

非柱对称飞秒矢量光在钨表面制备弧形周期条纹结构

王婷媛, 刘伟伟, 张楠*, 余志强, 付璐, 刘洪双, 周朗峰

南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350

摘要 将两个相位光栅分别作为分束和合束元件, 生成了偏振态连续变化的非柱对称飞秒矢量光束。通过调节合束相位光栅的波矢方向, 即可实现标量光到矢量光的转变, 以及矢量光偏振态的调节。利用非柱对称飞秒矢量光在金属钨表面制备了由弧形条纹组成的二维周期性结构, 在相邻弧形条纹偏移量(水平方向的周期)保持 560 nm 不变的情况下, 通过调节飞秒矢量光的偏振态分布, 可使弧形条纹的底长(竖直方向的周期)逐渐减小至 4 μm 。微区反射谱测量表明: 弧形周期条纹的存在明显减小了可见至近红外波段的反射率, 且反射率随弧形条纹底长的减小而增大。飞秒激光的辐照没有改变金属钨表面的物质组分, 因此, 反射率的改变完全是由钨表面的二维周期性结构导致的。

关键词 非线性光学; 激光制造; 弧形周期条纹结构; 飞秒矢量光; 金属钨

中图分类号 TN249; O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508023

Fabrication of Periodic Curved Ripple Structures on Tungsten Surface Using Femtosecond Non-Cylindrical Vector Beam

Wang Tingyuan, Liu Weiwei, Zhang Nan*, Yu Zhiqiang, Fu Lu,

Liu Hongshuang, Zhou Langfeng

*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering,
Nankai University, Tianjin 300350, China*

Abstract Two phase gratings are used as beam splitter and combiner to generate a femtosecond non-cylindrical vector beam exhibiting continuously varying polarizations. Further, by adjusting the orientation of the grating vector of the beam combiner, a scalar beam can be transitioned to a vector beam, and the polarization distribution of the femtosecond laser beam can be modulated. Two-dimensional periodic surface structures comprising curved ripples are fabricated on a tungsten surface using a femtosecond non-cylindrical vector beam. By adjusting the beam polarization distribution, the bottom length of the curved ripples, i. e., the period along the vertical direction, can be decreased to 4 μm while maintaining the horizontal period at 560 nm. The microreflectance spectral measurements denote that the periodic ripples significantly reduce the reflectivity in the visible and near-infrared ranges and that the reflectivity increases as the vertical period of the curved ripples decreases. Furthermore, femtosecond laser ablation does not change the chemical components of the tungsten surface, therefore, the variation in reflectance can be solely attributed to the change in surface morphology.

Key words nonlinear optics; laser manufacturing; curved periodic ripple structure; femtosecond vector beam; tungsten

OCIS codes 140.3390; 220.4241; 260.5430; 160.3900

1 引 言

随着纳米技术的发展, 微纳结构的设计和制

备^[1-2]受到了广泛关注。飞秒激光可在几乎所有的固体材料(包括金属^[3]、半导体^[4]和电介质^[5])表面诱导生成亚波长周期性表面结构(FLIPSSs), 这一

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-03-11; 录用日期: 2019-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(11574160)、天津市自然科学基金(16JJCQNJC01900)

* E-mail: zhangn@nankai.edu.cn

方式被称为 FLIPSSs 技术。该技术作为一种面加工技术,除了具有制备速度快、适合制备大面积表面结构的优势外,还具有一步成型以及材料通用性强的优点。FLIPSSs 在减反射^[6]、结构色^[7]、改善材料表面润湿性^[8-9]及摩擦特性^[10]等方面具有重要应用。入射激光的偏振态是影响 LIPSSs 条纹取向的重要因素。金属和半导体等强吸收材料表面形成的低空间频率条纹通常垂直于激光偏振^[11],但某些电介质材料,比如熔融石英^[12]和 BaF₂^[5],以及某些聚合物材料^[13-14],条纹则一般平行于激光偏振。因此,利用飞秒矢量光多样的偏振态分布可以制备出复杂的周期性结构^[15-16]。

本文基于文献^[17]提出的任意矢量光束产生系统,将其中的空间光调制器(SLM)仅作为相位光栅使用,产生了偏振态连续变化且变化速度可调的非柱对称矢量光束。因此,如果用相位光栅替代 SLM,就可利用该装置产生高峰值功率的非柱对称飞秒矢量光。本文利用上述方式产生的非柱对称矢量光束,在金属钨表面制备了大面积的亚波长周期性弧形条纹结构。通过改变飞秒矢量光的偏振态分布,制备了具有不同底边长度的弧形条纹,弧形条纹的底边长度可短至 4 μm。微区反射谱的测量结果表明:覆盖有弧形条纹结构的样品的表面反射率随着弧形条纹底边长度的减小而增加;通过调整弧形条纹的底边长度可以实现反射率的调节。同时,显微拉曼光谱测量结果表明,与未经历激光辐照的钨靶表面相比,制备了弧形周期条纹结构的样品表面并未发生化学组分的变化,这说明反射率的改变完

全是由钨表面形貌的改变导致的。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。掺钛蓝宝石飞秒激光放大系统(Legend Elite HE+, Coherent Inc.)输出中心波长为 800 nm,脉宽为 35 fs,重复频率为 2500 Hz,最大单脉冲能量为 1.4 mJ 的水平线偏振激光脉冲。利用反射镜 M1 前的半波片 HWP 和透射偏振方向沿 x 轴的线偏振片 LP1 调节入射光的功率。SLM 上加载的是二值相位光栅(朗奇相位光栅, RG1),起分束器的作用,其周期与起到合束作用的朗奇相位光栅 RG2 一致,均为 64 μm。透镜 L1 和 L2 的焦距均为 300 mm,构成一个 4*f* 系统(f 为焦距)。RG1 和 RG2 关于 4*f* 系统共轭。水平线偏振的飞秒激光被加载了朗奇相位光栅的 SLM 反射后,±1 级衍射光包含了 80% 的激光功率。经透镜 L1 后焦面上的含两个小孔的滤波器 F 后,只有±1 级衍射光到达透镜 L2。两个小孔后方的 λ/4 波片 QWP 的快轴相互垂直,将水平线偏振的±1 级衍射光分别转变为左旋和右旋圆偏振光。朗奇相位光栅 RG2 将±1 级衍射光合束。RG1 和 RG2 的光栅矢量对称,经 RG2 合束后的光束为线偏振标量光。但当绕着 RG2 的法线改变 RG2 的幅角时, RG1 和 RG2 的光栅矢量在 xy 面内的投影就会出现夹角,此时会生成线偏振方向在光束横截面内沿 y 轴转动的矢量光束,偏振方向转动的速度随 xy 面内光栅矢量投影夹角的增大而增大。

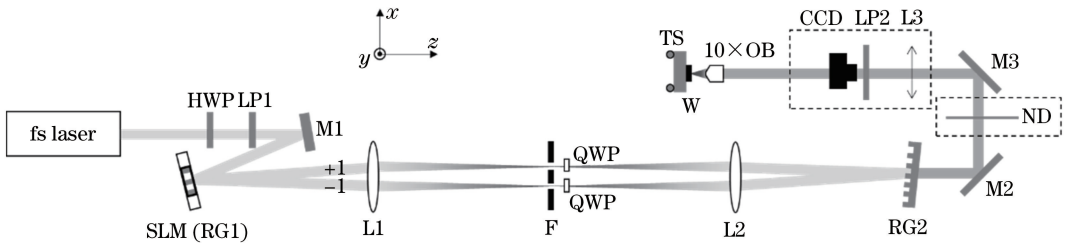


图 1 实验装置示意图(俯视图)

Fig. 1 Schematic of experimental setup (top view)

经反射镜 M2、M3 反射后,合束光偏振态分布由图 1 中虚线框内的装置测量,用 CCD 相机(LU135M)记录光束经偏振片 LP2 后的光强分布。其中,ND 为中性密度衰减片,L3 为透镜。制备微纳结构时,去掉虚线框内的元件。飞秒矢量光经 10 倍物镜(OB,数值孔径为 0.25)聚焦,高纯钨靶(纯度为 99.95%)位于焦点后 100 μm 处。靶材固定在二

维电控平移台 TS(WNSC 400)上,制备微纳结构时,靶材沿 x 方向匀速移动。实验在一个大气压下进行。

使用扫描电子显微镜(SEM, VE 9800)观测钨靶表面制备的微纳结构。对钨靶的抛光表面及制备了弧形条纹结构的区域分别进行微区反射谱测量和拉曼光谱测量。

3 实验结果及分析

3.1 飞秒激光在钨表面制备周期性弧形条纹结构

图 2(a)是将朗奇相位光栅 RG2 绕其法线转动一个小角度($<1^\circ$)后,飞秒激光经过偏振片 LP2 后的强度分布图,偏振片 LP2 的透振方向为水平,如图中双箭头所示。顺时针转动偏振片 LP2[见图 2(a)中所标的转动方向],CCD 上记录的飞秒矢量光束的强度分布会逐渐向上移动,因此,该矢量光束的偏振态在水平方向一致,在竖直方向连续渐变。将偏振片的透振方向沿水平方向时记为

0° ,顺时针转动偏振片时角度为正。记录偏振片转动时强度分布图中暗条纹位置的变化,得到图 2(b),其中 R^2 是线性拟合直线的拟合优度。拟合结果表明,暗条纹位置(该位置偏振方向与偏振片透振方向垂直)与偏振片转动角度成线性关系。由此得到了图 1 装置产生的矢量光束的偏振态分布,如图 2(a)中的弯曲实线所示。图 2(a)中弧形实线的切线方向代表光束横截面内线偏振的取向。光束横截面内偏振态变化的速度,即图 2(a)中沿竖直方向光强周期性变化的次数,随着 RG2 转过幅角角度的增大而增大。

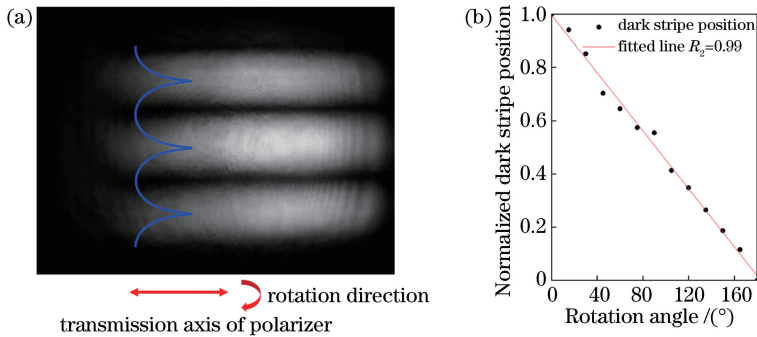


图 2 飞秒激光经过偏振片 LP2 后的强度分布图及其暗条纹位置与偏振片转动角度的关系。(a)使用图 1 虚线框中的 CCD 记录的飞秒激光经过偏振片 LP2 后的强度分布图;(b)暗条纹位置与 LP2 转动角度的关系

Fig. 2 Femtosecond laser intensity distribution after passing through polarizer LP2 and relationship between the position of dark stripe and rotation angle of polarizer. (a) Femtosecond laser intensity distribution after passing through polarizer LP2 recorded by CCD camera in dashed box of Fig. 1; (b) relationship between the position of dark stripe and rotation angle of LP2

图 3 是偏振态变化速度不同的矢量飞秒激光经过水平偏振片后的光强分布图,及其在钨靶表面制

备的亚波长周期条纹结构。图 3 中的周期结构是使用激光能流为 0.44 J/cm^2 的飞秒脉冲制备的,制备

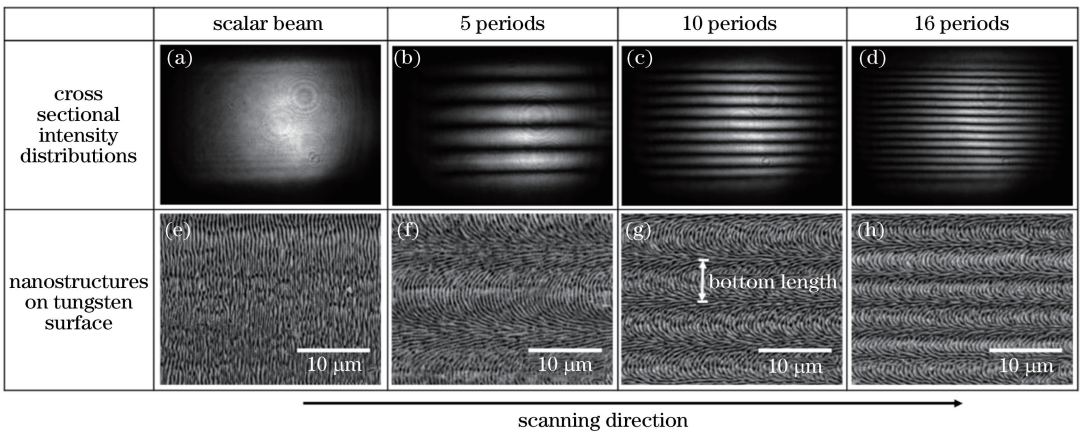
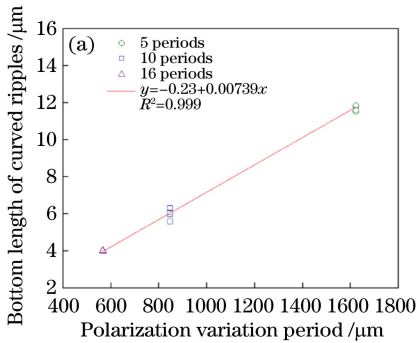


图 3 光强分布图及其在钨靶上制备的周期性条纹结构。(a)~(d)经过水平偏振片后被 CCD 记录的光强分布图;(e)~(f)偏振态分布不同的飞秒激光在钨靶表面制备的周期性结构的 SEM 照片

Fig. 3 Intensity distributions and corresponding periodic structures fabricated on tungsten surface. (a)-(d) Intensity distributions of femtosecond vector beam recorded by CCD camera after passing through horizontal polarizer; (e)-(f) SEM pictures of periodic structures on tungsten surface fabricated by femtosecond laser with different polarization distributions

时钨靶沿 x 轴负方向移动,移动速度为 0.2 mm/s 。此时光斑相对钨靶沿图 3 中箭头所示方向移动。图 3(a)是未转动 RG2 幅角时生成的飞秒标量激光经过水平偏振片后的光强分布图,在钨靶表面制备出如图 3(e)所示的周期性直条纹,其周期小于飞秒激光波长,约为 560 nm 。图 3(b)~(d)是转动 RG2 幅角后生成的具有不同偏振态变化速度的飞秒矢量光经过水平偏振片后的强度分布图,可见,在光束横截面内其偏振完成周期性变化的次数分别为 5、10 和 16。分别使用这些矢量光束在钨靶表面制备的周期性条纹结构如图 3(f)~(h)所示,可见,此时形成的微纳结构存在两个不同的周期,一个是弧形条纹在水平方向的重复周期,此周期与飞秒标量光束制备的直条纹周期一致,均为 560 nm ;另一个是弧形条纹在垂直方向的重复周期,即弧形条纹的底长,见图 3(g),这个周期由偏振态沿垂直方向变化的快慢决定。从图 3(b)到图 3(d),随着 RG2 转动角度增大,偏振态沿垂直方向变化的速度加快,对应弧形条纹的底长减小,实现了垂直方向周期可调谐的二维微纳结构的制备。

根据图 2 中得到的飞秒矢量光的偏振分布以及钨靶表面形成的周期性条纹的取向垂直于激光偏振方向的特性[见图 3(a)、(e)],计算得到了弧形条纹的形状,如图 4 中实线所示。利用 ImageJ 软件^[18],从图 3(f)~(h)中提取实验制备的弧形条纹形状,绘制于图 4 中。图 4 使用的是约化坐标,其横纵坐标均以每个弧形条纹结构各自的底长为单位,以便于比较不同偏振渐变周期的飞秒矢量光制备的弧形条纹结构的形态。由图 4 可知,计算得到的弧形条纹形状和飞秒激光制备的弧形结构形状基本一致。



即使对于图 3(h),弧形条纹的底长仅为 $4 \mu\text{m}$ (飞秒矢量光的偏振方向在 $4 \mu\text{m}$ 的空间尺度上完成了 180° 转动),偏振方向转动速度达到 $45 (^\circ)/\mu\text{m}$,实验制备的弧形条纹仍与偏振方向垂直。

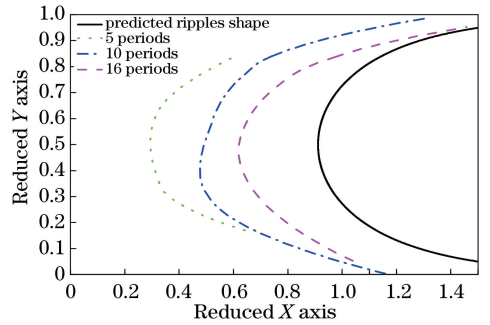


图 4 预测的条纹形状和实验制备出的条纹形状的对比
Fig. 4 Comparison between predicted and actual shapes of ripples

图 5(a)给出了图 3(f)~(h)中钨靶表面制备的弧形周期条纹结构的底长与矢量飞秒激光偏振变化周期的关系。图 5(a)中的圆形、正方形和三角形是实验得到的数据,分别代表一个光斑内偏振周期性变化次数分别为 5、10 和 16 的矢量光束的情况。拟合结果(见图 5(a)中的实线)表明弧形条纹结构的底长 d_0 与偏振变化周期 d_i 成正比关系: $d_0 = -0.23 + 0.0074d_i$ 。拟合直线的斜率 k 是准直高斯光束经实验使用的 10 倍物镜聚焦后,靶材表面(离焦 $100 \mu\text{m}$)的光斑直径与准直高斯光束的光斑直径之比。计算了得到了不同离焦量下的 k 值,即图 5(a)中拟合直线的斜率,进而计算出了弧形条纹底长 d_0 、离焦量与偏振变化周期 d_i 的关系,如图 5(b)所示。其中圆形、正方形和三角形的含义与图 5(a)中的相同。由图 5(b)可见,图 1 所示的实验装置,能

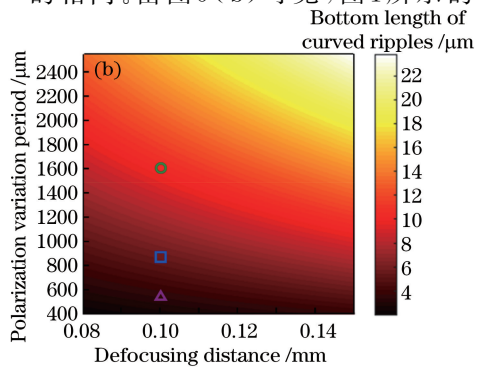


图 5 偏振变化周期与弧形结构底长、离焦量之间的关系。(a)离焦量为 0.1 mm 时,偏振变化周期与弧形结构底长的关系;
(b)不同离焦量下偏振变化周期与弧形结构底长的关系

Fig. 5 Relationships among polarization variation period, bottom length of curved ripples and defocusing distance.
(a) Polarization variation period versus bottom length of curved ripples when defocusing distance is 0.1 mm ;
(b) bottom length of curved ripples versus polarization variation period and defocusing distance

基于离焦量和矢量光束偏振变化周期对弧形周期条纹结构的底长进行调控,制备出不同底长的弧形周期条纹结构。

3.2 显微拉曼光谱及微区反射光谱的测量

图 6 给出了未经飞秒激光辐照的抛光钨靶表面及弧形条纹结构区域[图 3(g)]的显微拉曼光谱。测

量结果表明,飞秒激光辐照前后拉曼峰的位置及强度保持不变。在图 6 中,位于 396, 409, 635, 678, 835 cm^{-1} 等处几个比较明显的特征峰均为钨的氧化物 WO_3 或钨盐 WO_4^{2-} 的特征峰^[19-22],说明抛光钨靶表面原本就存在一定的氧化物,并没有因为飞秒激光的辐照而发生额外的氧化,物质组分亦未发生变化。

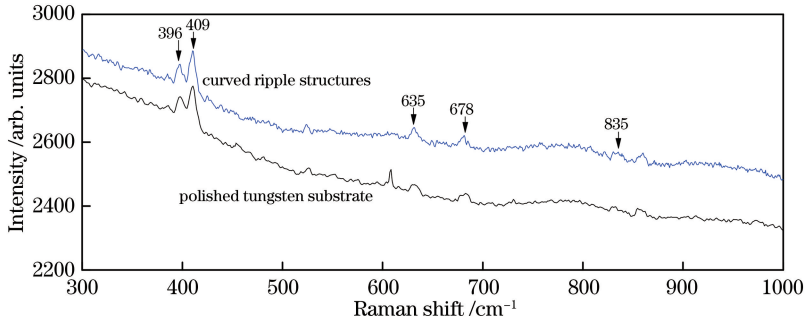


图 6 激发光波长为 785 nm 时抛光的金属钨表面和弧形条纹结构区的显微拉曼光谱

Fig. 6 Micro-Raman spectra of polished tungsten surface and curved ripple covered surface when excitation laser wavelength is 785 nm

图 7 是以标准白板为参照物,测得的 400~900 nm 波长范围内钨靶抛光表面及飞秒激光制备的微纳结构的微区反射光谱。图 7 最上方的实线是钨靶抛光表面的反射谱,其余 4 条从上到下分别是图 3(e)~(h)对应的直条纹和弧形条纹结构的反射谱。微纳结构区域和钨靶抛光表面的反射率曲线形

状基本一致,但与抛光的表面相比,微纳结构区域在 400~900 nm 波长范围内的反射率明显降低。并且,随着弧形条纹底长减小,反射率逐渐增大。可见,飞秒激光在钨表面制备的弧形条纹结构不但能明显降低钨靶表面的反射率,而且能够通过调节条纹的曲率半径实现钨靶表面反射率的调节。

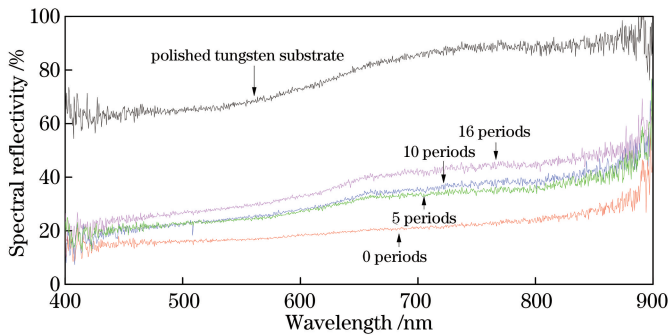


图 7 抛光的金属钨表面和弧形条纹结构区的微区反射光谱

Fig. 7 Micro-reflectance spectra of polished tungsten surface and curved ripple covered surface

金属钨表面的微纳结构包括两类,一类是亚波长周期性弧形条纹结构,另一类是位于条纹结构之上的特征尺寸更小的纳米结构^[23]。实验测得的反射率降低是这两种表面微纳结构的共同作用导致的,而反射率的调节源于条纹曲率的变化。

根据入射光波长和结构特征尺寸的比值,金属钨表面的两种微纳结构影响反射率的物理机制,可分别用条纹结构引起的陷光效应^[24]和等效介质理论^[25]来解释。首先,金属钨表面的周期性弧形条纹结构的水平周期为 560 nm,而反射率测量的波长范

围为 400~900 nm,与条纹结构的周期相差不大,因此,金属钨表面条纹结构的沟槽会产生类似于光学谐振腔的陷光效应^[24],从而导致反射率下降。钨靶表面的周期结构是由弧形条纹沿水平方向平移排布形成的,因此,当条纹结构由直条纹转变为弧形条纹时,局域微谐振腔的法线与中心连线不再重合,谐振效应(即陷光效应)变差,导致弧形条纹结构的反射率高于直条纹周期结构的反射率。同时,当弧形条纹的曲率发生变化时,也会伴随着条纹占空比以及条纹规整度(分叉、纳米孔等缺陷的多少)的改变,这

些也会影响谐振过程和反射率。覆盖在条纹结构表面的纳米结构,由于其尺寸远小于测量反射率所用的光波长($d \ll \lambda$),因此,可用等效介质理论^[25]来描述这些纳米结构与入射光的作用。纳米结构层可以等效为由纳米结构与空气组成的均匀介质层,其等效的光阻抗更接近空气的光阻抗,可以更好地实现阻抗匹配,从而降低了反射率。

4 结 论

通过转动合束用的朗奇相位光栅的幅角,生成了偏振态连续变化且变化速度可调的非柱对称飞秒矢量光束。使用该光束在钨靶表面制备出了不同底长的弧形条纹结构,条纹取向基本与激光偏振方向垂直,即使是在偏振方向的转动速度达到 $45^\circ/\mu\text{m}$ 的情况下,仍保持了这一特性。显微拉曼光谱的测量结果表明,飞秒激光的辐照并没有改变钨靶表面的物质组分。弧形条纹结构在水平方向上的周期为 560 nm ,而垂直方向的周期,即弧形条纹底长的大小可由偏振变化速度和离焦量控制,可小至 $4\ \mu\text{m}$ 。微区反射谱测量结果表明,改变弧形条纹的底长,可以实现可见至近红外波段的宽带反射率的整体调控,而反射率的变化会改变材料的吸收率和发射率,这使得制备的周期性弧形条纹结构能在热光伏^[26]、热管理^[27]领域具有重要应用。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y J, Song H Y, Liu H Y, *et al.* Fabrication of millimeter-scaled holes by femtosecond laser filamentation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402012.
张艳杰, 宋海英, 刘海云, 等. 飞秒激光成丝制备毫米级深孔[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402012.
- [2] Chen Z Y, Fang G, Cao L C, *et al.* Direct writing of silver micro-nanostructures by femtosecond laser tweezer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402006.
陈忠赞, 方淦, 曹良成, 等. 飞秒激光光镊直写银微纳结构[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402006.
- [3] Höhm S, Rosenfeld A, Krüger J, *et al.* Laser-induced periodic surface structures on titanium upon single- and two-color femtosecond double-pulse irradiation [J]. Optics Express, 2015, 23 (20): 25959.
- [4] 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.
- [5] Reif J, Costache F, Henyk M, *et al.* Ripples

- revisited: non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics[J]. Applied Surface Science, 2002, 197/198: 891-895.
- [6] 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.
- [7] Vorobyev A Y, Guo C L. Antireflection effect of femtosecond laser-induced periodic surface structures on silicon [J]. Optics Express, 2011, 19 (S5): A1031.
- [8] Papadopoulou E L, Barberoglou M, Zorba V, *et al.* Reversible photoinduced wettability transition of hierarchical ZnO structures [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113(7): 2891-2895.
- [9] Barberoglou M, Zorba V, Stratakis E, *et al.* Bio-inspired water repellent surfaces produced by ultrafast laser structuring of silicon [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5425-5429.
- [10] Bonse J, Kirner S V, Koter R, *et al.* Femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium nitride coatings for tribological applications [J]. Applied Surface Science, 2017, 418: 572-579.
- [11] Okamuro K, Hashida M, Miyasaka Y, *et al.* Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation [J]. Physical Review B, 2010, 82 (16): 165417.
- [12] Bonse J, Krüger J, Höhm S, *et al.* Femtosecond laser-induced periodic surface structures [J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(4): 042006.
- [13] Forster M, Kautek W, Faure N, *et al.* Periodic nanoscale structures on polyimide surfaces generated by temporally tailored femtosecond laser pulses [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13(9): 4155.
- [14] Rebollar E, Vázquez de Aldana J R, Martín-Fabiani I, *et al.* Assessment of femtosecond laser induced periodic surface structures on polymer films [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(27): 11287-11298.
- [15] Ouyang J, Perrie W, Allegre O J, *et al.* Tailored optical vector fields for ultrashort-pulse laser induced complex surface plasmon structuring [J]. Optics Express, 2015, 23(10): 12562.
- [16] JJ Nivas J, He S T, Rubano A, *et al.* Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q-plate [J]. Scientific Reports, 2016, 5(1): 17929.
- [17] Cai M Q, Li P P, Feng D, *et al.* Microstructures

- fabricated by dynamically controlled femtosecond patterned vector optical fields [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1474.
- [18] Schindelin J, Rueden C T, Hiner M C, *et al.* The ImageJ ecosystem: an open platform for biomedical image analysis [J]. *Molecular Reproduction and Development*, 2015, 82(7/8): 518-529.
- [19] Cho W S, Yashima M, Kakihana M, *et al.* Room-temperature preparation of highly crystallized luminescent SrWO₄ film by an electrochemical method [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(11): 3110-3112.
- [20] Porto S P S, Scott J F. Raman spectra of CaWO₄, SrWO₄, CaMoO₄, and SrMoO₄ [J]. *Physical Review*, 1967, 157(3): 716-719.
- [21] Baserga A, Russo V, di Fonzo F, *et al.* Nanostructured tungsten oxide with controlled properties: synthesis and Raman characterization [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(16): 6465-6469.
- [22] Filipescu M, Ion V, Colceag D, *et al.* Growth and characterizations of nanostructured tungsten oxides [J]. *Romanian Reports in Physics*, 2012, 64(2): 1213-1225.
- [23] Vorobyev A Y, Makin V S, Guo C L. Periodic ordering of random surface nanostructures induced by femtosecond laser pulses on metals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(3): 034903.
- [24] Kim W, Guo J P, Hendrickson J. Subwavelength metal grating metamaterial for polarization-selective optical antireflection coating [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(7): 1392.
- [25] Tian K, Zou Y G, Hai Y N, *et al.* Design of subwavelength anti-reflective grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0901004.
田锟, 邹永刚, 海一娜, 等. 亚波长抗反射光栅的设计 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901004.
- [26] Andreev V M, Vlasov A S, Khvostikov V P, *et al.* Solar thermophotovoltaic converters based on tungsten emitters [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, 129(3): 298.
- [27] Brandner J J, Anurjew E, Bohn L, *et al.* Concepts and realization of microstructure heat exchangers for enhanced heat transfer [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, 30(8): 801-809.