

引用格式: LI Yanli, JIA Xin, CAO Kaiqiang, et al. Highly Efficient Fabrication of Superhydrophilic Structures on Silicon Surface by the Interference of Two Femtosecond Laser Beams[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650111

李艳丽, 贾鑫, 曹凯强, 等. 飞秒激光双光束干涉高效率地制备硅表面超亲水结构[J]. 光子学报, 2021, 50(6):0650111

# 飞秒激光双光束干涉高效率地制备硅表面超亲水结构

李艳丽<sup>1</sup>, 贾鑫<sup>2</sup>, 曹凯强<sup>1</sup>, 张枫茁<sup>1</sup>, 陈龙<sup>1</sup>, 贾天卿<sup>1</sup>

(1 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241)

(2 上海电机学院 文理学院, 上海 201306)

**摘要:** 利用飞秒激光双光束干涉技术, 结合柱透镜线扫描技术, 在 30 s 内制备了面积为 10 mm×10 mm 的微米-纳米复合结构, 极大地提升了激光加工效率。飞秒激光刻蚀后的硅表面包含双光束干涉引起的长周期微米结构, 以及飞秒激光诱导的纳米周期结构。微米-纳米复合结构极大地提升了表面粗糙度, 在毛细效应的作用下, 硅在空气中显示出超亲水性, 接触角从 40° 降为 0°。测量烧蚀前后硅表面的 X 射线光电子能谱, 发现激光加工后硅表面的 Si-OH 和 H<sub>2</sub>O 分子的含量分别增加 22.3% 和 13.6%, 这进一步增强了硅表面的亲水性。随着激光照射功率的增加以及扫描速度的下降, 硅表面接触角逐步下降。本文研究为高效制备大面积超亲水结构提供了新方法, 在热传导、生物芯片等领域具有潜在的应用价值。

**关键词:** 飞秒激光; 双光束干涉; 硅; 微米-纳米复合结构; 超亲水

中图分类号: TN244;

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215006.0650111

## Highly Efficient Fabrication of Superhydrophilic Structures on Silicon Surface by the Interference of Two Femtosecond Laser Beams

LI Yanli<sup>1</sup>, JIA Xin<sup>2</sup>, CAO Kaiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Fengzhuo<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>, JIA Tianqing<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

(2 School of Arts and Sciences, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Hybrid micro/nanostructures with an area of 10 mm×10 mm are fabricated in 30 s by using the two-beam interference of femtosecond laser combined with the cylindrical lens line scanning technique, which greatly improved the laser processing efficiency. The silicon surface structures contain long-periodic microstructures determined by two-beam interference and the periodic nanostructures induced by femtosecond laser. The hybrid micro/nanostructures greatly improve the surface roughness. Under the effect of capillarity, the ablated silicon surface shows superhydrophilicity in air, and the contact angle drops from 40° to 0°. The X-ray photoelectron spectra of the silicon surface shows that the content of Si-OH and H<sub>2</sub>O molecules increases by 22.3% and 13.6%, respectively, which further improves the hydrophilicity of silicon surface. With the increase of laser fluence and the decrease of scanning speed, the contact angle of the ablated silicon surface decreases gradually. This provides a new method for the efficient fabrication of

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 12074123, 11804227, 91950112), 上海市科学技术委员会(No. 19ZR1414500), 强场激光物理国家重点实验室开放基金(中国科学院上海光学精密机械研究所)

**第一作者:** 李艳丽(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为飞秒激光微纳加工。Email: 51180920018@stu.ecnu.edu.cn

**导师(通讯作者):** 贾鑫(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为飞秒激光与微纳结构相互作用。Email: jiaxin@sdju.edu.cn

贾天卿(1969—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为飞秒激光与微纳结构相互作用。Email: tqjia@phy.ecnu.edu.cn

**收稿日期:** 2021-03-19; **录用日期:** 2021-04-25

<http://www.photon.ac.cn>

large-area superhydrophilic structures, and has potential applications in the fields of heat conduction, biochip, etc.

**Key words:** Femtosecond laser; Two-beam interference; Silicon; Hybrid micro/nanostructures; Superhydrophilicity

**OCIS Codes:** 140.7090; 140.3390; 220.4241; 310.3840

## 0 引言

由于飞秒激光具有超短脉冲、超高能量且热扩散效应低等特征,能够在固体材料中进行快速、精确的纳米加工而被广泛应用。飞秒激光照射半导体和电介质表面能够诱导长周期结构,周期略小于激光波长,且取决于脉冲能量、激光波长、激光偏振方向等条件<sup>[1-3]</sup>。一般来说,线偏振光诱导纳米条纹结构,条纹方向垂直于激光的偏振方向,圆偏振光诱导纳米颗粒结构<sup>[4]</sup>。这在材料加工、表面改性等方面都具有潜在的应用,例如光栅制备<sup>[5-6]</sup>、结构色<sup>[7]</sup>、表面吸收增强<sup>[8-9]</sup>等。

表面润湿性是固体表面的一个重要特征,采用液体接触角<sup>[10]</sup>来定义。根据杨氏方程  $\cos\theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lv}$ ,其中 $\theta$ 为接触角 $\gamma_{sv}$ , $\gamma_{sl}$ , $\gamma_{lv}$ 和分别是固/气界面,固/液界面和液/气界面的表面张力。一般来说,水滴在固体表面的接触角大于 $90^\circ$ 时,称为疏水表面;小于 $90^\circ$ 时,称为亲水表面。在自然界中,荷叶<sup>[11]</sup>、水稻<sup>[12]</sup>等植物叶片表现出超疏水特性(接触角大于 $150^\circ$ )。另一种极端润湿状态是超亲水(接触角小于 $10^\circ$ ,水可以迅速扩散并完全湿润表面形成一层水膜),与超疏水研究相比,超亲水研究相对较少。超亲水表面有很多应用,如油水分离<sup>[13-14]</sup>、热传递<sup>[15-16]</sup>、生物分子固定<sup>[17-18]</sup>以及减阻<sup>[19]</sup>等方面。

由于在微电子领域的应用以及独特的光电特性,晶体硅的加工及改性得到广泛的关注。飞秒激光加工具有灵活性、加工结构多样性等优点,成为硅功能材料、表面改性的有效手段之一。WU C等利用飞秒激光照射硅表面,制备了具有微米锥阵列的“黑硅”,在 $250\sim 2\,500\text{ nm}$ 的波段范围内吸收率增强至 $90\%$ <sup>[20]</sup>,已广泛应用在太阳能电池、光电探测器等领域。通过调节飞秒激光的能流密度、照射脉冲数、偏振方向等参数,能够在硅表面制备周期大于波长的凹槽结构、周期与波长相近的长周期条纹结构<sup>[21-22]</sup>。当飞秒激光能流密度小于硅的烧蚀阈值时,利用多脉冲照射液体中的硅表面,可以诱导周期远小于波长的短周期纳米条纹结构<sup>[23]</sup>。这些微米-纳米结构能够有效地改善硅表面性质,在气体探测<sup>[24]</sup>、光栅制备<sup>[5]</sup>、表面摩擦性能改善<sup>[25]</sup>等方面具有潜在的应用价值。目前,由于芯片加工精度的提高以及微电子产品的小型化,硅表面微小区域内散热成为研究热点。通过改变硅表面润湿性增强热传导系数成为解决问题的方法之一<sup>[26]</sup>。近年来,飞秒激光由于其高效灵活的特点被用于表面科学领域来调控材料的表面浸润性。VOROBYEV A Y等<sup>[27]</sup>利用高强度的飞秒激光脉冲,通过透镜会聚制备了超细的毛细结构,将普通硅转变为超亲水硅。PAN Huaihai等<sup>[28]</sup>通过物镜会聚 $800\text{ nm}$ 飞秒激光,在硅表面制备了 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的超亲水结构,并用化学刻蚀的方法在硅表面实现了超疏水。

利用普通透镜或者物镜会聚,光斑面积较小,加工效率较低,难以在材料表面实现大面积亲水结构制备。为了进一步解决传统物镜和透镜加工效率低的问题,本文采用双光束柱透镜汇聚的方法,汇聚后光斑尺寸为 $50\text{ }\mu\text{m}\times 5\text{ mm}$ ,结合线扫描技术在 $30\text{ s}$ 内制备出 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的硅表面微米-纳米复合结构,加工效率大大提高。通过测量接触角发现,空气中水滴在硅表面的接触角可以降为 $0^\circ$ 。通过改变扫描速度和激光功率可以调控接触角的大小,为高效制备大面积超亲水结构提供了新思路。

## 1 实验方法

### 1.1 实验样品

实验选取商用无掺杂单面抛光硅晶圆(100),厚度为 $0.5\text{ mm}$ ,表面粗糙度小于 $1\text{ nm}$ 。样品放置于计算机控制的三维精密平移台上。

### 1.2 实验装置

如图1所示,激光系统采用二极管泵浦飞秒激光器(PHAROS Harmonics Module 2H-3H,立陶宛),产生中心波长 $\lambda=515\text{ nm}$ 、脉宽 $\tau=169\text{ fs}$ ,单脉冲能量为 $1\text{ mJ}$ 的激光脉冲,重复频率为 $1\text{ kHz}$ 。通过机械快门(Shutter)控制激光照射的脉冲数,利用功率衰减计(Power attenuator)改变激光的功率。激光束通过1:1分

束晶体分成能量与偏振方向相同的两束激光,利用两个焦距400 mm的圆柱透镜共点聚焦在样品表面相同位置。调节延迟线(Delay line)使双光束脉冲同时到达样品表面,同时信号通过物镜和CCD进行监测。两光束间夹角 $2\theta$ 为 $4.8^\circ$ ,图1右下角为理论模拟双光束干涉的光场分布,由公式 $\Lambda=\lambda/2\sin\theta$ 可得干涉光栅周期 $\Lambda$ 为 $6.15\ \mu\text{m}$ 。两束光在空气中聚焦后激光光斑长5 mm,宽 $50\ \mu\text{m}$ 。

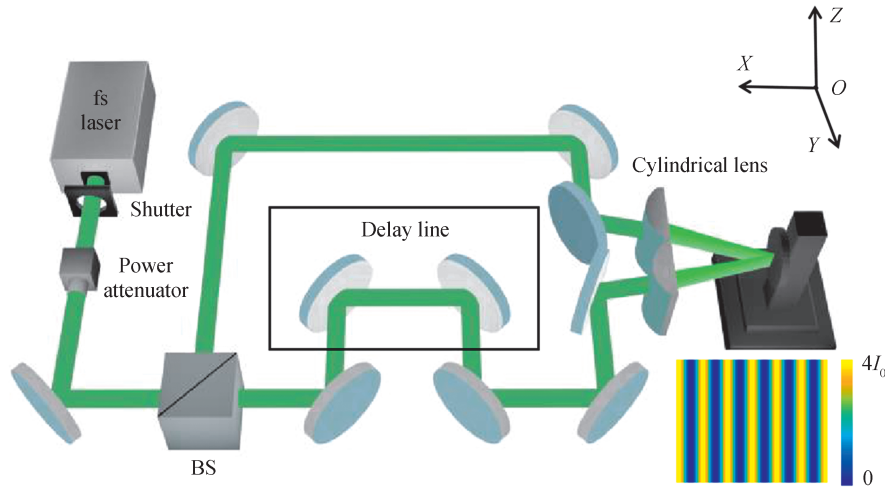


图1 飞秒激光双光束干涉装置图

Fig.1 Experimental setup for the two-beam interference of femtosecond laser

采用逐行扫描的方式,激光照射时样品沿 $y$ 轴方向移动,相邻两行间扫线间隔为 $1.5\ \text{mm}$ 。实验完成后利用扫描电子显微镜(S-4800,日立)和共聚焦显微镜(Smartproof 5,蔡司)对样品表面形貌和粗糙度进行表征。利用接触角测量仪(JC2000D1,上海中晨)测量空气中的 $1\ \mu\text{L}$ 水滴在样品表面的接触角。利用X射线光电子能谱仪(Axis Ultra DLD,日本Kratos)对样品表面的化学成分进行分析。

## 2 实验结果讨论

空气中水在光滑硅表面的接触角为 $42^\circ\pm 2^\circ$ ,如图2(a)所示。利用飞秒激光双光束干涉,单脉冲能流密度为 $0.14\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,扫描速度为 $2\ \text{mm}/\text{s}$ (照射脉冲数为25个)时,在硅表面制备了微米-纳米复合结构,如图2(c)所示,空气中水滴的接触角降为 $0^\circ$ ,呈现超亲水性。YONG Jiale等利用物镜会聚 $800\ \text{nm}$ 飞秒激光照射硅表面制备了周期性的微米山形阵列,使水滴接触角从光滑表面的 $60^\circ$ 降至约 $5^\circ$ <sup>[29]</sup>;其后用平凸透镜会聚飞秒激光,在硅上制备出了接触角为 $0^\circ$ 的超亲水微米-纳米结构<sup>[30]</sup>。VERMA N等用平凸透镜会聚纳秒激光加工硅表面,逐点扫描制备微米-纳米超亲水结构,接触角由 $80.9^\circ$ 降至约 $4.9^\circ$ <sup>[26]</sup>。

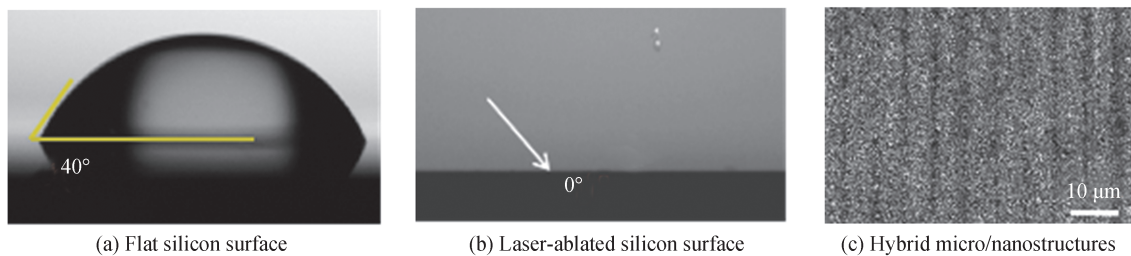


图2 空气中 $1\ \mu\text{L}$ 水滴在硅表面的显微照片

Fig.2 Micrographs of water droplet ( $1\ \mu\text{L}$ ) on a silicon surface in air

对于粗糙材料表面,要同时考虑材料表面自由能和材料表面微观形貌(粗糙度)对其表面润湿性能的影响。根据Wenzel模型<sup>[31]</sup>,



$$\cos\theta^* = \frac{r(\tau_{sv} - \tau_{sl})}{\tau_{lv}} = r\cos\theta \quad (1)$$

式中,  $\theta^*$  和  $\theta$  分别是液滴在粗糙表面和相对光滑表面上的接触角,  $r$  是粗糙因子, 粗糙的表面结构可以放大材料表面的浸润特性, 使亲水材料更亲水, 使疏水材料更疏水<sup>[32]</sup>。对于多孔结构, 液体将会通过毛细管作用自发侵入多孔材料的纹理内部, 液体在多孔材料上的表观接触角表示为

$$\cos\theta_0 = f_s(\cos\theta - 1) + 1 \quad (2)$$

式中,  $f_s$  是未有液体浸入的结构所占比例,  $1 - f_s$  是充满液体的结构所占的比例<sup>[33]</sup>。根据式(1)和(2)可知, 提高材料表面的粗糙度以及孔隙率, 可以使表面达到超亲水效果。

### 2.1 表面结构和粗糙度

调节激光扫描速度, 研究超亲水表面微米-纳米复合结构的形成。图3为飞秒激光双光束干涉加工硅表面的扫描电子显微镜照片, 单脉冲能流密度为  $0.14 \text{ J/cm}^2$ 。表1列出了不同激光扫描速度下, 利用共聚焦显微镜测量硅表面的平均粗糙度。调节激光扫描速度为  $5 \text{ mm/s}$  (经10个飞秒脉冲照射), 图3(a)是硅表面出现周期约为  $6.2 \mu\text{m}$  的光栅结构, 这是由双光束干涉光场的强度分布引起。同时, 在干涉强区出现规则的纳米条纹, 条纹方向垂直于激光的偏振方向, 条纹周期约为  $500 \text{ nm}$ , 略小于激光波长, 这是由飞秒激光诱导形成的长周期条纹结构, 并且由于干涉光场对光强的限制而造成表面等离子激元(SPP)的共振干涉增强<sup>[5]</sup>, 条纹结构更加规则。干涉弱区未烧蚀, 仅残留少量烧蚀产生的碎屑, 表面粗糙度约为  $23 \text{ nm}$ 。降低扫描速度至  $4 \text{ mm/s}$  (照射脉冲数增加至12个), 规则的纳米条纹加深并出现了断裂, 在干涉光场弱区出现了表面团簇结构, 如图3(b), 表面粗糙度增加至  $62 \text{ nm}$ 。当调节扫描速度为  $3 \text{ mm/s}$  (经17个飞秒脉冲照射), 照射脉冲数的增加破坏了SPP共振干涉增强, 纳米条纹变得不规则, 出现孔隙结构。干涉弱区的表面团簇结构增多, 如图3(c), 表面粗糙度继续增加至  $101 \text{ nm}$ 。当扫描速度为  $2 \text{ mm/s}$  时, 激光烧蚀比较严重, 硅表面覆盖着大量的团簇结构, 如图3(d), 团簇中充满了孔隙。在干涉弱区有周期性纳米条纹, 纳米条纹并不连续, 为小块状结构, 表面粗糙度为  $148 \text{ nm}$ 。

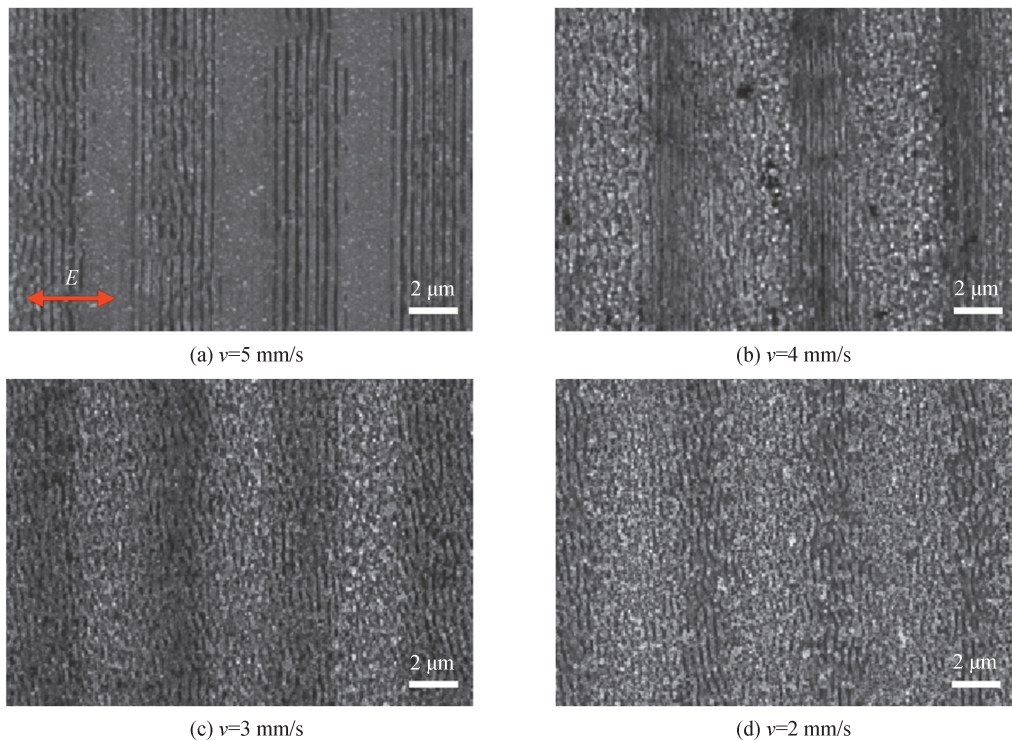


图3 硅表面微米-纳米复合结构的扫描电镜照片

Fig.3 Scanning electric microscope images of hybrid micro-nanostructures on silicon surface



表1 不同扫描速度下,硅的表面粗糙度  
Table 1 Surface roughness of silicon ablated at different scanning speeds

Scanning speed	5 mm/s	4 mm/s	3 mm/s	2 mm/s
Surface roughness	23 nm	62 nm	101 nm	148 nm

## 2.2 硅表面接触角

图4是飞秒激光双光束干涉照射后,激光单脉冲能流密度是 $0.14 \text{ J/cm}^2$ ,空气中微结构硅表面的 $1 \mu\text{L}$ 水滴的显微照片。由图可见,随着扫描速度的减小,照射脉冲数的增加,接触角由光滑硅表面的 $40^\circ$ 逐渐下降至 $0^\circ$ 。

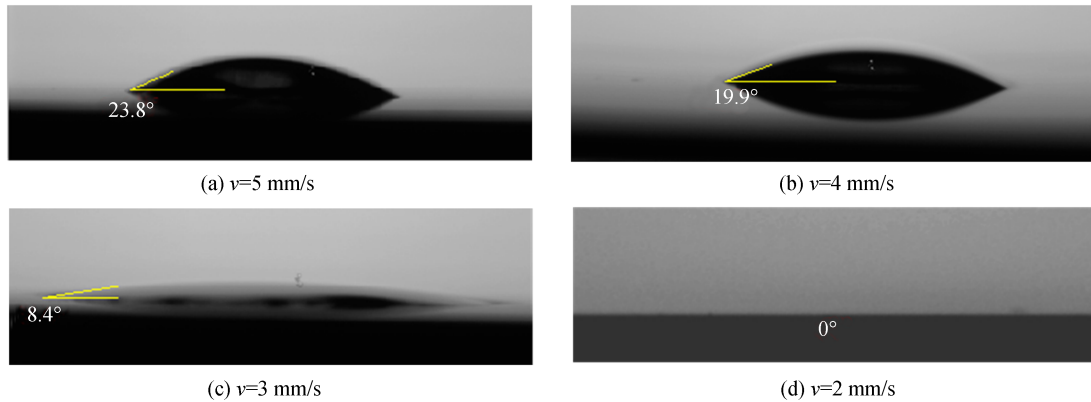


图4 激光烧蚀后硅表面 $1 \mu\text{L}$ 水滴的显微照片

Fig.4 Micrographs of water droplet ( $1 \mu\text{L}$ ) on silicon surface after laser ablation

图5对比了硅表面微米-纳米复合结构的平均表面粗糙度和接触角的关系。随着扫描速度的降低,照射脉冲数逐步增加,硅表面粗糙度增大,纳米条纹深度增加,出现更多纳米团簇和孔隙结构。在微米-纳米结构的毛细效应作用下,液体在多孔隙的硅表面快速扩散,接触角随表面粗糙度的增加而逐渐减小。由此可见,高粗糙度的孔隙结构更有利于表面达到超亲水。

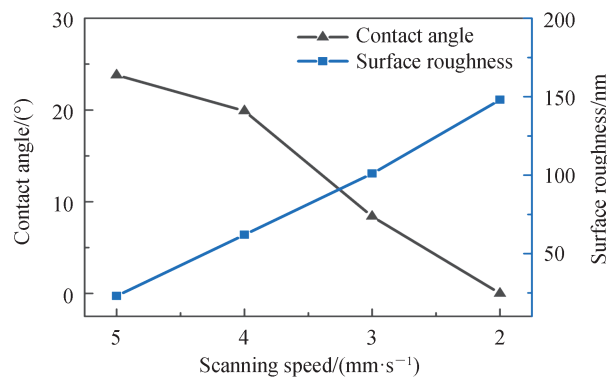


图5 接触角和表面粗糙度随扫描速度的变化关系

Fig.5 The dependences of the contact angle and the surface roughness on the scanning speed

为了研究影响接触角的因素,调节单脉冲能流密度及扫描速度,制备硅表面大面积微米-纳米复合结构。图6是空气中水的接触角随能流密度的变化关系。在相同的扫描速度下,水在硅表面的接触角随激光能流密度的增加而减小。通过改变激光能量和扫描速度可以调控硅表面的亲水性,体现出了加工方法的灵活性。

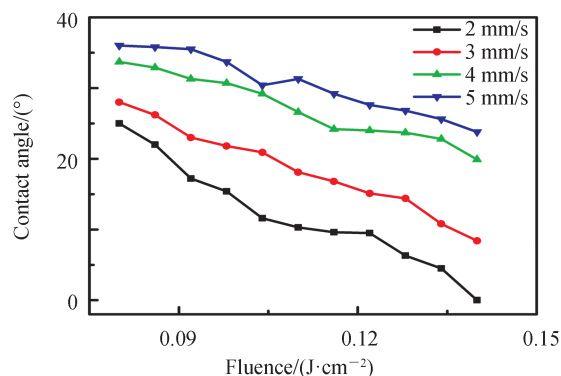


图6 接触角随激光能流密度的依赖关系  
Fig.6 The dependence of the contact angle on the laser fluence

### 2.3 表面成分分析

材料表面润湿性与材料的元素构成密切相关,图7是飞秒激光烧蚀前后硅表面的O1s高分辨X射线光电子能谱图,分析硅表面的化学成分的变化。空气中激光的剧烈烧蚀使硅被氧化。用CasaXPS软件对测量的数据进行处理,相对于无激光烧蚀的单晶硅表面(见图7(a)),激光烧蚀(单脉冲能流密度为 $0.14 J/cm^2$ ,扫描速度为 $2 mm/s$ )硅表面的Si-O( $531.7 eV$ ),硅羟基Si-OH( $533.5 eV$ )以及 $H_2O$ 分子( $535.1 eV$ )的含量明显增加,如图7(b)所示。根据相对峰面积计算得到激光加工后硅表面的Si-OH和 $H_2O$ 分子的含量分别增加22.3%和13.6%。硅羟基是亲水的<sup>[34]</sup>,会使表面表现出亲水性,激光照射后硅表面形成的Si-OH对超亲水性起着重要的作用。 $H_2O$ 分子含量的增加也说明硅表面对水分子的吸附能力增强。

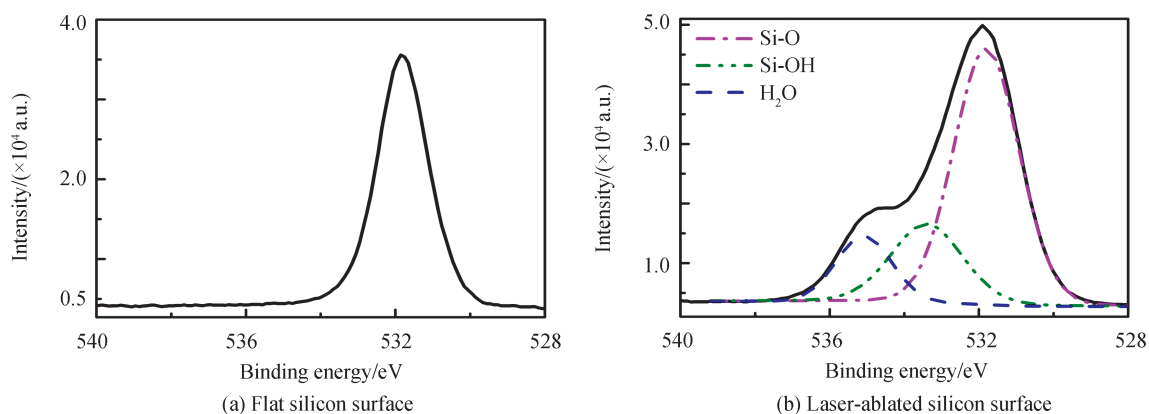


图7 硅表面的O1s高分辨X射线光电子能谱图  
Fig.7 High resolution X-ray photoelectron spectroscopy of O1s on a silicon surface

有研究表明,随着时间的推移,超亲水表面结构将逐步失去超亲水性<sup>[35]</sup>,这可能由于表面结构对空气中有机污染物的吸附而引起的。在飞秒激光烧蚀硅三个月后重复测量硅表面结构的润湿性,接触角由 $0^\circ$ 小幅增加至 $9.1^\circ$ ,这源于放置于空气中表面C-O键的污染。图8是硅表面的C1s高分辨X射线光电子能谱图,刚经过激光加工的硅表面无有机污染物,如图8(a)所示。在空气中放置3个月后,硅表面出现了少量含C-O键( $287.7 eV$ )的有机污染物,见图8(b)。

有机污染物在硅表面的吸附改变了样品表面的亲水效果,但仍保持超亲水性。这一长效亲水性是基于长周期微米结构、团簇、纳米孔隙的杂化,使水更容易渗透至结构内部。同时,烧蚀产生的二氧化硅颗粒附着于结构表面,其强烈的水吸附作用使表面形成水性阻挡层,阻碍空气中的灰尘、污染物(例如:油)在硅表面的附着。这在热交换器、生物传感器、细胞粘合剂和自洁太阳能电池具有潜在的应用价值。

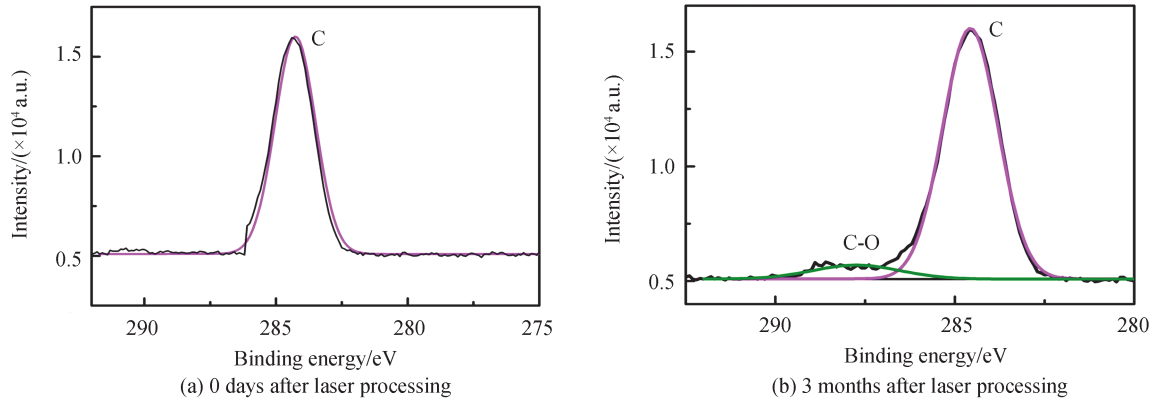


图8 硅表面的C1s高分辨X射线光电子能谱图

Fig.8 High resolution X-ray photoelectron spectroscopy of C1s on a silicon surface

### 3 结论

利用飞秒激光双光束干涉技术,使用柱透镜会聚光束并进行扫描烧蚀,在30 s内制备了面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的微米-纳米复合结构,极大地提升了激光加工效率。飞秒激光烧蚀后的硅表面包含激光干涉引起的长周期微米结构,以及飞秒激光诱导的纳米周期结构。微米-纳米复合结构极大地提升了表面粗糙度,在微结构的毛细效应作用下,硅在空气中显示出超亲水性。通过测量烧蚀前后硅表面的X射线光电子能谱,发现激光加工后硅表面的Si-OH和 $\text{H}_2\text{O}$ 分子的含量分别增加22.3%和13.6%,这进一步增强了硅表面的亲水性。水在硅表面接触角随着单脉冲能流密度的增加而逐步下降。这为高效制备大面积超亲水结构提供了新方法。

#### 参考文献

- [1] CHEN Long, CAO Kaiqiang, LIU Jukun, et al. Surface birefringence of regular periodic surface structures produced on glass coated with an indium tin oxide film using a low-fluence femtosecond laser through a cylindrical lens [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30094-30106.
- [2] GNILITSKYI I, DERRIEN T J Y, LEVY Y, et al. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: physical origin of regularity[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-11.
- [3] VARLAMOVA O, REIF J, VARLAMOV S, et al. The laser polarization as control parameter in the formation of laser-induced periodic surface structures: Comparison of numerical and experimental results[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(12): 5465-5469.
- [4] JIA Xin, JIA Tianqing, DING Liangen, et al. Complex periodic micro/nanostructures on 6H-SiC crystal induced by the interference of three femtosecond laser beams[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(6): 788-79.
- [5] CAO Kaiqiang, CHEN Long, WU Haochen, et al. Large-area commercial-grating-quality subwavelength periodic ripples on silicon efficiently fabricated by gentle ablation with femtosecond laser interference via two cylindrical lenses[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106441.
- [6] ZHANG Yani, XI Yaru, JIANG Peng, et al. Fabrication of long period fibre gratings by femtosecond laser writing directly and its spectral characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 1106001.  
张亚妮, 郗亚茹, 江鹏, 等. 飞秒激光直写长周期光纤光栅及其光谱特性[J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 1106001.
- [7] MARAGKAKI S, SKARADZINSKI C A, NETT R, et al. Influence of defects on structural colours generated by laser-induced ripples[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-9.
- [8] YANG Yang, LI Chao, ZHAO Jihong. Research on fabrication and optoelectronic properties of surface modified silicon by ultrafast laser pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 1014002.  
杨洋, 李超, 赵纪红. 表面改性硅的超快激光脉冲制备及光电特性研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(10): 1014002.
- [9] JIA Xin, JIA Tianqing, ZHANG Yi, et al. Optical absorption of two dimensional periodic microstructures on ZnO crystal fabricated by the interference of two femtosecond laser beams[J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14401-14408.
- [10] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95: 65-87.
- [11] LIN Feng, LI Shuhong, LI Yingshun, et al. Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [12] WU Dong, WANG Jiannan, WU Sizhu, et al. Three-level biomimetic rice-leaf surfaces with controllable anisotropic



- sliding[J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(15): 2927–2932.
- [13] CHEN Feng, ZHANG Dongshi, YANG Qing, et al. Bioinspired wetting surface via laser microfabrication[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(15): 6777–6792.
- [14] LIU Kesong, YAO Xi, JIANG Lei. Recent developments in bio-inspired special wettability [J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(8): 3240–3255.
- [15] TAKATA Y, HIDAKA S, MASUDA M, et al. Pool boiling on a superhydrophilic surface[J]. *International Journal of Energy Research*, 2003, 27(2): 111–119.
- [16] LIAO Liang, BAO Ran, LIU Zhenhua. Compositive effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 44(12): 1447–1453.
- [17] PIRET G, COFFINIER Y, ROUX C, et al. Biomolecule and nanoparticle transfer on patterned and heterogeneously wetted superhydrophobic silicon nanowire surfaces[J]. *Langmuir*, 2008, 24(5): 1670–1672.
- [18] GALOPIN E, PIRET G, SZUNERITS S, et al. Selective adhesion of bacillus cereus spores on heterogeneously wetted silicon nanowires[J]. *Langmuir*, 2010, 26(5): 3479–3484.
- [19] BYON C, NAM Y, KIM S J, et al. Drag reduction in Stokes flows over spheres with nanostructured superhydrophilic surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(6): 066102.
- [20] WU C, CROUCH C H, ZHAO L, et al. Near-unity below-band-gap absorption by microstructured silicon[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(13): 1850–1852.
- [21] NIVAS J J J, AMORUSO S. Generation of supra-wavelength grooves in femtosecond laser surface structuring of silicon [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(1): 174.
- [22] NIVAS J J J, ANOOP K K, BRUZZESE R, et al. Direct femtosecond laser surface structuring of crystalline silicon at 400nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(12): 121601.
- [23] ZHANG Dongshi, SUGIOKA K. Hierarchical microstructures with high spatial frequency laser induced periodic surface structures possessing different orientations created by femtosecond laser ablation of silicon in liquids [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, 2(3): 190002.
- [24] LIU Xiaolong, ZHAO Yang, ZHAO Li, et al. Light-enhanced room-temperature gas sensing performance of femtosecond-laser structured silicon after natural aging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7237–7244.
- [25] ALVES-LOPES I, ALMEIDA A, OLIVEIRA V, et al. Influence of femtosecond laser surface nanotexturing on the friction behavior of silicon sliding against PTFE[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(9): 1237.
- [26] VERMA N, ANOOP K K, DOMINIC P, et al. Fabrication of durable superhydrophilic silicon surfaces using nanosecond laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(13): 135304.
- [27] VOROBYEV A Y, GUO Chunlei. Laser turns silicon superwicking[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6455–6460.
- [28] PAN Huaihai, LUO Fangfang, LIN Geng, et al. Quasi-superhydrophobic porous silicon surface fabricated by ultrashort pulsed-laser ablation and chemical etching[J]. *Chemical Physics Letters*, 2015, 637: 159–163.
- [29] YONG Jiale, CHEN Feng, FANG Yao, et al. Bioinspired design of underwater superaerophobic and superaerophilic surfaces by femtosecond laser ablation for anti-or capturing bubbles[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(45): 39863–39871.
- [30] YONG Jiale, ZHAN Zhibing, SINGH S C, et al. Femtosecond laser-structured underwater “Superpolymphobic” surfaces [J]. *Langmuir*, 2019, 35(28): 9318–9322.
- [31] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988–994.
- [32] YONG Jiale, CHEN Feng, YANG Qing, et al. Superoleophobic surfaces[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(14): 4168–4217.
- [33] DRELICH J, CHIBOWSKI E. Superhydrophilic and superwetting surfaces: definition and mechanisms of control [J]. *Langmuir*, 2010, 26(24): 18621–18623.
- [34] BLAKE T D, CLARKE A, DE C J, et al. Contact angle relaxation during droplet spreading: comparison between molecular kinetic theory and molecular dynamics[J]. *Langmuir*, 1997, 13(7): 2164–2166.
- [35] LONG Jiangyou, ZHONG Minlin, ZHANG Hongjun, et al. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 441: 1–9.

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 12074123, 11804227, 91950112), the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (No. 19ZR1414500), the Open Fund of the State Key Laboratory of High Field Laser Physics (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics)