

文章编号 1004-924X(2017)12-3063-07

飞秒激光正交线扫描诱导表面微纳结构

张成云^{1*}, 刘海英², 满文庆¹, 刘佐濂¹

(1. 广州大学 物理与电子工程学院, 广东 广州 510006;

2. 华南师范大学 信息与光电子科技学院, 广东 广州 510006)

摘要:通过控制激光偏振与扫描方向,利用飞秒脉冲激光正交线扫描的微加工方式,在硅和不锈钢表面诱导出了规则分布的复合表面微纳结构并分析了激光能量密度对微纳表面结构形成的影响。实验显示:当激光的能量密度接近材料烧蚀阈值时,在硅表面诱导出了周期条纹嵌套纳米孔的双层复合二维结构,在不锈钢表面则诱导出了依赖于激光偏振方向的纳米点阵列分布,分析认为纳米点阵列是由周期条纹结构边缘发生断裂而生成的。另外,当激光的能量密度大于材料烧蚀阈值时,在硅和不锈钢表面会烧蚀出规则分布的微米级孔洞结构。实验结果表明:第一次扫描诱导出的表面微纳结构增加了对入射激光的吸收,促进入射激光与表面等离子体波的耦合,加强了后扫描的烧蚀效果,使得后扫描诱导出的微纳结构占主导。文中提出的正交线扫描的加工方式为微纳表面结构的制备提供了新的思路。

关键词:飞秒脉冲激光;激光烧蚀;纳米结构材料;微加工

中图分类号:TP249;TB333 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3063

Femtosecond laser induced surface micro- and nano- structures by orthogonal scanning processing

ZHANG Cheng-yun^{1*}, LIU Hai-ying², MAN Wen-qing¹, LIU Zuo-lian¹

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Information and Optoelectronic Science and Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: zarwu@qq.com

Abstract: With controlling the femtosecond (fs) laser polarization and scanning direction, the regular distribution of composite micro/nano structures was induced on the surfaces of silicon and stainless steel by Orthogonal Line Scanning Processing (OLSP). The influence of laser fluence on the micro/nano structures was studied. The experimental results show that two-dimensional (2D) composite structures nested with periodic ripples and nanoholes are induced on the silicon wafer surface, however, nanorod arrays at the edge of scanning area are induced on the stainless steel surface when the laser fluence is close to the material ablation threshold. The analysis indicates that the nanorod arrays are formed by the fracture of periodic ripples. Moreover, when laser fluence is higher than the ablation threshold, the regular distribution of micro hole structures is induced both on the surfaces of sili-

收稿日期:2017-04-28;修订日期:2017-06-22.

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(No. 2015A030310382);广州市属高校科技计划项目(No. 1201420896);广州市科技计划项目(No. 201607010261)

con and stainless steel. The experimental results demonstrate that the micro/nano structures induced by the first line scanning enhances its laser absorption and promotes the coupling between the incident fs laser and the surface plasma wave, so that the ablation of the second scanning is enhanced and the later structures induced by the second scanning becomes a dominating. In conclusion, the OLSP provides a new approach for fabrication of surface micro/nano structures.

Key words: femtosecond pulsed laser; laser ablation; nanostructured materials; micromachining

1 引言

飞秒脉冲激光可以在金属^[1-3]、半导体^[4-5]和玻璃^[6]等材料表面或内部诱导出形貌丰富的微纳结构,如亚波长和深亚波长的表面周期结构、尖锥状凸起、线扫描周期结构和孔阵列结构等。国内外科研小组分析了激光能量密度、波长、偏振方向、入射角度、脉冲数目和线扫描速度等参数对表面微纳结构形貌的影响。E. Mazur 小组用飞秒激光烧蚀气体和液体中的硅片,得到著名的尖锥状凸起结构^[5,7]。A. Y. Vorobyev 等人利用大周期的线扫描方式加工钛箔,发现在太赫兹波段的吸收率高达 51%,利用同样的方法将原本湿润性较差的铂和硅变成湿润性良好的材料^[8],实现了材料的表面改性。在飞秒激光诱导偏振依赖的亚波长表面周期结构基础上^[1,9],深亚波长的表面周期结构诱导的实验现象也相继被报道^[9-13],很多小组基于入射光和表面等离子体波之间的干涉模型提出了可能的理论机制^[4,14],如二次谐波的产生^[14-16],三次谐波的产生^[3],熔融金属液面张力引发的毛细现象等^[1]。

常用的飞秒激光微加工方式有单点烧蚀、线扫描、多光束干涉、激光诱导前后向转移^[17-18]和正交扫描的微加工方式^[19]。无论使用哪种加工方式,在分析表面微纳结构形成机理时,材料表面的原始缺陷或者脉冲烧蚀前期形成的结构对烧蚀后期形成的结构都是存在影响的。实验表明,金属表面诱导出的条纹结构周期与表面粗糙度和激光能量密度有关^[19],因此有必要研究已覆盖有微纳结构表面区域的再次烧蚀。为此,采用正交扫描的微加工方式,即先沿水平方向扫描加工一次,再沿垂直方向加工,先后在同一区域线扫描加工两次,正交扫描的激光偏振方向与扫描方向一致时,不同能量密度的飞秒激光正交线扫描不锈钢和硅片表面时,在正交区域诱导出了复合微纳表面结构。

有科研小组利用皮秒激光在不同金属表面诱导出不同尺寸的纳米颗粒,形成复合微纳结构表面,纳米颗粒尺寸依赖的等离子共振效应使得不同粒径的纳米颗粒出现不同颜色^[20],覆盖有复合二维结构的材料表面可用于激光防伪和生物传感器件的制备。本文利用飞秒脉冲激光正交线扫描的微加工方式,在硅和不锈钢表面诱导出了规则分布的复合表面微纳结构。

2 实验装置和方法

实验使用的飞秒激光微加工平台如图 1 所示。飞秒激光放大级(Legend, Coherent)输出波长为 800 nm,脉冲宽度为 90 fs,重复频率为 1 kHz 的飞秒脉冲激光,经过焦距为 15 cm 的透镜聚焦后照射在不锈钢和硅片样品表面,聚焦后的光斑尺寸约为 40 μm 。通过半波片与格兰棱镜组合可以连续调节激光输出的能量,连接电脑的电子闸门精确选取激光脉冲数目。样品放置在三维微位移平台上,电脑控制位移台在 XYZ 三个方向移动,从而实现样品表面的飞秒激光正交扫描加工。实验使用掺 P 的 N 型硅片,直径为 5.08 cm,厚度为 0.5 mm,电阻率小于 0.01 $\Omega \cdot \text{cm}$,晶向 $\langle 100 \rangle$,表面粗糙度小于 0.5 nm。250 μm 厚

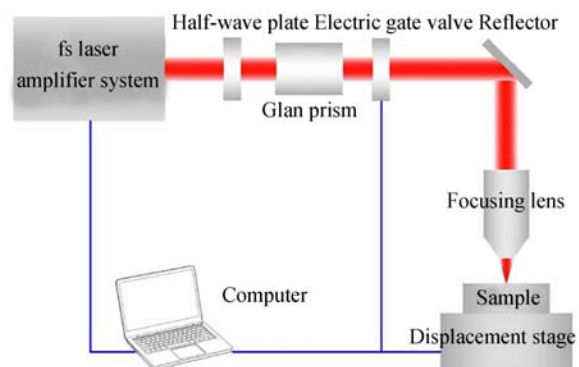


图 1 飞秒激光微加工系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fs laser micro processing system

的工业级 301L 不锈钢抛光后,分别经过丙酮和去离子水超声处理,再用氮气吹干,表面粗糙度小于 15 nm。利用型号为 JSM-7001F 的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)分析表征正交扫描后样品表面的微纳结构形貌。

3 实验结果和分析

3.1 近烧蚀阈值的硅片正交扫描

调节激光能量密度,使得硅片刚开始烧蚀,以此确定正交扫描硅片的激光能量密度 $F=159.2 \text{ mJ/cm}^2$,扫描速度 $v=1 \text{ mm/s}$ 。图 2 为使用近烧蚀阈值的飞秒激光正交扫描硅片诱导出的二维嵌套纳米结构的 SEM 图片。图 2(c)所示为正交扫描加工示意图,图中数字“1”和“2”表示扫描加工的先后顺序。先采用竖直偏振的激光沿竖直方向扫描加工一次,样品固定不动,再采用水平偏振的激光沿水平方向扫描加工一次,在硅片表面同一位置先后烧蚀两次,形成正交扫描加工,激光偏振方向分别与两次扫描方向一致,如图 2(b)中白色箭头所示。图 2(a)为竖直方向单次扫描得到的结果,可以发现沿激光偏振方向出现纳米孔链

结构,单个纳米孔近似为长方形,长约 800 nm,宽为 300 nm,纳米孔的间距约为 720 nm,接近激光的波长,纳米孔链的间距约为 $2 \mu\text{m}$ 。这种二维嵌套的纳米孔链结构与常见的亚波长表面周期结构明显不同,图 2(a)中插图为 $F=148 \text{ mJ/cm}^2$,脉冲数为 5 时,单点烧蚀硅片表面得到的亚波长表面周期结构。对于 1 mm/s 的线扫描速度, 1 kHz 的重复频率,约 $40 \mu\text{m}$ 的光斑尺寸,相当于同一烧蚀区域累积约有 40 个激光脉冲。

线扫描烧蚀初期诱导出了与激光偏振方向垂直的亚波长表面周期结构(条纹结构),且产生了大量光生载流子,会影响硅的复折射率。根据 Drude 模型,此时硅的介电常数为^[21]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_r(\omega) + i\epsilon_i(\omega) = \epsilon_c - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)}, \quad (1)$$

式中: ϵ_c 为无飞秒激光烧蚀时硅的介电常数, Γ 是电子碰撞频率, ω_p 是等离子体频率, ω 为入射激光角频率。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{m_{\text{eff}} \epsilon_0}}, \quad (2)$$

其中: e 为电荷量, N_e 为光生载流子浓度, m_{eff} 为电子有效质量, ϵ_0 为真空介电常数。由式(1)可知

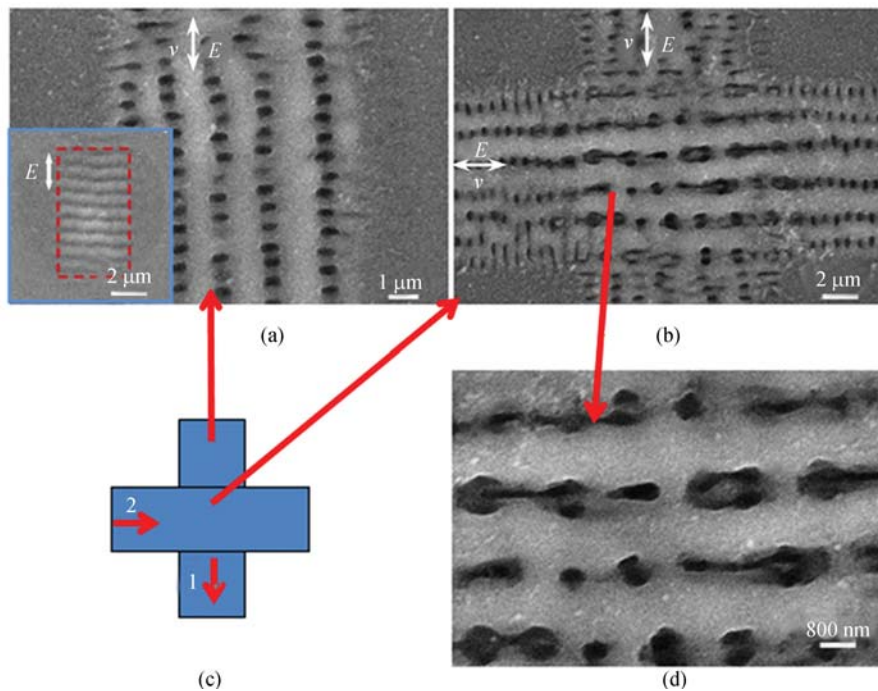


图 2 正交扫描硅片诱导出的纳米孔阵列的 SEM 图片(a,b,d)和正交扫描方式示意图(c)

Fig. 2 SEM images (a, b, d) of nanohole arrays on surface of silicon wafer induced by OLSP and schematic diagram of OLSP (c)

介电常数的实部和虚部分别如下:

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_c - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2}, \quad (3)$$

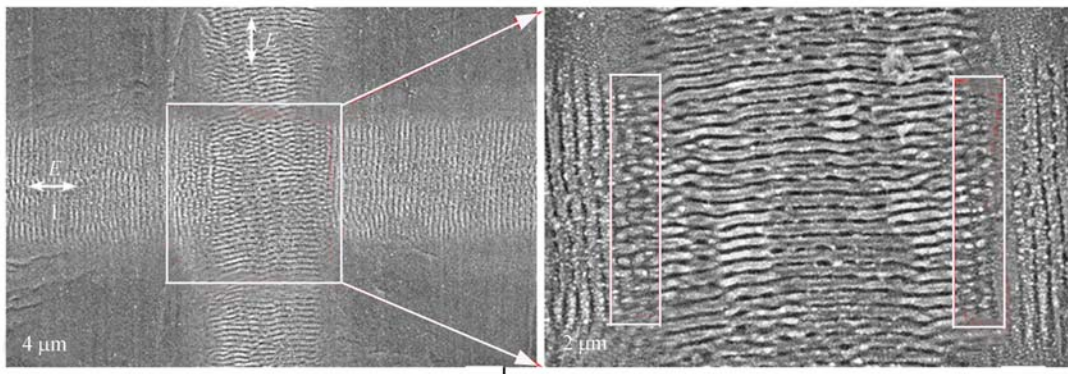
$$\epsilon_i(\omega) = \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega(\omega^2 + \Gamma^2)}. \quad (4)$$

式(2)、式(3)和式(4)表明在飞秒激光作用下,产生的大量光生载流子导致 ϵ_r 减小,而 ϵ_i 增加。由于使用的飞秒激光能量密度接近硅片的烧蚀阈值,根据文献[22],此时载流子浓度估算约为 $6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$,在 $N_e > 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 时,硅的折射率实部缓慢减小,而虚部显著增加。意味着硅复折射率的虚部增大,而实部不变,这导致在烧蚀初期形成的条纹结构内产生局域场,条纹结构影响了后续入射脉冲激光能量的再分布,沿条纹沟槽方向形成一定间距的局域场分布,存在局域场的位置进一步烧蚀,将初期诱导出的条纹烧蚀成纳米孔链结构。图 2(a)中纳米孔所在位置即为局域场分布区域,未发生烧蚀的位置就形成了与激光偏振方向平行的“脊”结构,最终形成了嵌套纳米孔的复合二维结构。

正交扫描区域诱导出的微纳结构形貌如图 2(b)和 2(d)所示,单次水平或者竖直方向扫描都诱导上述纳米孔阵列分布,而先后两次扫描过的相交区域,第二次扫描加工过程破坏了部分第一次诱导出的纳米孔结构,从图 2(d)中孔的形貌可以看出第二次扫描诱导出的结构覆盖在第一次扫描诱导出的纳米孔链之上,在正交扫描区域形成了双层复合结构的叠加。正交区域纳米孔的尺寸变大,并沿第二次的扫描方向几乎连成了一片,说明第一次扫描诱导出的纳米孔链结构降低了硅片的烧蚀阈值,使得同样的 F 时相邻纳米孔的连接部分也被烧蚀,第二次扫描诱导的结构占主导。单次扫描得到的纳米孔链结构的宽度约为 $10 \mu\text{m}$,正交扫描区域诱导出了 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 双层叠加的纳米孔链结构。

3.2 近烧蚀阈值的不锈钢正交扫描

近烧蚀阈值的飞秒激光在不锈钢表面诱导出了与激光偏振方向垂直的亚波长表面周期结构,不同扫描和偏振方向的正交扫描结果如图 3 和图 4 所示。



(a) 正交扫描区域 SEM 图片

(b) 放大 SEM 图片

(a) SEM image of orthogonal scanning area

(b) Enlarged SEM image of (a)

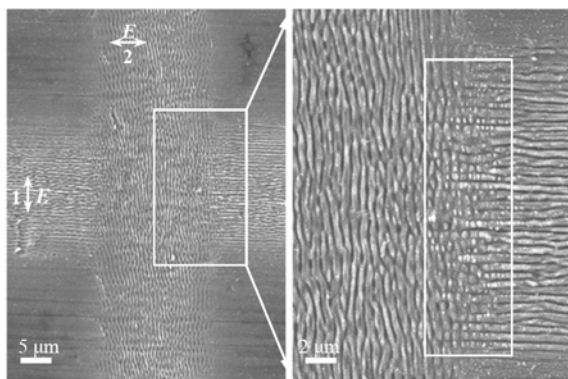
图 3 激光偏振与扫描方向平行时,正交扫描不锈钢诱导出的表面纳米结构 SEM 图片

Fig. 3 SEM images of stainless steel surface nanostructures induced by OLSP with laser polarization parallel to scanning direction

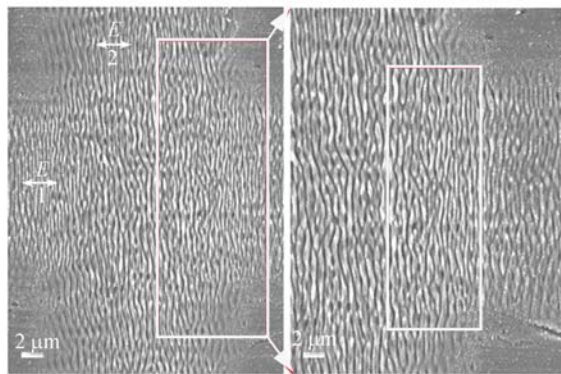
实验过程中,改变激光的能量密度和扫描速度,通过分析 SEM 的表征结果,发现当激光能量密度 $F=160 \text{ mJ/cm}^2$,扫描速度 $v=4 \text{ mm/s}$ 时,激光诱导的表面条纹结构分布最均匀,效果最理想,因此选择这组实验参数。正交扫描方式与硅片相同,图 3(a)中数字表示扫描顺序,箭头表示激光偏振方向,扫描方向沿图中烧蚀痕迹。

当激光偏振方向分别与正交扫描方向平行

时,两次线扫描都诱导出了与激光偏振方向垂直的亚波长表面条纹结构,见图 3(a)烧蚀痕迹区域内诱导出的与扫描方向垂直的条纹分布。而在正交扫描区域,第二次竖直方向扫描诱导过程重塑了第一次水平方向诱导出的结构,使得第一次水平方向扫描诱导出的条纹结构完全消失,第二次扫描诱导的结构占主导的特点与半导体硅表面的正交扫描结果类似,而不同之处在于不锈钢正交



(a) 偏振与扫描方向垂直时的 SEM 图片 (b) 局部放大 SEM 图片
 (a) SEM image with laser polarization vertical to scanning direction (b) Enlarged SEM image



(c) 相同偏振方向的 SEM 图片 (d) 局部放大 SEM 图片
 (c) SEM image with same polarization direction (d) Enlarged SEM image

图 4 改变激光偏振与扫描方向时,正交扫描不锈钢诱导出的表面纳米结构 SEM 图片

Fig. 4 SEM images of stainless steel surface nanostructures induced by OLSP with different scanning directions and laser polarizations

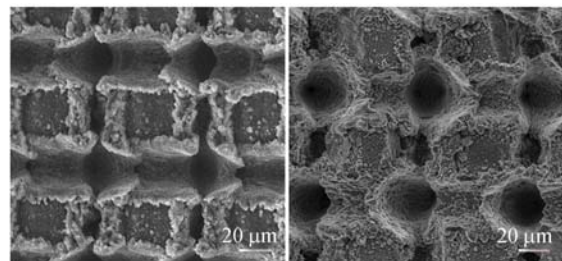
区域只保留了第二次诱导的条纹结构,而硅片正交区域则是先后两次正交扫描结构的覆盖叠加。在不锈钢交叉区域左右两侧,见图 3(b)中两个白色线框内,第二次垂直方向扫描后,可以看到第一次水平方向扫描诱导出的条纹结构出现了断裂,纳米线条纹断裂形成了纳米点阵列分布。这是由于经过第一次水平方向扫描诱导条纹结构后,条纹结构的形成会降低表面烧蚀阈值,而聚焦的高斯光束的光斑边缘能量密度比中心低,导致第二次垂直扫描时白框内原有的垂直条纹烧蚀不彻底,断裂成

为纳米点阵列结构,形成了纳米点阵列嵌套在纳米线内的复合结构。纳米点阵列结构只出现在正交区域的左右两侧,上下并没有发现,可以说明纳米点阵列结构的形成对激光能量密度极其敏感。

当激光偏振方向分别与正交扫描方向垂直时,如图 4(a)烧蚀痕迹区域内诱导出的与扫描方向平行的条纹分布,在正交区域的结果与图 3 类似,第二次扫描诱导的结构占主导优势,完全重塑了第一次诱导出的结构,在正交区域两侧得到了清晰的纳米点阵列分布结构。如图 4(b)框内所示,第一次扫描诱导出的水平分布的条纹结构经过第二次扫描烧蚀后,断裂成纳米点阵列。当两次扫描都使用水平偏振方向的激光时,两次线扫描烧蚀痕迹内诱导出的表面条纹结构取向一致,与前两种情况线扫描诱导出的条纹取向相互垂直不同,如图 4(c)所示,都沿竖直方向分布,此时正交扫描区域两侧没有诱导纳米点阵列结构。如图 4(d)框内所示,取向一致的条纹结构均匀分布,并没有像前两种情况断裂成纳米点阵列。不同扫描方向扫描时,只要激光偏振方向一致,基于表面等离子体波与入射激光干涉得到的场分布方向就与激光偏振方向垂直,诱导与激光偏振方向垂直的条纹结构,也就不会出现纳米条纹再次烧蚀断裂成纳米点阵列的实验现象。

3.3 远大于烧蚀阈值的硅片和不锈钢正交扫描

与近材料烧蚀阈值的飞秒激光诱导出的复合二维纳米结构不同,使用较高的激光能量密度正交线扫描不锈钢和硅片时,都出现了微米级的孔洞阵列结构。图 5(a)为不锈钢表面诱导出的微米孔和沟槽形貌的 SEM 图片,扫描速度 $v=1 \text{ mm/s}$, 间距 $d=70 \text{ μm}$, $F=6.4 \text{ J/cm}^2$ 。图 5(b)为硅片表面诱导出的微米孔结构的 SEM 图片,



(a) 不锈钢 (b) 硅片
 (a) Stainless steel (b) Silicon wafer

图 5 正交扫描诱导的微米孔阵列 SEM 图片
 Fig. 5 SEM images of micro-hole arrays by OLSP

扫描速度和间距与硅片的相同, $F=12.8 \text{ J/cm}^2$ 。微位移台保证 $70 \mu\text{m}$ 的扫描间距, 先进行竖直方向的线扫描后, 再进行水平方向的线扫描。由于使用远大于材料烧蚀阈值的能量密度, 两种材料的烧蚀边缘都出现了熔化的痕迹, 在正交扫描区域, 两次烧蚀的效果叠加, 导致微米级尺寸的孔洞结构出现。与激光低能量密度烧蚀类似的是, 后扫描的水平方向比先扫描的竖直方向占有优势, 竖直方向扫描的沟槽变得不明显, 这是由于第一次水平方向扫描烧蚀出的沟槽结构表面覆盖的纳米结构形貌会降低材料的烧蚀阈值, 导致同样 F 时第二次竖直方向扫描烧蚀的效果更剧烈。

虽然利用位移台的精确定位, 使用单点烧蚀的方法可以在材料表面制备出大面积分布的孔阵列结构, 但加工速度偏慢, 定位要准确, 操作起来不是很方便。如果调节扫描间距和烧蚀光斑, 可以利用正交线扫描法更快、更高效地制备大面积规则分布的微米级孔阵列结构。

3.4 两种材料表面微纳形貌的分析

近材料烧蚀阈值的飞秒激光在硅片表面诱导出了二维分布的纳米孔链结构, 在正交区域形成周期条纹嵌套纳米孔的双层复合二维结构; 而在不锈钢表面诱导亚波长的表面周期结构, 在正交区域的左右两侧形成纳米点阵列结构分布。这两种纳米复合结构的形成都依赖于激光的能量密度。硅和不锈钢诱导出的表面形貌差异很大, 主要是由于硅片在近烧蚀阈值的飞秒脉冲激光作用下, 光生载流子的产生导致硅的复折射率的虚部变大, 而实部则认为不变^[21], 导致烧蚀初期形成的条纹沟槽内局域场的形成, 有局域场的区域进一步烧蚀形成纳米孔链结构, 正交扫描时则诱导出嵌套纳米孔的双层复合结构; 而不锈钢则没有出现类似情况, 烧蚀初期形成的条纹结构只是加

强入射激光与表面等离子体波的耦合, 促进条纹结构的进一步烧蚀, 图 3(b) 中正交区域的条纹结构比单独线扫描诱导出的条纹要规则整齐也可以说明这一点。只要正交扫描时诱导出的条纹结构相互垂直, 则边缘就会出现纳米点阵结构。

对于远大于烧蚀阈值的飞秒激光烧蚀, 由于硅片的烧蚀阈值比不锈钢的大, 烧蚀硅片的激光能量密度是不锈钢的两倍, 实验表明硅片表面诱导出的微米孔形貌比不锈钢表面的要规则, 说明较大的 F 值时, 不锈钢表面的热扩散较明显, 出现液化过程, 而硅片表面只在烧蚀区域形成高温高压环境, 形成等离子体的喷发, 孔洞的形貌较规则。两种正交扫描微加工情况下, 第二次扫描诱导的结构占主导的特点则是一致的。

4 结 论

本文利用正交线扫描对材料表面同一位置进行复写的微加工方式, 在接近材料烧蚀阈值的飞秒激光作用下, 半导体硅表面诱导出了双层嵌套纳米孔链的复合二维结构, 不锈钢表面的交叉扫描区域两侧诱导出了纳米点阵列结构, 形成纳米点嵌套在纳米线内的复合结构, 纳米点阵列结构的出现则依赖于两次正交扫描时激光的偏振方向。实验结果表明, 第一次扫描时诱导出的结构降低了第二次扫描的烧蚀阈值, 因此经过第二次正交扫描重新烧蚀, 后一次正交扫描诱导结构占主导。作为对比, 在远大于材料烧蚀阈值的飞秒激光作用下, 硅和不锈钢表面都烧蚀出大面积规则分布的微米孔洞阵列。在此研究基础上可以进一步研究覆盖这一结构的材料表面吸收增强和表面润湿特性, 改性后的材料表面为微纳功能器件的制备提供了可行的思路。

参考文献:

- [1] 乔红贞, 王飞, 张楠, 等. 飞秒激光在钨表面制备二维周期复合结构的研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102010.
QIAO H ZH, WANG F, ZHANG N, *et al.*. Femtosecond laser fabrication of two-dimensional periodic composite structures on tungsten surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1):0102010. (in Chinese)

- [2] YAO J W, ZHANG CH Y, LIU H Y, *et al.*. High spatial frequency periodic structures induced on metal surface by femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 905-911.
[3] LI X F, ZHANG CH Y, LI H, *et al.*. Formation of 100-nm periodic structures on a titanium surface by exploiting the oxidation and third harmonic generation induced by femtosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28086-28099.
[4] ZHANG CH Y, YAO J W, LIU H Y, *et al.*. Coloring silicon surface with regular nanohole arrays

- induced by femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1106-1108.
- [5] HER T H, FINLAY R J, WU C, *et al.*. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(12): 1673-1675.
- [6] 黄媛媛, 钱静, 邵冲云, 等. 飞秒激光在不同羟基浓度纯石英玻璃内部诱导缺陷研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 102011.
- HUANG Y Y, QIAN J, SHAO CH Y, *et al.*. Femtosecond laser induced defects in pure silica glass with different hydroxyl concentrations [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 102011. (in Chinese)
- [7] SHEN M Y, CROUCH C H, CAREY J E, *et al.*. Femtosecond laser-induced formation of submicrometer spikes on silicon in water [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(23): 5694-5696.
- [8] VOROBYEV A Y, GUO CH L. Laser turns silicon superwicking[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6455-6460.
- [9] QI L T, NISHII K, NAMBA Y. Regular subwavelength surface structures induced by femtosecond laser pulses on stainless steel [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(12): 1846-1848.
- [10] DUFFT D, ROSENFELD A, DAS S K, *et al.*. Femtosecond laser-induced periodic surface structures revisited: a comparative study on ZnO[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(3): 034908.
- [11] BOROWIEC A, HAUGEN H K. Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(25): 4462-4464.
- [12] JIA X, JIA T Q, ZHANG Y, *et al.*. Periodic nanoripples in the surface and subsurface layers in ZnO irradiated by femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1248-1250.
- [13] LE HARZIC R, SCHUCK H, SAUER D, *et al.*. Sub-100 nm nanostructuring of silicon by ultrashort laser pulses[J]. *Optics Express*, 2005, 13(17): 6651-6656.
- [14] HUANG M, ZHAO F L, CHENG Y, *et al.*. Origin of laser-induced near-subwavelength ripples: interference between surface plasmons and incident laser[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(12): 4062-4070.
- [15] LE HARZIC R, DÖRR D, SAUER D, *et al.*. Generation of high spatial frequency ripples on silicon under ultrashort laser pulses irradiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(21): 211905.
- [16] JIA T Q, CHEN H X, HUANG M, *et al.*. Formation of nanogratings on the surface of a ZnSe crystal irradiated by femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(12): 125429.
- [17] ZHANG CH Y, YAO J W, LAN SH, *et al.*. Effects of plasma confinement on the femtosecond laser ablation of silicon[J]. *Optics Communications*, 2013, 308: 54-63.
- [18] 余佳, 何书通, 宋寰宇, 等. 飞秒激光前向转移诱导产生金属纳米结构薄膜[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 102009.
- YU J, HE SH T, SONG H Y, *et al.*. Metal nanostructured film generated by femtosecond laser induced forward transfer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 102009. (in Chinese)
- [19] YANG Y, YANG J J, XUE L, *et al.*. Surface patterning on periodicity of femtosecond laser-induced ripples[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(14): 141101.
- [20] GUAY J M, LESINA A C, C T G, *et al.*. Laser-induced plasmonic colours on metals[J]. *Nature Communication*, 2017, 8: 16095.
- [21] HUANG M, ZHAO F L, CHENG Y, *et al.*. Origin of laser-induced near-subwavelength ripples: interference between surface plasmons and incident laser[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(12): 4062-4070.
- [22] BONSE J, ROSENFELD A, KRÜGER J. Implications of transient changes of optical and surface properties of solids during femtosecond laser pulse irradiation to the formation of laser-induced periodic surface structures[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(12): 5420-5423.

作者简介:



张成云(1979—),男,安徽桐城人,博士,讲师,2013年于华南师范大学获得博士学位,主要从事纳米光子学与功能器件方面的研究。E-mail: zarwu@qq.com