

文章编号 1004-924X(2024)15-2334-10

具有高吸收性能的柔性超黑表面

吴家政^{1,2}, 安 阳¹, 李 炜^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:超黑表面在热辐射等领域发挥着重要作用,为了制备具有宽光谱高吸收特性的超黑表面,并且简化制备流程、降低成本,提出一种基于飞秒激光和倒模技术的制造方法。实验以激光加工的铜片为母版,探究激光参数对微结构形貌尺寸的影响,选取合适参数进行周期性微结构的加工。利用二次模具将周期性微结构与黑漆基底进行结合,获得一种在太阳光谱宽波段具有全向高吸收性能的柔性超黑表面。最后,利用超黑表面联合氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)透明玻璃提出一种太阳能吸收器设计方法,并进行户外实验验证。实验结果表明:超黑表面在太阳光谱波段具有高达 98.3% 的正入射吸收率,入射角为 70° 大角度时,超黑表面仍具有 90% 以上的吸收率。覆盖有 ITO 透明玻璃的太阳能吸收器最高可提升 4 °C 的器件温度。整体工艺制备流程简单,成本低廉,超黑表面具有柔性基底且可大面积扩展。

关 键 词:飞秒激光加工;倒模;超黑表面;吸收率;微结构阵列

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243215.2334

Flexible ultrablack surface with high absorption performance

WU Jiazheng^{1,2}, AN Yang¹, LI Wei^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: weil1@ciomp.ac.cn

Abstract: Ultrablack surfaces are vital in thermal radiation and other fields. This study introduces a cost-effective method to create ultrablack surfaces with broad spectral and high absorption traits using femtosecond laser and reverse molding technology. It investigates the impact of laser parameters on the morphology and size of copper surface microstructures, determining optimal parameters for periodic microstructure processing. The research develops a process flow that integrates secondary molds with black paint substrates, achieving a flexible ultrablack surface with high absorption across the solar spectrum. An innovative solar absorber design using the ultrablack surface and ITO transparent glass is tested through outdoor experiments. The results demonstrate absorption rates of up to 98.3% for normal incidence and over 90% at a 70° angle. The solar absorber with ITO glass can increase the de-

收稿日期:2024-05-07;修订日期:2024-05-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62134009, No. 62121005)

vice temperature by up to 4 °C. The process is simple, cost-effective, and suitable for large-scale application due to its flexible substrate.

Key words: femtosecond laser fabrication; inverted mold; ultrablack surface; absorption rate; micro-structure array

1 引言

超黑表面^[1-2]具有超高吸收率和优异的抗反射特性,是一种备受关注的材料。近年来,超黑表面在国内外发展很快,已广泛应用于热辐射^[3-5]、高性能光学器件^[6-7]和红外隐身^[8-9]等领域。在热辐射领域,如何提高太阳能转化效率,提升表面材料吸收太阳能的能力,成为一个亟待解决的问题^[10-13]。超黑表面一般要求在全向入射角都具有较低的反射率,可以很好地吸收掉大角度的入射光,使表面呈现几乎完全吸收光线的特性。

随着纳米技术和表面材料的发展,科研人员已经成功制备了一些性能较好的超黑表面材料。这些材料通常利用微纳米结构、多层复合结构或特殊表面涂层等方式,有效降低了反射率,达到了超低反射的效果。目前,黑色的消光涂层^[14-17]已经商用,反射率大多在 5% 以下,采用碳纳米管^[18-21]、化学刻蚀^[22-24]、纳米压印^[25-27]或飞秒激光^[28-30]等方法,都可以在材料表面形成特殊的陷光结构,使得入射光在表面发生多次反射和折射,最终被材料吸收。

一些超黑表面光学性能优越,在特定波长范围内可以达到 98% 以上的吸收率。国外如以色列的 ACKTAR^[31]、英国的 VantaBlack^[32]和 NPL 公司的 Super Black^[33]、日本的 Musou Black^[34]等产品,国内如清华大学的黑铜^[35]、哈尔滨工业大学的多层喷涂制备的超黑涂层^[36]、上海理工大学通过原子层沉积制备的超黑薄膜^[37]等,目前大都已经处于或正在迈向大面积商用阶段。然而,他们的制备方法往往较为复杂,导致价格较为昂贵。除此以外,对于诸多超黑表面的制备方法,还存在着一些别的问题和挑战。部分传统商用消光涂层使用较多、喷涂的方法较为成熟^[14],但吸收率并不高,特别是大角度入射时达不到使用要求^[19,38],并且存在涂层与基体

结合力差^[39]、某些材料较脆易脱落等问题。碳纳米管和相关刻蚀方法制备超黑表面性能较好^[40-41],正入射光吸收率可达 99.9%,大角度如 70°入射角时也具有 98% 以上的吸收率^[1,7],但尚处于实验室研究阶段,制备工艺复杂、成本高昂且机械耐久性差^[17]。激光加工超黑表面的方法难以适用曲面等复杂结构,具有一定局限性^[42]。因此,在获得高吸收性能超黑表面的同时,简化制备工艺、降低成本,提高材料适用性等,成为新的挑战。

本文基于飞秒激光加工技术,提出一种制备抗反射周期性微结构阵列的激光加工方式,联合聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)和腰果壳油黑漆倒模制备出一种含微米级结构的超黑表面,对入射光具有超高吸收特性。实验证明,柔性超黑表面在确保提高光吸收率的同时,制备方法具有低成本、可大面积扩展和适用性强等特点。

2 实验

超黑表面的激光加工装置如图 1 所示,主要由飞秒激光器、光束传输光路、模具基底材料和三维移动平台等组成。其中,激光器为飞秒激光器,中心波长为 1 030 nm,最大单脉冲能量为 400 μJ。透镜及样品安装放置在精密三轴运动平台上,通过配套软件编程控制运动平台在 XYZ 3 个方向的移动,定位精度可达 1 μm。因此,可以满足对制备微米级别周期性结构的运动控制。飞秒激光加工过程中,搭配使用烟雾净化器进行气流辅助,可以减小飞秒激光烧蚀材料过程中的热效应,也可以带走烧蚀过程产生的部分不稳定废屑。样品采用 T2 紫铜板(东莞市粤鑫金属材料),尺寸为 15 mm×15 mm×1.5 mm,加工前使用无水乙醇对样品进行 10 min 超声清洗。

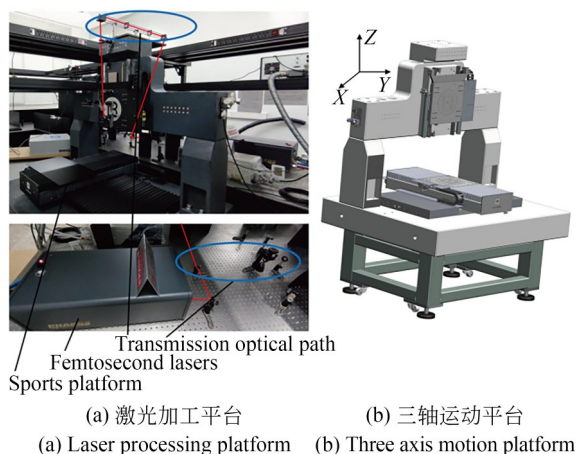


图 1 精密三轴运动激光加工平台

Fig. 1 Precision three-axis motion laser processing platform

飞秒激光加工微结构完成后,需要对微结构表面形貌、几何尺寸及光谱特性进行测试表征。实验中,使用激光共聚焦显微镜对样品表面形貌进行观察表征,扫描电子显微镜对样品微观形貌进行表征,紫外-可见-近红外光谱仪及变角积分球对 $0.2 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 波段进行光谱测试,傅里叶红外光谱仪及积分球对 $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 红外波段进行光谱测试。

3 结果与讨论

3.1 激光加工

实验探究了激光不同功率、扫描速度、扫描次数等参数对加工结构的影响^[43],并选用合适激光参数加工微结构阵列。共聚焦显微镜测量所得的微结构数据如图 2 所示。

在扫描速度为 2 mm/s ,加工一次时,不同激光功率对铜刻蚀的影响如图 2(a)所示。激光功率分别设置为 $0.1, 0.5, 1, 2, 5 \text{ W}$,刻蚀出不同结构形貌的微槽。从图中可以看出,当功率为 0.1 W 时,铜表面加工痕迹较浅;随着激光功率增大,微槽深度也在变大,但明显地,大功率时加工产生的颗粒变多,在微槽顶部周围产生明显堆积。而 1 W 功率在满足较大深宽比的同时,微槽周围无明显纳米颗粒堆积。

在 1 W 激光功率和加工一次的条件,扫描速度分别为 $1, 2, 3, 4, 5 \text{ mm/s}$ 时,微槽的形貌特征如图 2(b)所示。随着扫描速度的增加,微槽的深度不断减小,但在 1 mm/s 的速度下,材料顶部有山丘凸起,存在大量颗粒的堆积。因此, 2 mm/s 的扫描速度在满足较大深度的同时,纳米颗粒堆积较少。

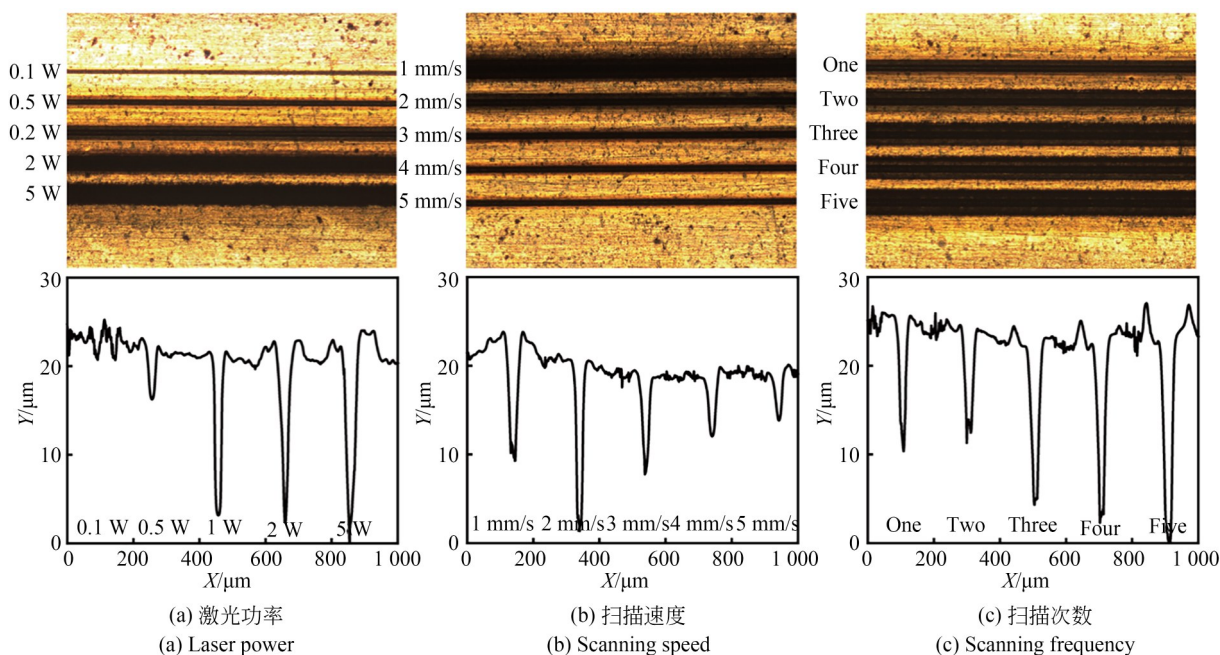


图 2 不同加工参数对烧蚀微槽的影响

Fig. 2 Influence of different processing parameters on ablative micro grooves

在激光功率为 1 W,扫描速度为 2 mm/s 的情况下,扫描次数分别为 1,2,3,4,5 时加工的微槽特征如图 2(c)特征。可以看出,随着扫描次数的增加,微槽深度的增加幅度很小,原因在于固定焦点位置时,受焦深限制,后续激光加工并未烧蚀到更深区域的材料。因此,考虑通过变焦多次加工策略,以实现材料的高深宽比结构。

根据实验结果,优化加工参数为:1 W 激光功率、2 mm/s 扫描速度、扫描 3 次后移动 Z 轴,下移焦点位置重复加工。利用程序控制进行 XY 两个方向的扫描加工,得到具有周期性结构的微阵列铜表面,微观形貌特征如图 3 所示,线宽为 51 μm ,深度达 81 μm ,形成的周期性深槽对入射光具有陷光效应。虽然这种飞秒激光加工得到的黑铜表面具有较好的光学特性,但其加工时间较长,材料适用性低,对基底形状具有一定选择性。因此,本文利用倒模方式将微结构转移到黑漆表面,固化后可以得到具有柔性基底的超黑表面,能够适用于多种场景。

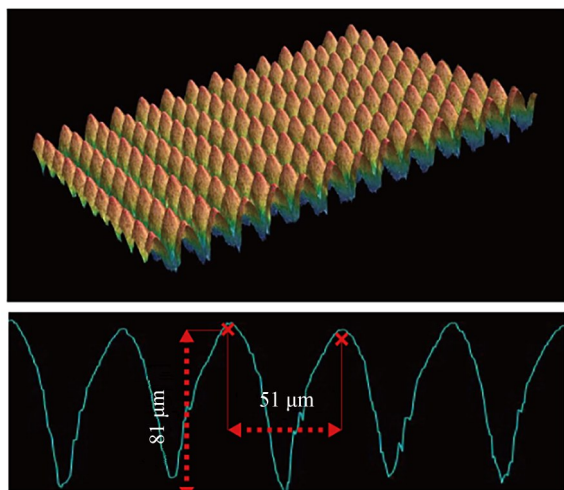


图 3 激光加工后铜表面微结构阵列

Fig. 3 Microstructure array on copper surface after laser processing

3.2 黑漆倒模

聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种广泛用于微流控芯片等微纳结构制造和成型的聚合物,这里选用的 PDMS 型号为道康宁 SYLGARD 184。通过 PDMS 作为二次模具,复制铜表面的微结构阵列,图 4 为含有微结构的激光加工铜样品以及倒模后的 PDMS 模具。然后,将 PDMS 压印黑漆

表面,固化后可以得到含有微结构的黑漆。

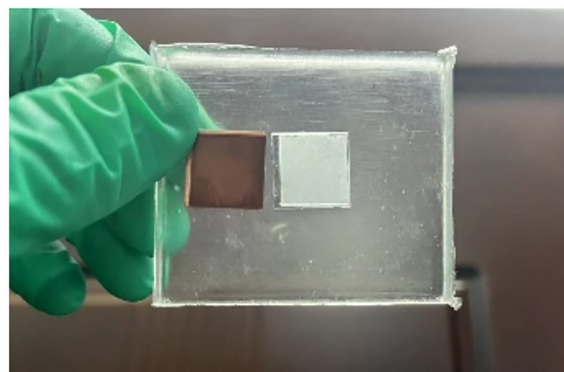


图 4 铜模具及 PDMS 模具

Fig. 4 Copper molds and PDMS molds

实验选用一款价格低廉、对人体无害的腰果壳油黑漆作为吸光材料,该黑漆为油性漆,具有自流平的特性,且对于涂覆基底无选择性。本文分别采用喷涂和自流平的方式在铝片、聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, PET)、无孔聚乙烯(Polyethylene, PE)等材料上进行涂覆固化后,测量它们在可见光波段的吸收率,结果如图 5 所示。各种基底上的黑漆正入射吸收率相差较小,均居于 94%~95% 之间。

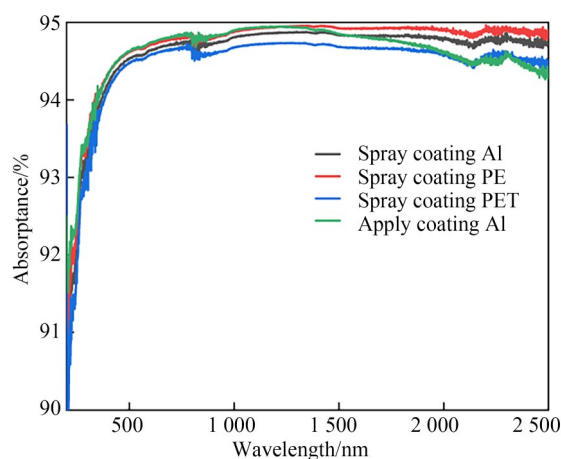


图 5 腰果壳油黑漆光谱

Fig. 5 Spectral of cashew shell oil black paint

通过 PDMS 模具将微结构阵列二次复制到涂覆在 PET 基底上的腰果壳油黑漆后,可以轻松去除 PDMS 模具脱模,得到微结构和黑漆结合的超黑表面。如图 6 所示,通过多次实验制备了

多块大小一致($1.5\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$)的超黑表面,还可以扩展为较大面积样品($3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$)。后续通过增大激光加工铜样品母模具的面积,可以获得供实际使用的超黑样品。



图6 超黑表面实物

Fig. 6 Physical image of ultrablack surface

本研究选择一种防静电黑色尼龙布作为材料基底,将可扩展的超黑表面粘贴在尼龙布表面,以消除扩展超黑表面时产生的空白缝隙。经过多次测试发现,黑色尼龙布不影响超黑表面的光学性能。实验制备了在太阳光谱宽波段具有高达98.3%正入射吸收率的超黑表面,如图7所示,对于吸收太阳光具有显著的提升效果。另外,测试了超黑表面样品在光线大角度入射时的

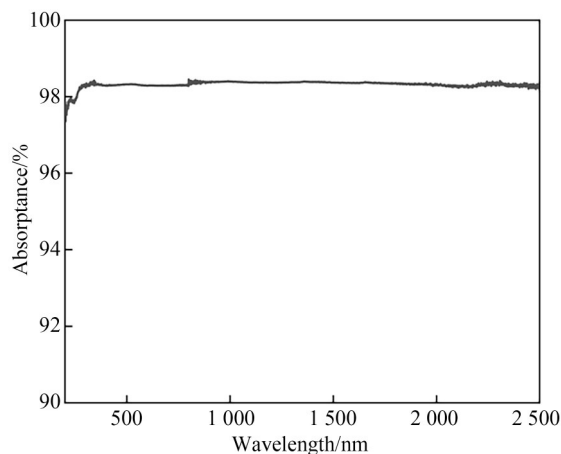


图7 超黑表面光谱

Fig. 7 Ultrablack surface spectrogram

吸收性能,如图8所示。超黑表面在 60° 时具有96%以上的吸收率;即使入射角高达 70° 时,仍具有90%以上的平均吸收率。

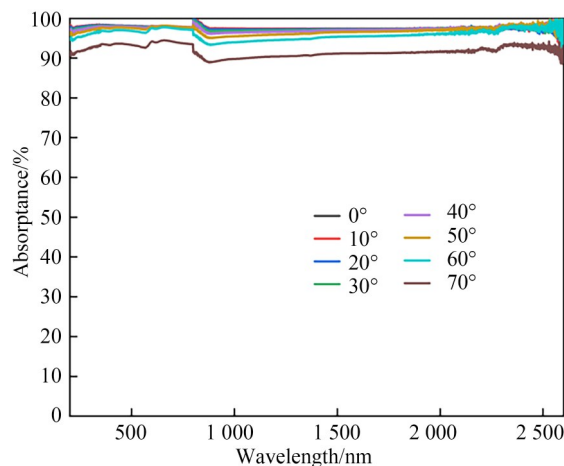


图8 超黑表面的不同角度光谱

Fig. 8 Spectra of ultrablack surfaces at different angles

4 太阳能吸收器户外验证实验

4.1 验证实验装置搭建

ITO是一种在可见光波段具有高透过性,在红外波段高反射的光学材料,在液晶显示、光学探测等领域都具有较广阔的应用场景^[44]。本文利用超黑表面在宽波段对太阳光的高吸收率,结合ITO材料的可见波段高透过,红外波段高反射的特性,设计了一款太阳能吸收器,可以一定程度提高器件的光热转换能力。太阳光辐射时,99.9%的能量集中在紫外-可见光-近红外波段,而器件向外太空辐射热量的大气透明窗口主要在 $8\sim 13\text{ }\mu\text{m}$ 波段。ITO在大气窗口具有低发射率特性,能够抑制具有超高发射率的超黑表面在大气窗口向外辐射导致的热量损失,进而提高超黑表面的温度。值得一提的是,根据基尔霍夫定律,在稳态条件下,吸收率和发射率相等。因此,本研究采用在太阳光谱波段具有较高透过率,在红外大气窗口波段具有较高反射率的ITO材料。ITO材料可以蒸镀在较多基底材料上,目前使用较多的为PET基底和玻璃基底,不同的ITO与金属掺杂比例具有不同的阻值,光学性能也不同。如图9所示,实验选取不同阻值的ITO透明

玻璃,分别测试了它们在太阳光谱波段的透过率以及在红外波段的反射率。由图可知,ITO 透明玻璃在太阳光谱波段的透过率随阻值的增大而增大,红外波段的反射率随阻值的增大而减小。因此,综合考虑之下,本实验选取阻值为 $15\ \Omega$ 的

ITO 透明玻璃进行温度测试。另外,ITO-PET 在可见附近波段透射率最低,性能较差;但在红外大气窗口波段反射率最高,性能最好,因此,后续本文选取相同阻值的 ITO-PET 进行对比测试。

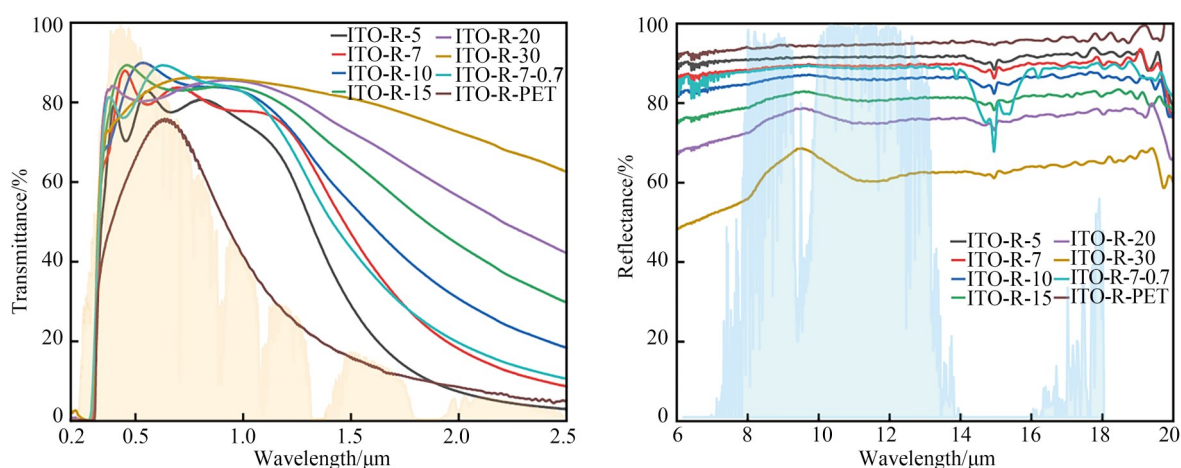


图9 不同阻值 ITO 透明玻璃的太阳光谱波段的透射率光谱及红外波段反射率光谱

Fig. 9 Transmittance spectra in solar spectral band and reflectance spectra in infrared band of ITO transparent glasses with different resistance values

4.2 ITO 透明玻璃测温实验

测试中,将阻值为 $15\ \Omega$ 的 ITO 透明玻璃覆盖在全波段具有极低反射率的超黑表面上组成太阳能吸收器。如图 10 所示,ITO 透明玻璃在太阳光谱波段具有 61% 的平均透射率,在红外大气窗口 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段的平均反射率高达 72%,即较低的发射率。其中,太阳光谱波段和红外波段的平均反射率分别基于 AM1.5 太阳光谱和黑体辐射谱进行平均求得。实验装置如图 11 所示,利用泡沫块减少器件底部的热损失;上表面通过 PE 薄膜进行覆盖,四周用泡沫胶带作为支撑,一方面减少对流的影响,减少装置与环境之间的换



图 11 户外实验装置

Fig. 11 Outdoor experimental setup

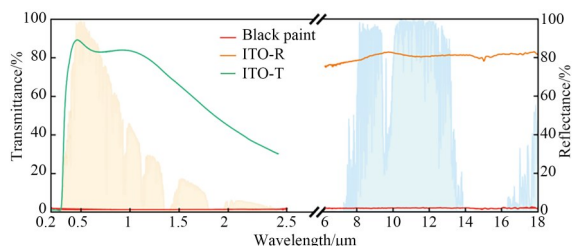


图 10 ITO 透明玻璃及超黑表面在可见及红外波段光谱
Fig. 10 ITO transparent glass and ultrablack surface spectra in visible and infrared bands

热,另一方面四周的透明 PE 膜不会阻碍吸收器对大角度太阳光的吸收。K 型热电偶粘贴在超黑表面样品背部测量器件温度,利用热电偶连接金属测试环境温度,利用温度数据采集器 (RDXL 6SD-USB, Omega) 收集所有温度。实验设置超黑表面与 ITO 玻璃组成的太阳能吸收器作为实验组,设置超黑表面、超黑表面与透明玻璃组成的太阳能吸收器作为对照组。

测温结果如图 12 所示,相较于仅超黑表面,具有 ITO 透明玻璃遮挡超黑表面的太阳能吸收器具有整体较高的温度,最高提升可达 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,显示出优秀的光热转换能力,可以有效抑制辐射热量,提高器件的整体温度。而透明玻璃在太阳光谱波段具有高透过性,在红外波段具有高吸收,即高发射性能。因此,覆盖透明玻璃的超黑表面器件温度与仅超黑表面无较大差别。另外,在傍晚时分,太阳光逐渐消失,吸收能量逐渐少于器件通过大气窗口的辐射能量,因此器件温度不断降低,甚至低于环境温度。夜晚太阳光完全消失,仅剩向外辐射热量,此时处于辐射制冷状态。ITO 透明玻璃的发射率最低,在 20% 左右;透明玻璃的发射率较高,在 80% 左右;超黑表面的发射率最高,接近 1。因此,覆盖 ITO 的太阳能吸收器在夜间温度仍旧最高,超黑表面温度最低。

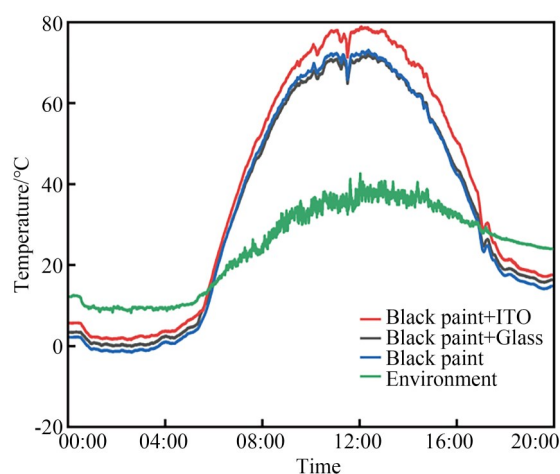


图 12 ITO 玻璃户外温度测试结果

Fig. 12 ITO glass outdoor temperature test results

4.3 ITO-PET 测温实验

为了研究红外辐射和可见吸收对太阳能吸收器效果的影响,选择具有极高红外反射率的 ITO 进行测试。ITO-PET 及超黑表面的光谱如图 13 所示。超黑表面在可见光附近的太阳光谱波段具有 26% 的平均透过率,在红外大气窗口 $8\sim 13\text{ }\mu\text{m}$ 辐射能量波段具有 93% 的极高反射率,即极低发射率。温度测试结果如图 14 所示,覆盖有 ITO-PET 的太阳能吸收器温度始终低于

超黑表面的温度,温度相差近 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化趋势完全相同;但在傍晚时分,器件温度高于超黑表面温度,原因在于 ITO-PET 在红外波段具有低发射率,相较于超黑表面的高发射率,器件从大气窗口向外太空辐射的能量较少,因此温度较高。另外,ITO 对照组在夜间与太阳能吸收器温度相近,验证了覆盖 ITO 后,器件表面在红外波段的发射率完全由 ITO 提供,不再具有超黑表面的极高发射率。

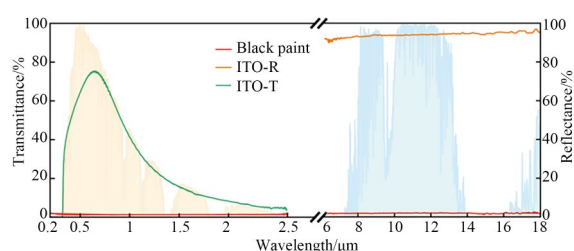


图 13 ITO-PET 及超黑表面在可见光及红外波段的光谱
Fig. 13 Spectra of ITO-PET and ultrablack surface spectra in visible and infrared bands

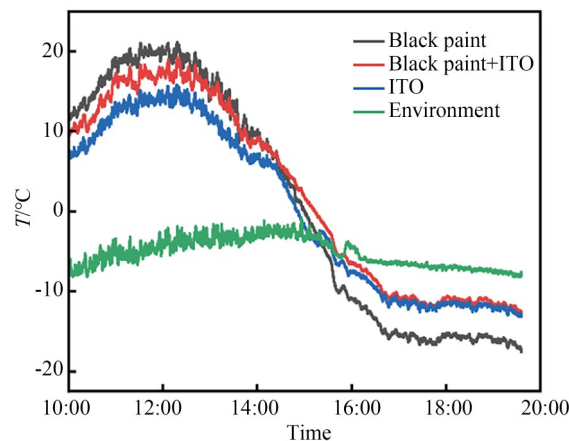


图 14 ITO-PET 户外温度测试结果

Fig. 14 ITO-PET outdoor temperature test results

通过对比 ITO-透明玻璃和 ITO-PET 的户外温度测试结果,可以发现,太阳能吸收器需要在太阳光谱波段具有高透过率,避免影响器件对太阳光的吸收;在红外波段需要具有高反射率,但其影响并不占主导地位。因此,后续应尽可能寻找制备具有可见波段高透过性,红外波段高反射特性的 ITO 材料,以进一步提升太阳能吸收器的光热转换效率。

5 结 论

本文研究了飞秒激光制造中激光功率、扫描速度、扫描次数对铜表面微结构烧蚀产生的影响,选择最佳参数进行周期性微结构阵列的加工,优化超黑表面制备流程,将微结构阵列与黑漆基底相结合,获得一种具有宽光谱超高吸收性能的超黑表面,并联合 ITO 玻璃提出一种太阳能

吸收器设计方案。实验结果表明:超黑表面在太阳光谱波段下的吸收率高达 98.3%,且具有柔性可扩展的制备特性;结合 ITO 玻璃的太阳能吸收器可使器件温度比仅超黑表面提高近 4℃,并有望进一步提高。该柔性超黑表面制造简单、成本低、无基底选择性,并且可大面积扩展,在热辐射、光学系统消杂光、红外隐身等领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] LI H Y, SHEN C, SUN S, *et al.* Magnetically assembled ultrablack surface with omnidirectional and broadband light absorption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(8): 11369-11378.
- [2] HUANG Y F, CHATTOPADHYAY S, JEN Y J, *et al.* Improved broadband and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with biomimetic silicon nanostructures [J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2: 770-774.
- [3] POLITANO A, ARGURIO P, DI PROFIO G, *et al.* Photothermal membrane distillation for seawater desalination [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (2): 1603504.
- [4] WANG H Q, DU A, JI X J, *et al.* Enhanced photothermal conversion by hot-electron effect in ultrablack carbon aerogel for solar steam generation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11 (45): 42057-42065.
- [5] ZHOU L, TAN Y L, JI D X, *et al.* Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation [J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501227.
- [6] SHIMIZU Y, IMBE M, GODO K, *et al.* High-precision flat-plate reference infrared radiator using perfect blackbody composite with a microcavity structure [J]. *Applied Optics*, 2022, 61 (2) : 517-522.
- [7] AMEMIYA K, SHIMIZU Y, KOSHIKAWA H, *et al.* Supreme-black levels enabled by touchproof microcavity surface texture on anti-backscatter matrix [J]. *Science Advances*, 2023, 9(2): eade4853.
- [8] AMEMIYA K, KOSHIKAWA H, IMBE M, *et al.* Perfect blackbody sheets from nano-precision microtextured elastomers for light and thermal radiation management [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(18): 5418-5425.
- [9] MOGHIMI M J, LIN G Y, JIANG H R. Broadband and ultrathin infrared stealth sheets [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20 (11) : 1800038.
- [10] TORRES J F, TSUDA K, MURAKAMI Y, *et al.* Highly efficient and durable solar thermal energy harvesting via scalable hierarchical coatings inspired by stony corals[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(5): 1893-1906.
- [11] ZHOU L, TAN Y L, WANG J Y, *et al.* 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 393-398.
- [12] LENERT A, BIERMAN D M, NAM Y, *et al.* A nanophotonic solar thermophotovoltaic device [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9: 126-130.
- [13] ZHU G L, XU J J, ZHAO W L, *et al.* Constructing black titania with unique nanocage structure for solar desalination [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(46): 31716-31721.
- [14] 张建贤, 邹永军, 徐蕾, 等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. *宇航材料工艺*, 2014, 44(6): 88-90.
- ZHANG J X, ZOU Y J, XU L, *et al.* Matte coating and its application in optical system [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 44(6): 88-90. (in Chinese)
- [15] FU Y Y, LIU Y, LI H. Efficient coating fabrication of onion-like carbon nanoparticles via aerosol deposition[J]. *Particuology*, 2020, 53: 58-62.
- [16] TU C, CAI W F, CHEN X, *et al.* A 3D-structured sustainable solar-driven steam generator using super-black nylon flocking materials [J]. *Small*, 2019, 15(37): e1902070.
- [17] GUO J, LI D D, QIAN Z C, *et al.* Carbon vesi-

- cles: a symmetry-breaking strategy for wide-band and solvent-processable ultrablack coating materials [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30 (17): 1909877.
- [18] SIWAL S S, SAINI A K, RAROTRA S, *et al.* Recent advancements in transparent carbon nanotube films: chemistry and imminent challenges[J]. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2021, 11 (1): 93-130.
- [19] DE NICOLA F, HINES P, DE CRESCENZI M, *et al.* Moth-eye effect in hierarchical carbon nanotube anti-reflective coatings [J]. *Carbon*, 2016, 108: 262-267.
- [20] CUI K H, WARDLE B L. Breakdown of native oxide enables multifunctional, free-form carbon nanotube - metal hierarchical architectures [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11 (38): 35212-35220.
- [21] 郝云彩, 余成武, 梁士通, 等. 新一代星敏感器遮光罩: 碳纳米管遮光罩技术研究[J]. *空间控制技术与应用*, 2016, 42(2): 1-7, 31.
- HAO Y C, YU CH W, LIANG SH T, *et al.* New generation of star tracker baffle-CNT baffle [J]. *Aerospace Control and Application*, 2016, 42 (2): 1-7, 31. (in Chinese)
- [22] NAJAR A, CHARRIER J, PIRASTEH P, *et al.* Ultra-low reflection porous silicon nanowires for solar cell applications [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16861-16870.
- [23] TOMA M, LOGET G, CORN R M. Fabrication of broadband antireflective plasmonic gold nancone arrays on flexible polymer films [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(12): 6164-6169.
- [24] CHEN X, FAN Z C, XU Y, *et al.* Fabrication of biomimic GaAs subwavelength grating structures for broadband and angular-independent antireflection [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88 (9): 2889-2893.
- [25] SAISON T, PEROZ C, CHAUVEAU V, *et al.* Replication of butterfly wing and natural lotus leaf structures by nanoimprint on silica sol-gel films[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2008, 3 (4) : 046004.
- [26] KIM J G, CHOI H J, PARK K C, *et al.* Multifunctional inverted nancone arrays for non-wetting, self-cleaning transparent surface with high mechanical robustness [J]. *Small*, 2014, 10 (12) : 2487-2494.
- [27] LOTZ M R, PETERSEN C R, MARKOS C, *et al.* Direct nanoimprinting of moth-eye structures in chalcogenide glass for broadband antireflection in the mid-infrared[J]. *Optica*, 2018, 5(5): 557.
- [28] ZHENG B X, WANG W J, JIANG G D, *et al.* Fabrication of broadband antireflective black metal surfaces with ultra-light-trapping structures by picosecond laser texturing and chemical fluorination [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(6): 180.
- [29] CHEN T, WANG W J, TAO T, *et al.* Deposition and melting behaviors for formation of micro/nano structures from nanostructures with femtosecond pulses [J]. *Optical Materials*, 2018, 78: 380-387.
- [30] LOU R, ZHANG G D, LI G Y, *et al.* Design and fabrication of dual-scale broadband antireflective structures on metal surfaces by using nanosecond and femtosecond lasers [J]. *Micromachines*, 2019, 11(1): 20.
- [31] PROKHOROV L G, MITROFANOV V P, KAMAI B, *et al.* Measurement of mechanical losses in the carbon nanotube black coating of silicon wafers[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37 (1): 015004.
- [32] BALL P. None more black[J]. *Nature Materials*, 2016, 15: 500.
- [33] DURY M R, THEOCHAROUS T, HARRISON N, *et al.* Common black coatings-reflectance and ageing characteristics in the 0.32-14.3 μm wavelength range [J]. *Optics Communications*, 2007, 270(2): 262-272.
- [34] LIANG Q, DENG D H, XIAO Z W, *et al.* A novel slide-like cotton-based evaporator with gradient evaporation strategy for seawater resource acquirement [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147222.
- [35] FAN P X, BAI B F, ZHONG M L, *et al.* General strategy toward dual-scale-controlled metallic micro-nano hybrid structures with ultralow reflectance [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(7): 7401-7408.
- [36] XIONG Q Y, LI Y, LI Q Y, *et al.* Multiscale structure coordinated poly (ether ether ketone)-based black absorber with wide-angle high absorption properties[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(17): 2300416.
- [37] JIN J F, LV L, YAN L, *et al.* Robust ultrablack

- film deposited on large-curvature magnesium alloy by atomic layer deposition[J]. *Journal of Vacuum Science Technology A: Vacuum Surfaces and Films*, 2024, 42(3): 032403.
- [38] DONG X X, CHEN L S. Ultrabroadband plasmonic absorber based on biomimetic compound eye structures[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 2794201.
- [39] SHEN C, LI H Y, SUN S, *et al.* Design and optical performance investigation of all-sprayable ultra-black coating[J]. *Nano Research*, 2023, 16(12): 12901-12909.
- [40] KIANI F, STERL F, TSOULOS T V, *et al.* Ultra-broadband and omnidirectional perfect absorber based on copper nanowire/carbon nanotube hierarchical structure[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(2): 366-374.
- [41] YUNG C S, TOMLIN N A, HEUERMAN K, *et al.* Plasma modification of vertically aligned carbon nanotubes: Superhydrophobic surfaces with ultra-low reflectance [J]. *Carbon*, 2018, 127: 195-201.
- [42] LI X, LI M, LIU H J. Effective strategy to achieve a metal surface with ultralow reflectivity by femtosecond laser fabrication [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 051401.
- [43] 乔健, 吴振铎, 彭信翰, 等. Micro-LED 芯片激光去除机理及工艺参数优化[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(9): 1360-1370.
- QIAO J, WU ZH D, PENG X H, *et al.* Mechanism for laser-induced damage bad chip of Micro-LED and optimization of processing parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1360-1370. (in Chinese)
- [44] 陈绒, 陈钊杰, 谢晋. 微孔气流加压对 ITO 玻璃激光刻蚀平面度的影响[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(13): 1564-1571.
- CHEN R, CHEN ZH J, XIE J. Influence of micropore airflow pressurization on flatness of laser etched ITO glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(13): 1564-1571. (in Chinese)

作者简介:



吴家政(1998—),男,河南新乡人,硕士研究生,2020年于天津大学获得学士学位,主要从事激光加工微纳结构方面的研究。E-mail: wujiazheng21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



李 炜(1989—),男,陕西西安人,博士,研究员,博士生导师,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2016年于范德堡大学获得博士学位,主要从事热光子学、纳米光子学、光与物质相互作用及其在下一代信息和能源技术中的应用等方面的研究。E-mail: weilil@ciomp.ac.cn