能和热导率降低, 以及对入射光线的捕获能力增加。同时, 处理过的超

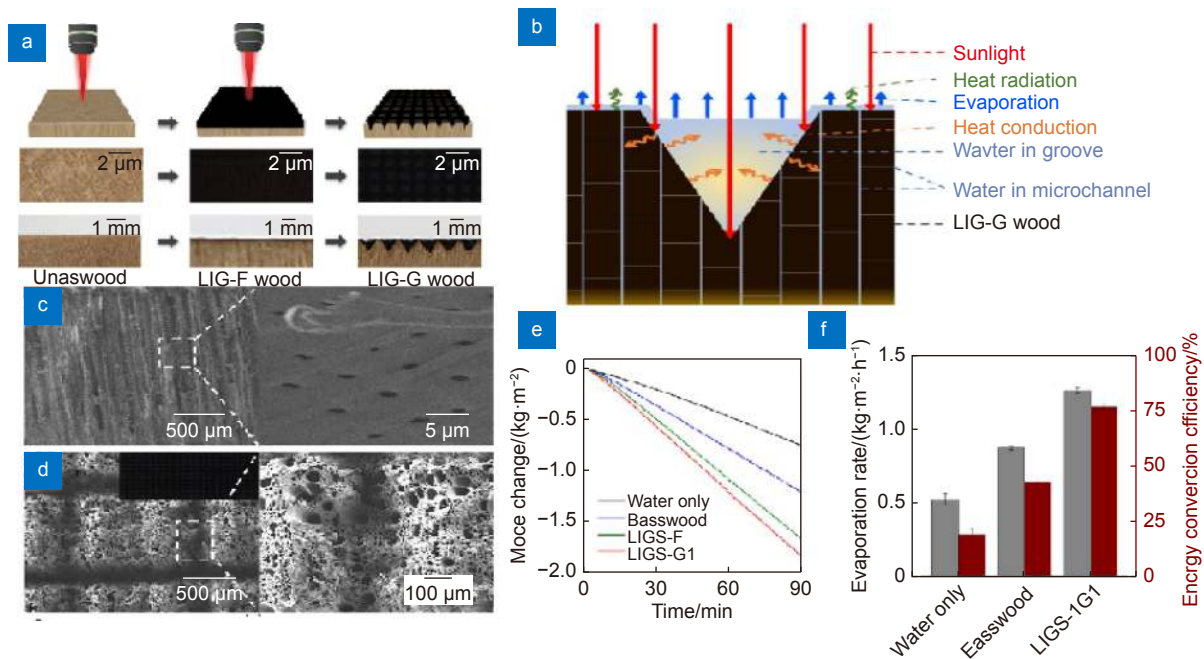


图 5 激光加工木材作为太阳能蒸发器基底<sup>[90]</sup>。

(a) 激光加工木材示意图; (b), (c) 加工过后木材表面微观示意图;  
(d) 海水淡化示意图; (e), (f) 海水淡化效率

Fig. 5 The solar evaporator substrate obtained by laser treatment of wood<sup>[90]</sup>.

(a) Diagram of laser processing of wood; (b), (c) Microscopic diagram of processed wood surface;  
(d) Diagram of seawater desalination; (e), (f) Processing efficiency of SSG applied to seawater desalination



亲水木材可以防止盐在木材表面沉积(木质素是细胞中的疏水部分)。木材以及其他的基质部分均采用激光进行切割, 纳米颗粒沉积在基质表面即可得到SSG。

### 3.2 金属基类海水淡化材料

金属作为被广泛应用于海水淡化的材料, 因为种类繁多、性能优良等特点, 受到了众多研究人员的关注。近几年来, 由于激光加工技术的日渐成熟, 许多性能优良的金属材料被广泛加工使用。其在激光加工后会显现出不同性能, 其中最为常见的几种有亲疏水性以及光热效应。

增强光热效应是提升太阳能海水淡化性能的有效手段之一, Fan<sup>[93]</sup>等人利用激光加工金属铜, 极大地增强了其光热效应。通过实验在铜表面构建一个菜花

状的分层表面纳米结构, 能有效吸收光, 同时证明了该菜花形纳米结构表现出极高的光热转换能力。如图6(a)所示, 加工参数不同的铜表面, 其菜花形状也不一致, 加工过后表面颜色的不一致也代表光吸收能力的不同。实验采用高达99.9%纯度的铜进行加工, 采用800 fs的脉冲, 重复率为200 kHz, 中心波长为1030 nm的激光进行加工, 并采用不同的扫描速度得到不同性能的铜片。如图6(c)所示, 不同角度太阳的照射亦会影响铜片的光吸收能力, 其中0°效果最好。同时由于铜的密度较大, 加工过后未能浮在表面, 所制成的SSG存在于水中, 具体示意图如图6(b)、(d)所示。将SSG用于水蒸发实验中, 将会发现在辐射功率密度为 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的整体光热转换效率最高, 可超60%, 同时在波长为200 nm~2000 nm的范围内, 其光吸收效率可超90%, 最高可达98%。由此可见,

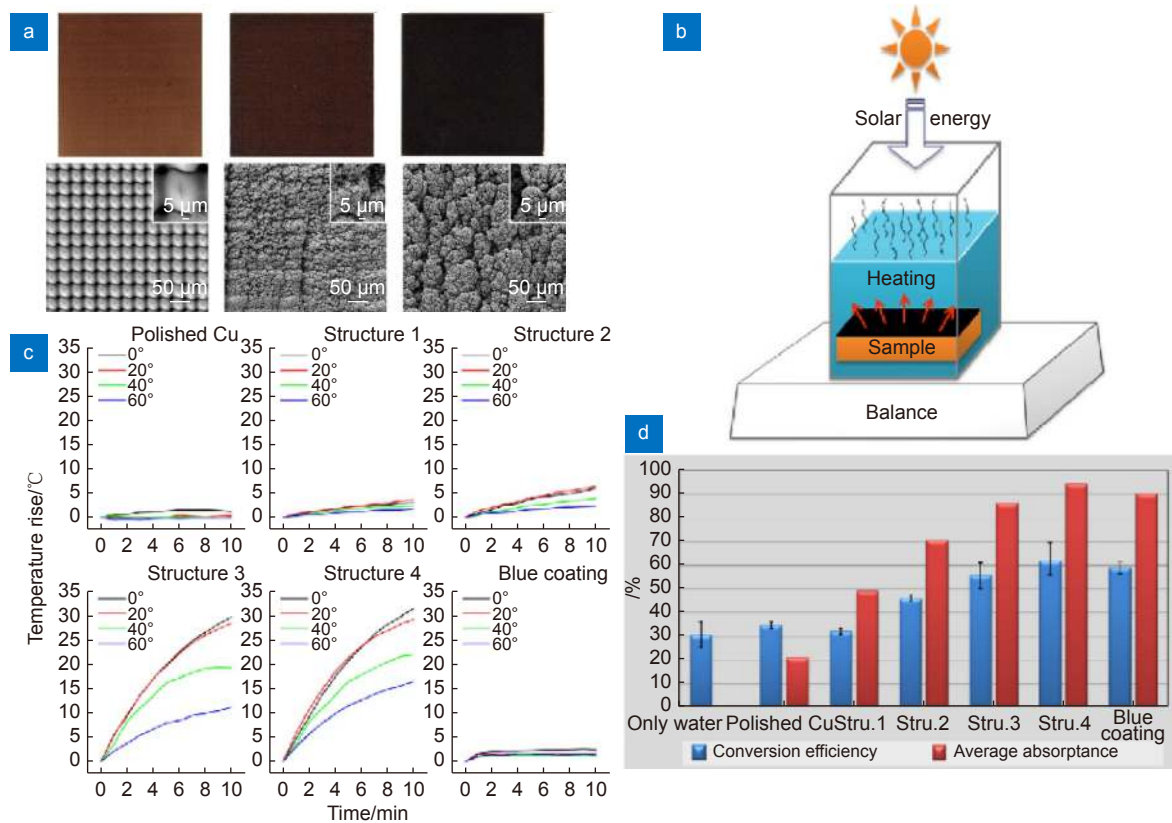


图6 飞秒激光诱导铜<sup>[93]</sup>。

- (a) 不同激光加工过后得到铜表面; (b) 利用激光诱导过后的铜进行海水淡化; (c) 具有微纳米结构的铜表面和具有蓝色涂层的铜表面的温度上升对比图; (d) 辐射功率密度为 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的整体光热转换效率, 以及不同铜样品在200 nm~2000 nm范围内的平均吸收率

Fig. 6 The femtosecond laser-treated copper<sup>[93]</sup>.

(a) Copper surface after different laser processes; (b) Desalination of seawater using laser-induced copper; (c) Comparison of temperature rise between copper surface with micro and nano structures and copper surface with blue coating; (d) Overall photothermal conversion efficiencies with a radiation power density of  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  and the average absorptance within 200 nm~2000 nm range for different Cu samples



该具有微观菜花结构的铜表面的光热效应得到了加强。而将其置于以其它材料为基底的 SSG 中, 可以达到更好的海水淡化效果。除使用飞秒激光加工铜表面可加强光热效应外, 采用纳秒激光亦能够得到抗反射铜表面, 以增加光热效应, 其蒸发效率可高达 56.8%。

与 Fan 等加工铜不同, Yin<sup>[94]</sup> 等利用飞秒激光对泡沫钛进行加工, 并利用其设计得到一个用于海水淡化的高效率太阳能蒸发器。激光加工的泡沫钛不仅具有高效的太阳能吸收效率, 还具有 Janus 性质。Janus 性质使得泡沫钛不需消耗外界能量便能运输水, 在此之前, 有人提出了漂浮的太阳能蒸发器这一概念, 而泡沫钛的密度较小, 恰能被制成 SSG 漂浮在海水表面, 与太阳有着充分接触, 而这正是太阳能蒸发方式效率最高的一种。正是漂浮在海面上才能使蒸汽迅速逸出, 如此即可有效、连续地实现海水蒸发。在满足这个条件的同时, 利用泡沫钛加工得到的 SSG 还存在其他特点, 即能够持续地向表面提供水。这样能够减少能量消耗, 很多用于海水淡化蒸发膜的材料的光热性能并不弱, 却需额外的能量方能运输水, 这就导致成本变高。与此同时, 钛作为成本较低的金属, 且其激光加工制造成本相对于一些纳米级金属或者 Au 来说耗费低。具体飞秒激光加工的过程如图 7(a)、(b) 所示, 泡沫钛经过飞秒激光的扫射, 由银白色变为黑色, 浸润性能亦发生变化, 图 7(c) 能清楚观察到其表面微观结构的变化。除此之外, 如图 7(d) 所示, 泡沫钛并未与海水直接接触, 而是在中间加了一层海绵 (PU), 海绵强大的吸水能力使其能够湿润, 再通过海绵将水传给泡沫钛, 避免了海水与泡沫钛的直接接触。且其中的气凝胶棉具有很好的隔热性能, 能够有效地阻止表面吸收的太阳能热散失。如图 7(e) 所示, 利用该太阳能蒸发器分别对四种不同浓度的盐水进行蒸发, 四个样本经过该蒸发器蒸发过后, 其盐含量都达到标准。根据实验, 该装置的水蒸发率高达  $1.79 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 且在太阳光照射 ( $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 下的太阳能蒸汽效率约为 90%, 具有良好的海水脱盐性能。综上所述, 使用飞秒激光直写技术制造以泡沫钛为核心的蒸发器, 可用于高效太阳能蒸汽海水淡化。该太阳能蒸发装置由激光处理得到的泡沫钛、热绝缘棉和聚氨酯海绵组成, 经过处理的钛泡沫具有超强的光热效应 (>97%) 以及 Janus 能力。同时, 超疏气性能使水蒸气迅速逸出表面。隔热棉与泡沫钛下表面紧密相连, 能够有效地减轻热耗散, 而预湿的聚氨酯海绵能够利用泡沫钛的

Janus 能力确保对泡沫钛的供水, 从而展现出较好的太阳能海水淡化性能。

### 3.3 复合基类海水淡化材料

单一材料的激光加工应用很广, 且能够较好地应用于海水淡化中。金属材料、碳基材料等都能够经过激光加工过后应用于海水淡化, 除此之外, 激光加工亦能得到一些复合材料。例如, 激光能够有效拼接石墨烯和金属, 从而制作出应用于海水淡化的蒸发膜, 且蒸发效率优异。因为激光加工的膜可能只有单一功能增强, 此时便可将多种膜复合, 从而得到多功能膜。

Kim<sup>[95]</sup> 等人提出了一种简单而快速的加工方法, 通过脉冲  $\text{CO}_2$  激光加热, 直接生成单片双层膜。MBS(一种聚合物) 与一个具有太阳能吸收层的多孔石墨碳 (HPGC) 结合在上面, 下面与热绝缘的 PI 泡沫组合。其中 MBS 是在 PI 泡沫的基础上构建, 通过使用激光器将 PI 泡沫在光热作用下转化为三维多孔石墨碳。三维多孔石墨碳作为一种太阳能吸收材料, 可以通过谐振光再循环以及微孔/纳孔对光的限制来提高太阳能的吸收率。与此同时, 具有亲水性和热绝缘性的 PI 泡沫能够通过毛细管输送水, 减少热损失, 提高太阳能-热能转换效率。此外, 各向异性的表面疏水 HPGC 上层和表面亲水的多孔 PI 底层, 有效地防止盐分在 HPGC 上层积聚从而降低太阳能热转换效率, 积累在多孔 PI 底层的盐分能够被经毛细作用不断运输的水所溶解。通过基于激光的光热处理方法获得的双层膜, 可以大大降低建造高效太阳能蒸发器系统的成本。具体激光加工示意图如图 8(a) 所示, 利用激光加工得到双层膜。且材料本身密度小使得该膜可以漂浮在海水表面, 能够以最大的效率吸收太阳能。上层疏水的多孔石墨烯以及底层亲水的 PI 膜与水的接触角如图 8(b) 所示, 这种具有不对称浸润性的膜能起到运输水的作用。除效率以及成本问题外, 在海水中的耐用时间也是衡量海水淡化膜的标准。根据图 8(c)、(d) 所示, 双层膜在使用几个周期之后的淡化效率并未发生明显波动, 一个周期为半个小时, 研究人员们进行了 10 到 15 个周期的实验, 发现双层膜的平均蒸发率大约为 85%, 并且波动很小, 这就证明了膜的稳定性, 它能够高效地工作十二个周期。根据数据, 此复合双层膜的效率、成本、稳定性以及可携带性, 均符合海水淡化所需标准。

Jiang<sup>[96]</sup> 等人将金属与石墨烯用激光拼接, 得到

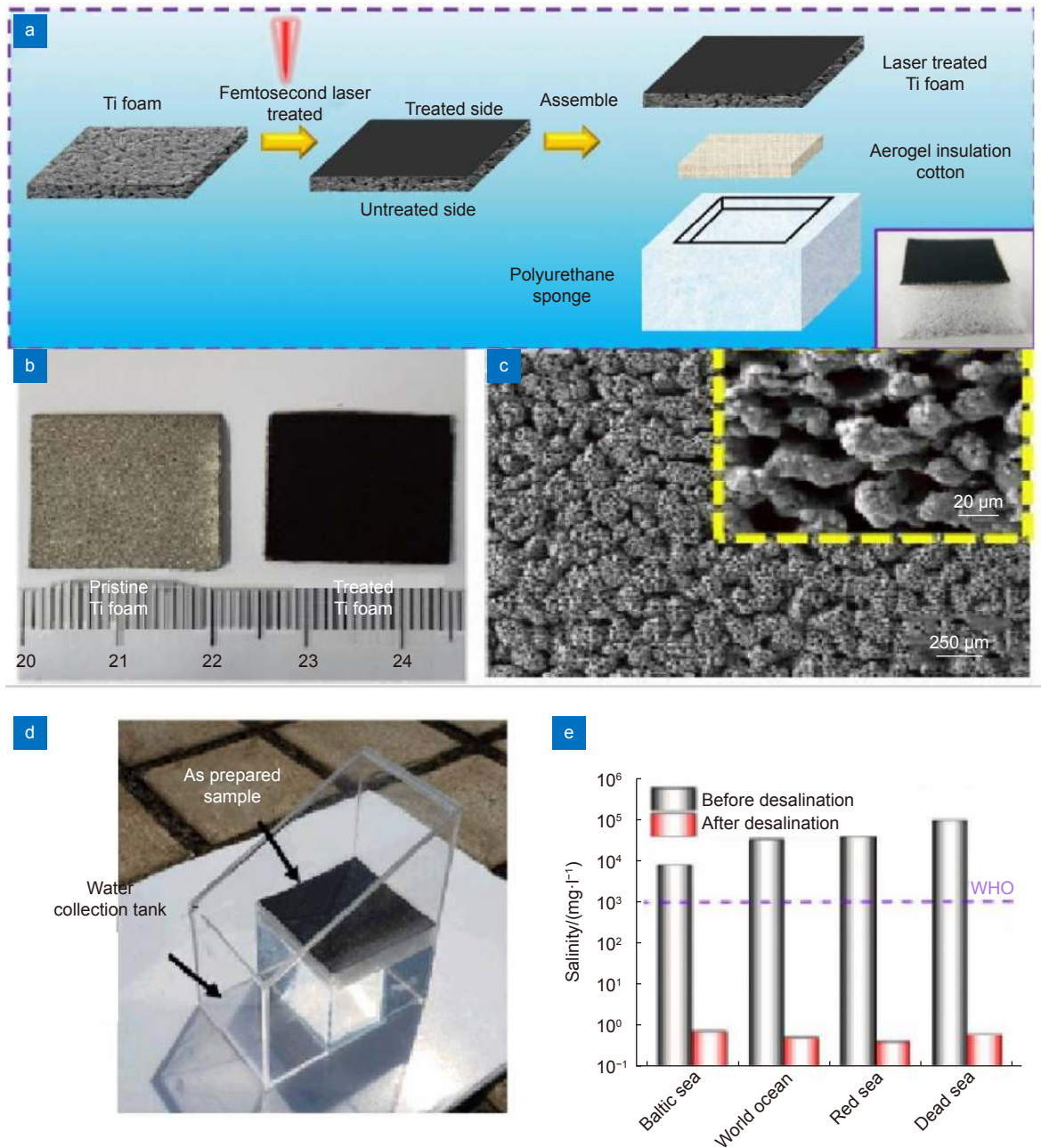


图 7 激光加工的泡沫钛<sup>[94]</sup>。

(a) 泡沫钛的制作过程示意图; (b), (c) 加工前后泡沫钛的形貌表征结构;  
(d) SSG 海水淡化示意图; (e) 海水淡化效率示意图

Fig. 7 The titanium processed by femtosecond laser to obtain titanium foam<sup>[94]</sup>.

(a) Schematic diagram of the Ti foam fabrication process; (b), (c) Morphological characterization structure of titanium before and after processing; (d) Schematic diagram of SSG desalination; (e) Schematic diagram of desalination efficiency

具有良好海水淡化性能的薄膜。金属有机框架 (MOF) 衍生的材料因为其独特的组合金属和碳质成分, 正被广泛地用于相关的能源和环境领域的深入探索。然而, 传统的煅烧方法限制了对金属成分的精确控制, 因为金属纳米颗粒在煅烧时会不可避免地凝聚在一起。此

外, MOF 中的有机聚合物也需转化为多孔的石墨烯。激光被用作一种有效的能量来源, 以可扩展的方式将 MOF 晶体转化为石墨烯-金属纳米颗粒结构。这种单片表现出优异的光吸收能力, 可用于以太阳能驱动蒸发的海水淡化。原则上, 高光吸收率即良好光热效



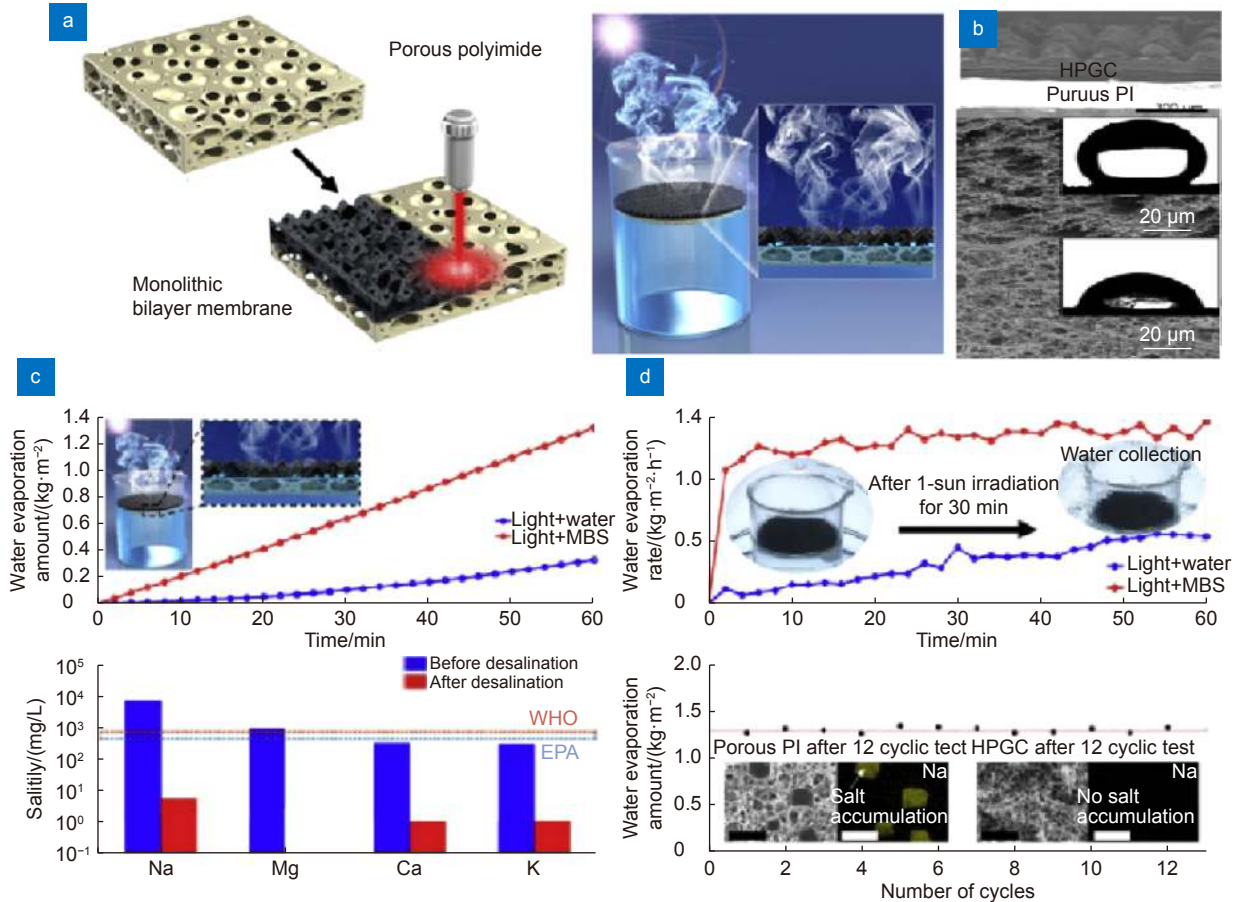


图 8 激光加工整合得到柔性双层膜<sup>[95]</sup>。

(a) 柔性双层膜制备示意图; (b) 膜表面亲水疏水微观示意图; (c)~(d) 柔性双层膜海水淡化效率对比图

Fig. 8 Laser processing and integration to obtain flexible bilayers<sup>[95]</sup>.

(a) Schematic diagram of flexible bilayer membrane preparation; (b) schematic diagram of hydrophilic and hydrophobic microscopic membrane surface; (c)~(d) Comparative diagram of desalination efficiency of flexible bilayer membrane

应的要求可以在三维石墨烯和金属纳米的混合薄膜中得到满足。该薄膜具有极高的光耦合纳米结构的密度和空腔。通过这种方式,光可以被金属成分强烈耦合。通过局部质子共振(LPR)被金属成分强烈耦合,并通过P波段的光学吸收被石墨充分吸收。这种具有高孔隙的混合结构,可以作为反射光腔,材料能够吸收比正常情况下更多的光能。

如图9(a)所示,通过在空气中使用纳秒脉冲激光,直接照射低成本的MOF晶体(金属为铜)。在激光照射后,分离的MOF晶体被瞬间热解并“缝合”在一起,形成一个自由站立的石墨烯-金属纳米颗粒单晶(GMM)。因为GMM的特殊,热量一旦进入结构就很难传导出来,所以其本身也可以被视为热绝缘体。对GMM制成的太阳能海水蒸发器进行性能测试,自然太阳光照射下,其光热效应可以达到99%。如图9(b)所示,即为蒸发器结构全貌。同时,加工得到的GMM

微观结构如图9(c)所示。如图9(d)所示,GGM所制的蒸发器淡化海水的效果显著。海水中的各种离子浓度经过蒸发器淡化之后显著降低,证明其脱盐能力不俗。由此可见,激光应加工拼接石墨烯和金属获得的GMM,用于海水淡化是十分经济有效且高效率的手段。

## 4 结束语

太阳能海水淡化技术在解决人类淡水短缺的问题上具有广阔的应用前景,相比多级闪蒸等其他海水淡化技术更加绿色环保,激光微纳加工技术则相比传统加工技术具有更广的材料适用性,而且对环境更加友好,也能满足更高的加工精度要求,因此是微纳表面制造的重要手段之一。本文系统总结了近年来利用激光微纳加工技术制备不同的海水淡化材料的研究进展,介绍了太阳能海水淡化技术和激光微纳加工技术的相关背景,从碳基类、金属基类、复合材料类三个不同



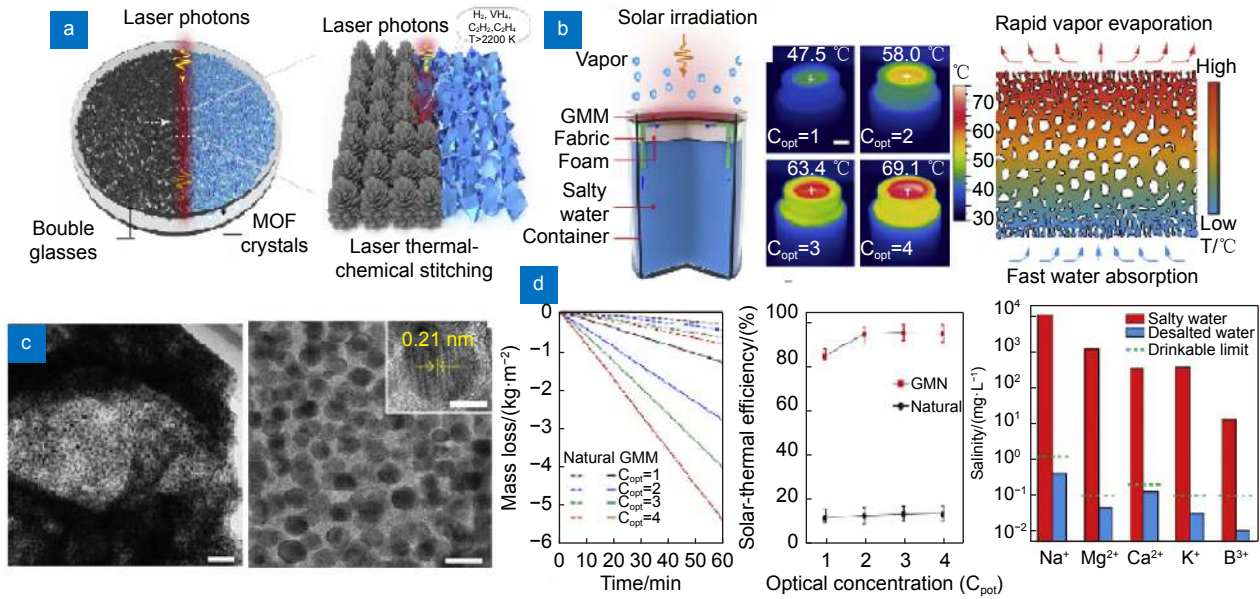


图9 激光加工拼接石墨烯与金属<sup>[96]</sup>。

(a) 拼接复合膜示意图; (b) 蒸发器结构示意图; (c) 复合膜表面微观结构; (d) 复合膜海水淡化效率

Fig. 9 Laser processing of spliced graphene and metals<sup>[96]</sup>.

(a) Schematic diagram of the spliced composite membrane; (b) Schematic diagram of the evaporator structure; (c) Microstructure of composite membrane surface; (d) Desalination efficiency of composite membrane

的材料种类进行了归纳。

目前采用激光微纳加工技术应用于太阳能海水淡化材料的制备尚处于初步阶段, 若想应用于工业化生产, 还有较长的距离。激光微纳加工技术提高了材料的光吸收率、优化材料的浸润性, 它在太阳能海水淡化领域已表现出了巨大的潜力, 但仍然面临着许多挑战, 这些挑战阻碍着太阳能海水淡化技术的进一步发展。一是激光微纳加工技术大部分还尚且停留在实验室阶段, 只能用于制备小面积的具有特殊性能的材料。二是虽然激光烧蚀材料表面可以改变其表面微纳结构, 但生成的结构和性能受环境等因素影响, 具有不稳定性, 其内在的机理并不明确。如激光微纳加工的部分材料表面结构在自然环境中易受侵蚀。在海水淡化或污水处理中, 水中微生物和盐类成分比实验室用的NaCl溶液成分复杂得多, 对材料的抗蚀性有着更高的要求。三是激光加工装置造价比较昂贵, 虽然加工效率目前得到有效提高, 但相比成熟的加工技术, 激光加工成本仍然相对较高。四是太阳能海水淡化性能尚需进一步提高, 目前研究得到的最高水蒸发率还不能满足日常生活。

随着激光微纳加工技术研究的不断深入, 新一代大功率高频率的激光器将快速发展, 更加适于工业生

产的激光微纳加工技术将不断成熟, 激光微纳加工技术将以更低的成本提供更高的制造效率和运行稳定性, 而对激光微纳加工内在机理的研究, 则会加深我们对微纳加工制备技术的理解, 从而获得具有更优良性能的材料。同时, 因为激光微纳加工对复杂表面的精细调控, 加工控制系统的高度智能, 人们无需复杂的操作便可进行加工, 这是其将来推广乃至大规模生产的巨大优势。所以, 激光微纳加工将有助于推动太阳能海水淡化技术走向实际应用, 并成为未来一个重要的研究方向。

## 参考文献

- [1] Xia Y, Kang Y, Wang Z Y, et al. Rational designs of interfacial-heating solar-thermal desalination devices: recent progress and remaining challenges[J]. *J Mater Chem A*, 2021, 9(11): 6612-6633.
- [2] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. *Sci Adv*, 2016, 2(2): e1500323.
- [3] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. *Nanosci Technol*, 2009: 337-346.
- [4] Shatat M, Worall M, Riffat S. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review[J]. *Sust Cit Soc*, 2013, 9: 67-80.
- [5] El-Sadek A. Water desalination: An imperative measure for water security in Egypt[J]. *Desalination*, 2010, 250(3): 876-884.
- [6] Youssef P G, Al-Dadah R K, Mahmoud S M. Comparative analysis of desalination technologies[J]. *Energy Proc*, 2014, 61:

- 2604–2607.
- [7] Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment[J]. *Science*, 2011, **333** (6043): 712–717.
- [8] Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wie J M. Advances in seawater desalination technologies[J]. *Desalination*, 2008, **221**(1-3): 47–69.
- [9] Peñate B, García-Rodríguez L. Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology[J]. *Desalination*, 2012, **284**: 1–8.
- [10] Al-Karaghoul A, Kazmerski L L. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2013, **24**: 343–356.
- [11] Miller S, Shemer H, Semiat R. Energy and environmental issues in desalination[J]. *Desalination*, 2015, **366**: 2–8.
- [12] Lee K P, Arnot T C, Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential[J]. *J Membrane Sci*, 2011, **370**(1-2): 1–20.
- [13] Ahmed F E, Hashaikeh R, Hilal N. Solar powered desalination—Technology, energy and future outlook[J]. *Desalination*, 2019, **453**: 54–76.
- [14] Kumar A, Kumar K, Kaushik N, et al. Renewable energy in India: current status and future potentials[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2010, **14**(8): 2434–2442.
- [15] Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. *Nature*, 2012, **488**(7411): 294–303.
- [16] Lewis N S. Research opportunities to advance solar energy utilization[J]. *Science*, 2016, **351**(6271): aad1920.
- [17] Arunkumar T, Jayaprakash R, Denkenberger D, et al. An experimental study on a hemispherical solar still[J]. *Desalination*, 2012, **286**: 342–348.
- [18] Kabeel A E, Khalil A, Omara Z M, et al. Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still[J]. *Desalination*, 2012, **289**: 12–20.
- [19] Omara Z M, Kabeel A E, Younes M M. Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors[J]. *Desalination*, 2013, **314**: 67–72.
- [20] Sivakumar V, Sundaram E G. Improvement techniques of solar still efficiency: A review[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2013, **28**: 246–264.
- [21] Dumitru G, Lüscher B, Krack M, et al. Laser processing of hardmetals: Physical basics and applications[J]. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2005, **23**(4-6): 278–286.
- [22] Naeem M. Laser processing of reflective materials: a new technology managing reflection effects[J]. *Laser Techn J*, 2013, **10**(1): 18–20.
- [23] Phillips K C, Gandhi H H, Mazur E, et al. Ultrafast laser processing of materials: a review[J]. *Adv Opt Photon*, 2015, **7**(4): 684–712.
- [24] Zhang C H, Cao M Y, Ma H Y, et al. Morphology - control strategy of the superhydrophobic Poly (Methyl Methacrylate) surface for efficient bubble adhesion and wastewater remediation[J]. *Adv Funct Mater*, 2017, **27**(43): 1702020.
- [25] Wu X F, Yin H L, Li Q. Femtosecond laser processing of carbon nanotubes film[J]. *Chin J Lasers*, 2019, **46**(9): 0902002. 吴雪峰, 尹海亮, 李强. 飞秒激光加工碳纳米管薄膜试验研究[J]. *中国激光*, 2019, **46**(9): 0902002.
- [26] Wang Z H, Wang B X, Fu Y S, et al. Fabrication of silicon micro/nanostructures based on laser interference ablation[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2019, **56**(16): 163201. 王子涵, 王宝续, 釜野胜, 等. 基于激光干涉烧蚀的硅表面微纳结构制备研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, **56**(16): 163201.
- [27] Allmen M V, Blatter A. *Laser-Beam Interactions with Materials: Physical Principles and Applications*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [28] Liao Y L, Ye C, Cheng G J. A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique[J]. *Opt Laser Technol*, 2016, **78**: 15–24.
- [29] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. *Light Sci Appl*, 2016, **5**(8): e16133–e16133.
- [30] Zhang B, Wang L, Chen F. Recent advances in femtosecond laser processing of LiNbO<sub>3</sub> crystals for photonic applications[J]. *Laser Photonics Rev*, 2020, **14**(8): 1900407.
- [31] Hecht J. A short history of laser development[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(25): F99–F122.
- [32] Yiannakou C, Simitzi C, Manousaki A, et al. Cell patterning via laser micro/nano structured silicon surfaces[J]. *Biofabrication*, 2017, **9**(2): 025024.
- [33] Aizawa T, Inohara T, Wasa K. Femtosecond Laser Micro-/nanotexturing of stainless steels for surface property control[J]. *Micromachines (Basel)*, 2019, **10**(8): 512.
- [34] Kwon M H, Shin H S, Chu C N. Fabrication of a superhydrophobic surface on metal using laser ablation and electrodeposition[J]. *Appl Surf Sci*, 2014, **288**: 222–228.
- [35] Chitnis G, Ding Z W, Chang C L, et al. Laser-treated hydrophobic paper: an inexpensive microfluidic platform[J]. *Lab Chip*, 2011, **11**(6): 1161–1165.
- [36] Farschian B, Gatabi J R, Bernick S M, et al. Laser-induced superhydrophobic grid patterns on PDMS for droplet arrays formation[J]. *Appl Surf Sci*, 2017, **396**: 359–365.
- [37] Das R, Arunachalam S, Ahmad Z, et al. Bio-inspired gas-entrapping membranes (GEMs) derived from common water-wet materials for green desalination[J]. *J Membr Sci*, 2019, **588**: 117185.
- [38] Mason A, Mohammadighaleni M, Nejati S. Fabrication of composite membranes for solar-thermal desalination[J]. 2020, **4**: 1–6. .
- [39] Wang Y L, Li G J, Chan K C. Cost-effective and eco-friendly laser-processed cotton paper for high-performance solar evaporation[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2020, **218**: 110693.
- [40] Cao X W, Chen Q D, Fan H, et al. Liquid-assisted femtosecond laser precision-machining of silica[J]. *Nanomaterials*, 2018, **8**(5): 287.
- [41] Chong T C, Hong M H, Shi L P. Laser precision engineering: from microfabrication to nanoprocessing[J]. *Laser Photonics Rev*, 2010, **4**(1): 123–143.
- [42] Ullah I, Rasul M G. Recent developments in solar thermal desalination technologies: a review[J]. *Energies*, 2019, **12**(1): 119.
- [43] Sharon H, Reddy K S. A review of solar energy driven desalination technologies[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, **41**: 1080–1118.
- [44] Zhang P P, Liao Q H, Yao H Z, et al. Direct solar steam generation system for clean water production[J]. *Energy Stor Mater*, 2019, **18**: 429–446.
- [45] Dwivedi V K, Tiwari G N. Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode[J]. *Desalination*, 2010, **250**(1): 49–55.
- [46] Mahdi J T, Smith B E, Sharif A O. An experimental wick-type

- solar still system: design and construction[J]. *Desalination*, 2011, **267**(2-3): 233–238.
- [47] Hou W B, Cronin S B. A review of surface plasmon resonance - enhanced photocatalysis[J]. *Adv Funct Mater*, 2013, **23**(13): 1612–1619.
- [48] Zijlstra P, Paulo P M R, Orrit M. Optical detection of single non-absorbing molecules using the surface plasmon resonance of a gold nanorod[J]. *Nat Nanotechnol*, 2012, **7**(6): 379–382.
- [49] Zhang D Q, Wen M C, Zhang S S, et al. Au nanoparticles enhanced rutile TiO<sub>2</sub> nanorod bundles with high visible-light photocatalytic performance for NO oxidation[J]. *Appl Catal B: Environ*, 2014, **147**: 610–616.
- [50] Ishii S, Sugavaneshwar R P, Chen K, et al. Solar water heating and vaporization with silicon nanoparticles at mie resonances[J]. *Opt Mater Expr*, 2016, **6**(2): 640–648.
- [51] Fang Z Y, Zhen Y R, Neumann O, et al. Evolution of light-induced vapor generation at a liquid-immersed metallic nanoparticle[J]. *Nano Lett*, 2013, **13**(4): 1736–1742.
- [52] Guo A K, Ming X, Fu Y, et al. Fiber-based, double-sided, reduced graphene oxide films for efficient solar vapor generation[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, **9**(35): 29958–29964.
- [53] Han D X, Meng Z G, Wu D X, et al. Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption[J]. *Nanoscale Res Lett*, 2011, **6**(1): 457.
- [54] Chang C, Yang C, Liu Y M, et al. Efficient solar-thermal energy harvest driven by interfacial plasmonic heating-assisted evaporation[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, **8**(35): 23412–23418.
- [55] Wang X, Liu Q C, Wu S Y, et al. Multilayer polypyrrole nanosheets with self - organized surface structures for flexible and efficient solar–thermal energy conversion[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(19): 1807716.
- [56] Ito Y, Tanabe Y, Han J H, et al. Multifunctional porous graphene for high - efficiency steam generation by heat localization[J]. *Adv Mater*, 2015, **27**(29): 4302–4307.
- [57] Lin X F, Chen J Y, Yuan Z K, et al. Integrative solar absorbers for highly efficient solar steam generation[J]. *J Mater Chem A*, 2018, **6**(11): 4642–4648.
- [58] Li T, Liu H, Zhao X P, et al. Scalable and highly efficient mesoporous wood - based solar steam generation device: localized heat, rapid water transport[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, **28**(16): 1707134.
- [59] Zhou L, Tan Y L, Ji D X, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. *Sci Adv*, 2016, **2**(4): e1501227.
- [60] Liu H D, Zhang X T, Hong Z X, et al. A bioinspired capillary-driven pump for solar vapor generation[J]. *Nano Energy*, 2017, **42**: 115–121.
- [61] Liu Y M, Chen J W, Guo D W, et al. Floatable, self-cleaning, and carbon-black-based superhydrophobic gauze for the solar evaporation enhancement at the air–water interface[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, **7**(24): 13645–13652.
- [62] Lou J W, Liu Y, Wang Z Y, et al. Bioinspired multifunctional paper-based rGO composites for solar-driven clean water generation[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, **8**(23): 14628–14636.
- [63] McEnaney K, Weinstein L, Kraemer D, et al. Aerogel-based solar thermal receivers[J]. *Nano Energy*, 2017, **40**: 180–186.
- [64] Zhou L, Tan Y L, Wang J Y, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(6): 393–398.
- [65] Gao M M, Zhu L L, Peh C K, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production[J]. *Energy Environ Sci*, 2019, **12**(3): 841–864.
- [66] Yang H, Liu G Y, Zou H B, et al. The design of a solar desalination device control system[J]. *J Hangzhou Dianzi Univ*, 2014, **34**(1): 79–82.
- [67] Boriskina S V, Tong J K, Hsu W C, et al. Heat meets light on the nanoscale[J]. *Nanophotonics*, 2016, **5**(1): 134–160.
- [68] Yao J D, Zheng Z Q, Yang G W. Alloying-assisted phonon engineering of layered BiInSe<sub>3</sub>@ nickel foam for efficient solar-enabled water evaporation[J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(42): 16396–16403.
- [69] Yao J D, Zheng Z Q, Yang G W. Layered tin monoselenide as advanced photothermal conversion materials for efficient solar energy-driven water evaporation[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(6): 2876–2886.
- [70] Ni G, Li G, Boriskina S V, et al. Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration[J]. *Nat Energy*, 2016, **1**(9): 16126.
- [71] Wei T Q, Li X Q, Li J L, et al. Interfacial solar vapor generation[J]. *Chin Sci Bull*, 2018, **63**(14): 1404–1416.
- [72] Little D J, Ams M, Dekker P, et al. Femtosecond laser modification of fused silica: the effect of writing polarization on Si-O ring structure[J]. *Opt Expr*, 2008, **16**(24): 20029–20037.
- [73] Sugioka K, Cheng Y. Femtosecond laser processing for optofluidic fabrication[J]. *Lab Chip*, 2012, **12**(19): 3576–3589.
- [74] Wu J R, He J, Yin K, et al. Robust hierarchical porous PTFE film fabricated via femtosecond laser for self-cleaning passive cooling[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(10): 4209–4216.
- [75] Wu Z P, Yin K, Wu J R, et al. Femtosecond laser micro-nano fabrication of underwater gas wettable surface[J]. *Laser Optoelectr Progr*, 2020, **57**(11): 111418.
- [76] Sugioka K, Xu J, Wu D, et al. Femtosecond laser 3D micromachining: a powerful tool for the fabrication of microfluidic, optofluidic, and electrofluidic devices based on glass[J]. *Lab Chip*, 2014, **14**(18): 3447–3458.
- [77] Yin K, Dong X R, Zhang F, et al. Superamphiphobic miniature boat fabricated by laser micromachining[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(12): 121909.
- [78] Wu J R, Yin K, Li M, et al. Under-oil self-driven and directional transport of water on a femtosecond laser-processed superhydrophilic geometry-gradient structure[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(6): 4077–4084.
- [79] Vorobyev A Y, Guo C L. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, **7**(3): 385–407.
- [80] Ye R Q, James D K, Tour J M. Laser-induced graphene[J]. *Acc Chem Res*, 2018, **51**(7): 1609–1620.
- [81] Ye R Q, James D K, Tour J M. Laser-induced graphene: from discovery to translation[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(1): e1803621.
- [82] Barbhuiya N H, Kumar A, Singh S P. A journey of laser-induced graphene in water treatment[J]. *Trans Indian Nat Acad Eng*, 2021, **6**(2): 159–171.
- [83] Wang F C, Wang K D, Zheng B X, et al. Laser-induced graphene: preparation, functionalization and applications[J]. *Mater Technol*, 2018, **33**(5): 340–356.
- [84] Tittle C M, Yilman D, Pope M A, et al. Robust superhydrophobic laser-induced graphene for desalination applications[J]. *Adv Mater Technol*, 2018, **3**(2): 1700207.



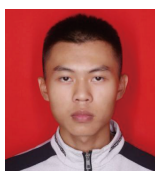
- [85] Cheng L, Guo W H, Cao X H, et al. Laser-induced graphene for environmental applications: progress and opportunities[J]. *Mater Chem Front*, 2021, **5**(13): 4874–4891.
- [86] Yang H C, Hou J, Chen V, et al. Janus membranes: exploring duality for advanced separation[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2016, **55**(43): 13398–13407.
- [87] Yang Y B, Yang X D, Fu L N, et al. Two-dimensional flexible bilayer Janus membrane for advanced photothermal water desalination[J]. *ACS Energy Lett*, 2018, **3**(5): 1165–1171.
- [88] Li G J, Law W C, Chan K C. Floating, highly efficient, and scalable graphene membranes for seawater desalination using solar energy[J]. *Green Chem*, 2018, **20**(16): 3689–3695.
- [89] Akhavan M, Schofield J, Jalili S. Water transport and desalination through double-layer graphyne membranes[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2018, **20**(19): 13607–13615.
- [90] Jang H, Choi J, Lee H, et al. Corrugated wood fabricated using laser-induced graphitization for salt-resistant solar steam generation[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(27): 30320–30327.
- [91] Ye R Q, Chyan Y, Zhang J B, et al. Laser - induced graphene formation on wood[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(37): 1702211.
- [92] Ghafurian M M, Niazmand H, Goharshadi E K, et al. Enhanced solar desalination by delignified wood coated with bimetallic Fe/Pd nanoparticles[J]. *Desalination*, 2020, **493**: 114657.
- [93] 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.
- [94] Yang S, Yin K, Chu D K, et al. Femtosecond laser structuring of Janus foam: Water spontaneous antigravity unidirectional penetration and pumping[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, **113**(20): 203701.
- [95] Kim M, Yang K, Kim Y S, et al. Laser-induced photothermal generation of flexible and salt-resistant monolithic bilayer membranes for efficient solar desalination[J]. *Carbon*, 2020, **164**: 349–356.
- [96] Jiang H Q, Tong L, Liu H D, et al. Graphene-metal-metastructure monolith via laser shock-induced thermochemical stitching of MOF crystals[J]. *Matter*, 2020, **2**(6): 1535–1549.

## 作者简介



余星 (2001-), 中南大学物理与电子学院 2019 级在读本科生, 于 2020 年跟随银恺老师从事有关飞秒激光的研究与学习。

E-mail: yuxing18890382770@163.com



严俊森 (2002-), 中南大学物理与电子学院 2019 级在读本科生, 于 2020 年跟随银恺老师从事飞秒激光加工相关的研究学习。

E-mail: 1097130741@qq.com

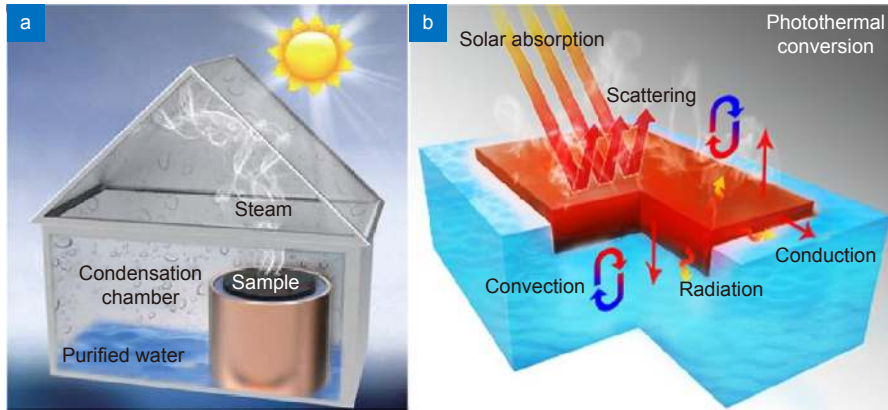


【通信作者】银恺 (1988-), 中南大学副教授。2016 年博士毕业于中南大学, 一直从事超快激光微纳制造方法与功能性材料制备研究, 主持国家自然科学基金面上/青年项目、湖南省优秀项目, 入选湖湘青年英才计划。以第一/通讯身份在 *Nano Lett.*, *J. Mater. Chem. A.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, *Appl. Phys. Lett.* 等发表学术论文 36 篇, 12 篇入选高被引/热点论文。

E-mail: kaiyin@csu.edu.cn

# Research progress of solar desalination materials produced by laser micro-nano fabrication

Yu Xing<sup>1</sup>, Yan Junsen<sup>1</sup>, Wu Zhipeng<sup>1</sup>, Wu Tingni<sup>1</sup>, Yin Kai<sup>1,2\*</sup>



Schematic diagram of laser processing device: (a) Laser processing mode one; (b) Laser processing mode two

**Overview:** Seawater desalination technology plays an important role in solving the problem of water resource shortage. In particular, the research of solar seawater technology has attracted more attentions. As an advanced and convenient fabrication method, laser micro/nano-preparation technology has achieved some research results in the field of fabricating the seawater desalination materials in recent years. Based on the research background of solar desalination and laser processing technology, this paper systematically reviews the research progress of laser micro/nano-processing technology to prepare seawater desalination materials in recent years.

In the study of solar water desalination, functional materials are made to improve the efficiency of solar water evaporation. In addition, the position of functional materials in water also greatly affects the light utilization rate. A large number of studies have shown that placing functional materials on water surface is the most efficient mode to utilize light. Based on this model, not only do the functional materials require excellent optical properties, which can ensure efficient broadband solar absorption, but also they need good thermal management capabilities in order to reduce heat loss. With the development of research, people have higher requirements on machining accuracy and material functionality. However, traditional micro/nano-processing methods, such as chemical treatment, can not well meet the needs. Therefore, after a long time of exploration, laser micro/nano-machining is favored because of its high power density, high precision, wide application range and other advantages. It gradually becomes an important method in the field of micro/nano-processing, and has been widely used in the study of seawater desalination materials. The researches on laser manufacturing of seawater desalination materials in recent years are divided into three parts: carbon based, metal based and composite based materials.

The development of seawater desalination technology and laser micro/nano-processing technology are still in its infancy, and there is still a long way to go before they can be applied in industrial production. However, with the deepening of research, a new generation of high-power and high-frequency lasers will develop rapidly. The laser micro/nano-machining technology will provide higher manufacturing efficiency and operation stability at the lower cost, and the mechanism of laser processing technology will be understood more clearly. It is believed that laser micro/nano-processing will gradually promote the practice of solar water desalination and become an important research field in the future.

Yu X, Yan J S, Wu Z P, et al. Research progress of solar desalination materials produced by laser micro-nano fabrication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(1): 210313; DOI: 10.12086/oe.2022.210313

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075557, 51805553), Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ20067), and Independent Project of State Key Laboratory of High-performance Complex Manufacturing, Central South University (ZZyJKT2019-12)

<sup>1</sup>Hunan Key Laboratory of Nanophotonics and Devices, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

\* E-mail: kaiyin@csu.edu.cn