

# 飞秒激光在金属钼表面诱导产生纳米量级周期条纹结构的研究

王浩竹 杨丰赫 杨帆 聂美彤 杨建军

南开大学现代光学研究所, 天津 300071

**摘要** 针对近红外(800 nm)及其二倍频(400 nm)飞秒激光脉冲在金属钼表面诱导产生周期性条纹结构的情况进行了研究,分析比较了入射激光能量、脉冲重叠数、激光中心波长和加工氛围等实验参数对金属表面自组织形成的条纹结构空间周期的影响,并利用中心波长为400 nm的飞秒激光在水环境中于单晶钼表面制备出了空间周期仅约160 nm的条纹结构。同时针对水中加工的情况,在理论上提出了入射激光与表面等离子体波发生干涉和表面等离子体波形成驻波两种机制相互竞争的物理模型,很好地解释了实验现象,对于深入理解飞秒激光在金属表面进行纳米尺度的加工制备具有重要意义。

**关键词** 超快光学; 飞秒激光; 微纳结构; 表面等离子体波; 干涉理论; 纳米制备技术

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0103001

## Investigation of Femtosecond-Laser Induced Periodic Surface Structure on Molybdenum

Wang Haozhu Yang Fenghe Yang Fan Nie Meitong Yang Jianjun

*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

**Abstract** The formation of laser induced periodic surface structure (LIPSS) on the surface of molybdenum is investigated by using 400 nm and 800 nm femtosecond lasers. In the experiment, the influences of the processing parameters, specifically pulse energy, central wavelength, pulse overlap number and the fabricating ambient on the spatial period of the LIPSS are examined. In the ambient of water, ripple-like LIPSS on molybdenum with subwavelength spatial period of only around 160 nm is fabricated successfully by using 400 nm femtosecond laser with optimized processing parameters. Besides, an improved model is proposed to account for the LIPSS formation in the water. In this model, two kinds of interference mechanism, including the interference between the incident laser and the excited surface plasmon polaritons, and the other between surface plasmon polaritons propagating opposite directions, which causes standing wave, compete with each other. The improved model agrees well with the experimental phenomena, which is of great significance for fabricating nano-structure on the surface of metals.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond-laser; nano-structure; surface plasmonic polaritons; interference theory; nano fabrication technology

**OCIS codes** 220.4241; 320.2250; 050.6624; 240.6690; 140.7090

收稿日期: 2014-07-10; 收到修改稿日期: 2014-08-26

基金项目: 南开大学2013年本科生创新科研“百项工程”项目(BX11227)

作者简介: 王浩竹(1993—),男,本科,主要从事飞秒激光微加工方面的研究。E-mail: wanghaozhu2008123@163.com

导师简介: 杨建军(1967—),男,博士,教授,主要从事激光辅助的微纳米制备技术和飞秒激光对材料相干调控等方面的研究。E-mail: jjyang@nankai.edu.cn

## 1 引言

近年来,飞秒激光微加工已成为重要的研究方向<sup>[1-2]</sup>,利用飞秒激光在固体材料表面诱导产生周期性条纹结构(LIPSS)已发展成为激光光电子应用和激光微细加工领域内的重要研究方向之一。大量的研究证实,这种周期性条纹结构可以在金属、半导体和绝缘介质等多种块体和薄膜材料表面产生<sup>[3-8]</sup>。与长脉冲激光相比较,飞秒激光诱导表面条纹结构的周期通常小于入射激光的波长,属于亚波长范围;且一般情况下,条纹结构的排列方向与入射激光偏振方向相互垂直<sup>[9]</sup>,但对于特定金属,大角度入射时可能产生与入射激光偏振方向平行的条纹结构,称之为Type-C结构<sup>[10]</sup>。不仅如此,实验研究表明这些表面微纳米结构将会使材料具有很多优异的物化特性,如增强材料的光学吸收<sup>[11]</sup>、光电子和热波辐射性能<sup>[12]</sup>,改善材料疏水和流体动力学性能<sup>[13]</sup>,增强表面等离子体波激发等<sup>[14]</sup>。在理论研究方面,针对飞秒激光作用下LIPSS的产生机制进行了深入的分析研究。不同于传统的入射光与散射光干涉理论<sup>[15]</sup>,提出了入射激光与材料表面激发的等离激元(SPPs)相互干涉的物理模型<sup>[16]</sup>,很好地解释了亚波长周期性条纹结构的形成。且对于条纹周期远小于波长的现象,又提出了SPPs直接作用于材料表面的理论解释<sup>[17]</sup>。

钼是一种原子间结合力很强的过渡金属,在常温和高温下都能保持很高的强度,且具有较小的膨胀系数,加之高电导率和良好的导热性能,钼及其合金在冶金、农业、电气、化工、环保和宇航等重要领域有着广泛的应用和良好的发展前景<sup>[18-19]</sup>。但是,目前关于利用飞秒激光在钼表面诱导产生周期性条纹的研究相对较少。实验选择钼作为加工靶材,有助于通过诱导形成的周期性表面条纹结构改善钼表面的光学性能,从而实现利用钼制作低发射度光阴极微波电子注入器<sup>[20]</sup>等方面的相关应用。通过优化入射激光能量、激光中心波长、样品离焦距离和加工氛围等加工参数,成功地在金属钼表面诱导产生了周期仅约为160 nm的条纹结构。同时,在理论上引入了SPPs有效存在时间的概念来分析加工参数对形成的条纹结构空间周期的影响。实验结果与理论分析吻合得很好,这对于利用飞秒激光在水环境下在金属钼表面制备周期性条纹结构有重要意义。

## 2 实验研究

实验使用的光源为商业化掺钛蓝宝石飞秒激光放大系统(HP-Spitfire, New Port Inc),产生的飞秒激光脉冲宽度为50 fs、单脉冲最大能量为2 mJ、重复频率为1 kHz、中心波长为800 nm,光束直径约为8 mm,输出激光为平行于光学平台的线偏振光。采用尺寸为20 mm×20 mm×1 mm的高纯单晶钼(Mo)作为靶材。为了探究飞秒激光不同中心波长对LIPSS形成的影响,在实验光路中放置硼酸钡(BBO)非线性晶体对800 nm的飞秒激光进行二倍频,并采用滤光片获得了中心波长为400 nm的出射飞秒激光脉冲。实验光路如图1所示。入射飞秒激光经焦距 $f=100$  mm的平凸透镜聚焦后垂直照射在样品表面,聚焦光斑直径约为40 mm,加工时样品上表面处于透镜焦点上方0.5 mm处。实验中利用中性衰减片对入射激光能量进行调节,同时使用三维平移台实现对金属样品的移动。

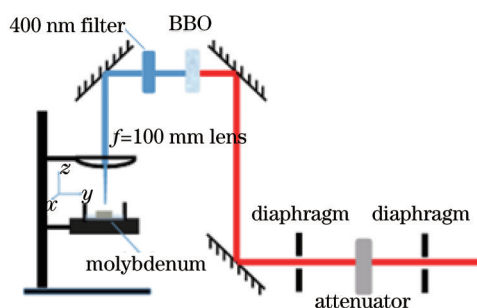


图1 飞秒激光在金属表面诱导微纳结构的实验装置示意图

Fig.1 Experimental setup of fabricating LIPSS on metal surface using femtosecond laser

为了探究入射飞秒激光通量 $F$ 、脉冲重叠数目 $N$ 以及入射激光中心波长 $\lambda$ 和加工氛围对于条纹结构空间周期 $\Lambda$ 的影响,设计了多组对照实验并分别选择上述因素作为变量,在不同的加工条件下对金属钼进行加工,获得了一系列实验结果。加工时利用三维平移台移动金属样品使飞秒激光在金属表面扫描,通过改

变扫描速度可以实现不同的脉冲重叠数  $N$ 。由于飞秒激光连续扫过金属钼表面,因此扫描速度  $v$ 、飞秒激光聚焦在金属表面的光斑直径  $D$ 、脉冲重复频率  $f$  和脉冲重叠数  $N$  的关系应为  $N = fD/v$ 。

为了测量条纹结构的空周期,首先将扫描电子显微镜(SEM, VE9800, KEYENCE)拍照得到的图像转换为灰阶图,然后利用自行编写的 MATLAB 程序对条纹结构沿电场方向上的离散灰度数值(0~255)进行傅里叶分析,由此得到的傅里叶频谱图即反映了条纹结构的空周期。

### 2.1 空气环境下加工的实验结果

当金属样品放置在空气环境中时,分析了入射激光中心波长分别为 800 nm 和 400 nm 时,表面条纹结构空周期  $\Lambda$  随脉冲重叠数目  $N$  和激光通量  $F$  的变化情况。实验结果表明,当入射激光中心波长为 800 nm 时,金属表面的条纹周期在 550~650 nm 范围内变化。图 2(a)和(b)分别为条纹结构周期随脉冲重叠数  $N$  和激光通量  $F$  的变化情况。可以看到,条纹结构周期随脉冲重叠数  $N$  和激光通量  $F$  增大而减小,但随前者变化明显,随后者变化缓慢。图 2(c)和(d)分别为当激光通量  $F=0.03 \text{ J/cm}^2$ 、脉冲重叠数  $N=50$  时,获得的条纹结构及其傅里叶空周期曲线。由图 2(d)可知,图 2(c)中所示条纹结构的空周期约为 649 nm。

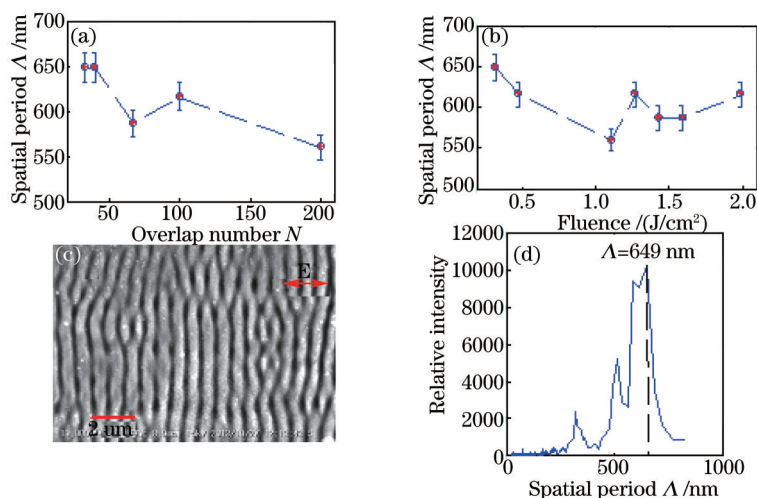


图 2 (a)  $F=0.96 \text{ J/cm}^2$  时条纹周期随脉冲重叠数  $N$  变化图; (b)  $N=50$  时条纹周期随激光通量  $F$  变化图; (c) 空气中 400 nm 飞秒激光诱导生成的条纹结构; (d) 图 2(c) 所示条纹结构的空周期

Fig.2 (a) Relationship between spatial period of LIPSS and pulse overlap number  $N$  with  $F=0.96 \text{ J/cm}^2$ ; (b) relationship between spatial period of LIPSS and scanning velocity with  $N=50$ ; (c) SEM image of LIPSS induced by 400 nm femtosecond laser in the air; (d) spatial spectrum of LIPSS in Fig.2(c)

接着利用中心波长为  $\lambda = 400 \text{ nm}$  的飞秒激光对金属钼进行加工。图 3(a)为激光通量  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$  时,条纹周期  $\Lambda$  随脉冲重叠数  $N$  变化的趋势图。总体而言,此时飞秒激光诱导产生的表面条纹结构周期  $\Lambda$  大约在 200~300 nm 范围内变化,相比于  $\lambda = 800 \text{ nm}$  的情况条纹周期明显减小。需要特别指出的是,此时条纹周期随脉冲数目呈现两种不同的变化趋势:当  $0 < N < 2000$  时,条纹周期随脉冲重叠数增加而减小;当  $N > 2000$  时,条纹周期随脉冲重叠数增加而逐渐增大。图 3(b)为当激光通量  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$ ,脉冲重叠数目为  $N=500$  时,中心波长为  $\lambda = 400 \text{ nm}$  的入射激光在金属钼表面诱导生成的条纹结构的 SEM 图像。图 3(c)为该条纹结构的傅里叶空周期曲线,条纹周期结构的空周期约为 274 nm。

### 2.2 蒸馏水环境下加工的实验结果

随后,将金属钼样品浸泡在蒸馏水环境中,其中样品表面的水膜厚度约为 0.5 mm,然后选取适当的加工参数重复与空气中类似的实验。图 4(a)为中心波长为  $\lambda = 800 \text{ nm}$  的入射飞秒激光在激光通量  $F=1.2 \text{ J/cm}^2$  时诱导形成的表面条纹结构空周期  $\Lambda$  随脉冲重叠数目  $N$  的变化趋势图。可以看到,实验中获得的表面条纹结构周期  $\Lambda$  主要在 350~450 nm 范围内,相较于空气中的情况减小了约 200 nm。说明加工环境(水)对条纹结构的形成产生了重要的影响并导致条纹结构的空周期大幅度减小。图 4(b)为在  $\lambda = 400 \text{ nm}$  的情况下,固定激光通量  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$  时获得的表面条纹结构周期  $\Lambda$  随脉冲重叠数目  $N$  的变化趋势。由图 4 可知,此时实验获得的表面条纹结构空周期  $\Lambda$  均小于 200 nm,相较之前的情况也得到了进一步的减小。

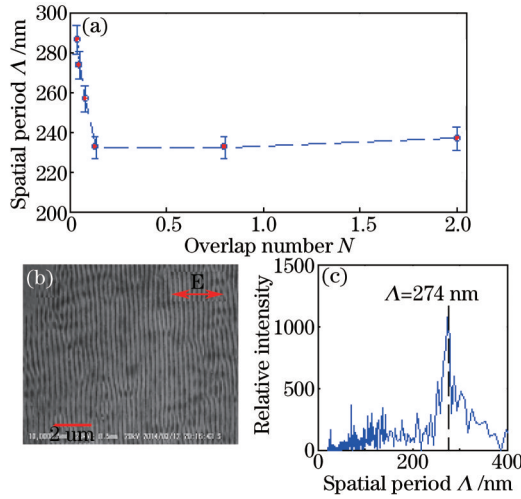


图3 在空气环境下,实验测得中心波长为 400 nm 的飞秒激光在金属钼表面形成周期性条纹结构的特性。(a) 条纹空间周期随脉冲累积数目的变化关系;(b) 当  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$ 、 $N=500$  时于空气中样品表面形成条纹结构的 SEM 图;(c) 图 3(b)所示条纹结构的空  
间频谱

Fig.3 Under air ambience, measured characteristics of LIPSS on Mo target by incident laser wavelength of 400 nm. (a) Dependence of LIPSS period on accumulated pulse number; (b) SEM image of LIPSS under the condition of  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$  and  $N=500$  in the air; (c) Fourier transformed spatial spectrum of LIPSS

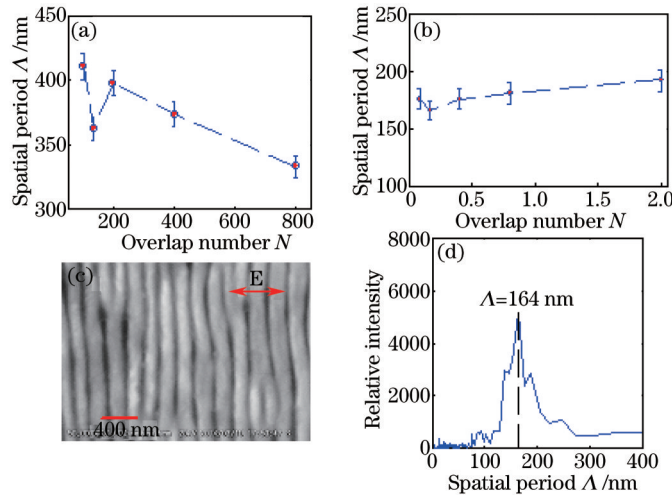


图4 (a)  $\lambda=800 \text{ nm}$ 、 $F=1.2 \text{ J/cm}^2$ 时条纹周期随脉冲重叠数变化趋势图;(b)  $\lambda=400 \text{ nm}$ 、 $F=0.04 \text{ J/cm}^2$ 时条纹结构周期随脉冲重叠数变化趋势图;(c)  $\lambda=400 \text{ nm}$ 、 $F=0.04 \text{ J/cm}^2$ 、 $N=8000$ 时获得的周期性条纹结构电镜图;(d)图 4(c)所示条纹结构空间频谱图

Fig.4 (a) Relationship between spatial period of LIPSS and overlap number using 800 nm laser with  $F=1.2 \text{ J/cm}^2$ ; (b) relationship between period of spatial LIPSS and overlapping number using 400 nm laser with  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$ ; (c) SEM image of the LIPSS induced by 400 nm femtosecond laser with  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$  and  $N=8000$ ; (d) spatial spectrum of LIPSS in Fig.4(c)

进一步分析不同加工参数下获得的条纹结构可得,在激光通量  $F=0.04 \text{ J/cm}^2$  ,脉冲重叠数目  $N=8000$  的情况下,金属样品表面可以获得如图 4(c)所示的周期性条纹结构。图 4(d)为图 4(c)中所得条纹周期结构的空  
间频谱,其谱线的峰值说明该条纹结构的空周期仅约为 164 nm。

### 3 理论分析

为了研究飞秒激光作用下金属表面周期性条纹结构产生的物理过程,可做如下分析:当金属靶材料钼放置在液体水环境中时,其中液膜层和金属样品都视作半无穷大空间,二者的介电常数分别为  $\epsilon_d$  和  $\epsilon_m$ 。液膜层和金属交界面支持 SPP 的条件为<sup>[21]</sup>

$$\text{Re}(\epsilon_m) < \epsilon_d \text{ 且 } |\text{Re}(\epsilon_m)| > \epsilon_d . \quad (1)$$

飞秒激光照射前,对于 800 nm 激光,  $\text{Re}(\varepsilon_m) = 1.5709$ <sup>[22]</sup>,  $\varepsilon_d = 1.331$ <sup>[23]</sup>, 不满足 SPP 的激励条件;对于 400 nm 激光  $\text{Re}(\varepsilon_m) = -1.1875$ <sup>[22]</sup>,  $\varepsilon_d = 1.344$ <sup>[23]</sup>, 亦不满足 SPP 的激励条件。然而,当入射飞秒激光穿过液膜层与金属表面进行作用时,极高的峰值功率使得金属表面的电子能量分布和晶格温度发生了瞬态变化,从而导致此时金属表层的光学性质发生相应改变,称之为改性金属层,如图 5 所示。

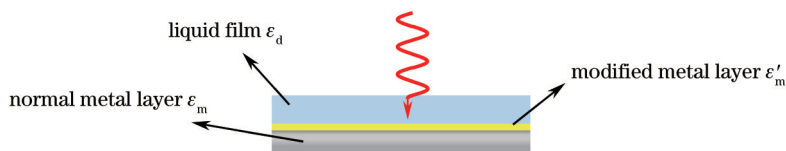


图 5 液体环境下飞秒激光与金属靶材料作用的物理模型

Fig.5 Model of interaction process between femtosecond laser and metal sample under liquid ambience

模型中,这一改性金属层的介电常数将受到电子温度的影响而发生改变。根据文献[24],当金属被激光照射时,改性金属层的电子处于非平衡态,费米面附近电子的分布发生变化,会使得介电常数产生一个附加的负瞬态变化  $\Delta\varepsilon_m$ <sup>[25]</sup>,这个负瞬态变化的大小与入射激光通量正相关。当金属的暂态介电常数  $\varepsilon'_m(\omega) = \varepsilon_m + \Delta\varepsilon_m$  满足  $\text{Re}(\varepsilon'_m) < 0$  且  $|\text{Re}(\varepsilon'_m)| > \varepsilon_d$  时,入射激光就能够在金属表面激发产生一传播方向(规定为  $x$  方向)与入射光的电矢量偏振方向相同的 SPP 波<sup>[21]</sup>,其相应的波长为

$$\lambda_{\text{SPP}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_d} + \frac{1}{\text{Re}(\varepsilon'_m)}}, \quad (2)$$

电场分量为

$$E_x = \begin{cases} E_0 \exp(\alpha_1 z) \exp[i(\beta x - \omega t)], & z < 0 \\ E_0 \exp(-\alpha_1 z) \exp[i(\beta x - \omega t)], & z > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中  $\alpha_1 = \beta \sqrt{-\frac{\varepsilon_d}{\text{Re}(\varepsilon'_m)}}$ ,  $\alpha_2 = \beta \sqrt{-\frac{\text{Re}(\varepsilon'_m)}{\varepsilon_d}}$ 。

由于飞秒激光与其在材料表面诱导激发的 SPP 波之间存在能量耦合,两者经过多次的正反馈过程,入射激光与 SPP 之间发生干涉,使得样品表面形成周期性的刻槽分布<sup>[14]</sup>,其中刻槽状条纹的空间周期为 SPP 波长,即  $\Lambda_1 = \lambda_{\text{SPP}}$ <sup>[16]</sup>。此时根据(2)式可知,当增大加工氛围的介电常数  $\varepsilon_d$  时,激光诱导激发的 SPP 波长或者条纹空间周期将减小,与实验观测结果相吻合。

当增加入射激光的通量时,条纹的空间周期变化规律不单调,在实验误差范围内,认为条纹的空间周期不发生明显变化。这与之之前文献的结论有一定的区别<sup>[24]</sup>。产生这样的结果是因为对于金属铂,入射激光对其介电常数的改变满足  $\Delta|\varepsilon_m| \gg \varepsilon_d$ ,从而使得  $|\text{Re}[\varepsilon'_m]| \gg \varepsilon_d$ 。此时,由(2)式可知,对条纹周期起决定作用的是液体的介电常数  $\varepsilon_d$ ,入射激光通量的改变对条纹周期的影响较小,所以入射通量的减小,条纹周期不发生明显变化。

事实上在飞秒激光作用过程中还存在着另一种机制,即当入射激光脉冲照射完成后,在材料表面激发产生的 SPP 波在一定时间内仍然能够存在,则此时光照区域内平行于电场振动方向上相向传播的两个 SPP 波之间则会通过相互干涉而形成驻波<sup>[17]</sup>。此时由于材料烧蚀去除形成条纹结构的周期为 SPP 驻波强度的周期,即  $\Lambda_2 = \frac{1}{2} \lambda_{\text{SPP}}$ 。两种机制的竞争主要取决于材料表面 SPP 波存留的时间寿命。

在实验中,条纹的周期  $\Lambda$  满足  $\Lambda_2 < \Lambda < \Lambda_1$ 。产生这样的结果是这两种干涉机制互相竞争的结果。同时,在空气中进行加工时,  $\Lambda$  更接近于  $\Lambda_1$ ,在水中加工时  $\Lambda$  更接近于  $\Lambda_2$ ,这是因为液体介质的引入,使得只有在更大的脉冲重叠数下才能加工出条纹结构,从而使条纹沟槽的深度增加,而条纹深度增加又会使 SPP 存留时间增加<sup>[26]</sup>。SPP 存留时间的增加会使第二种干涉机制加强。

不同介电常数的液体对纳米条纹周期的影响主要体现在两个方面。一方面,由(2)式可知,SPP 的波长随着液体介电常数的增大而减小,从而在一定的入射角度下,条纹周期也会相应减小;另一方面,液体的存在对金属表面 SPP 的存留时间有一个调控作用,使得 SPP 的存留时间增加,从而使 SPP 之间的干涉作用加强,

进而使得条纹周期更接近于 SPP 波长的一半。

在实验中,随着扫描速度的减小,金属表面单位面积上脉冲重叠数会相应增加。激光诱导表面周期性条纹结构是一个正反馈的物理过程,即当脉冲重叠数过少时,这种正反馈次数不足以形成条纹,或者形成的条纹结构不精细,这正是实验中所观察到的结果。同时由于脉冲重叠数的增加会使得沟槽深度增大,而沟槽深度的增加又将会使 SPP 波长减小<sup>[27-28]</sup>,从而 LIPSS 的空间周期也会相应减小,这与实验观测结构相吻合。

## 4 结 论

为了能够在金属表面获得周期更小的 LIPSS 结构,采取了改变激光参数,选用液体环境,使用倍频晶体等手段来最终达到了在金属钼表面获得质量较好的周期仅为 160 nm 左右的周期性条纹结构,提供了于水中在金属钼表面获取亚波长量级周期性条纹结构的新方法。分析了引入水膜后飞秒激光与金属相互作用的过程,通过引入两种形成条纹的物理过程相互竞争的机制,很好地解释了水环境下飞秒激光诱导形成的条纹结构的周期相较于空气中的情况大幅度减小的现象。

## 参 考 文 献

- 1 Dai Yutang, Zhou Guangfu, Li Tao, *et al.*. Fiber optic magnetic field sensor based On femtosecond laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206002.  
戴玉堂,周广福,李涛,等.基于飞秒激光微加工的光纤磁场传感器[J].*光学学报*, 2013, 33(12): 1206002.
- 2 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0201002.  
夏博,姜澜,王素梅,等.飞秒激光微孔加工[J].*中国激光*, 2013, 40(2): 0201002.
- 3 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103003.  
杨焕,黄珊,段军,等.飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J].*中国激光*, 2013, 40(1): 0103003.
- 4 Liu Kui, Feng Guoying, Deng Guoliang, *et al.*. Difference in microstructures induced by femtosecond laser scanning on silicon surface at different temperatures[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0803003.  
柳岗,冯国英,邓国亮,等.飞秒激光扫描不同温度下的硅片诱导形成微结构的差别[J].*中国激光*, 2012, 39(8): 0803003.
- 5 J Reif, F Costache, M Henyk, *et al.*. Ripples revisited: non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics[J]. *Appl Surf Sci*, 2002, 197-198: 891-895.
- 6 G Daminelli, J Krüger, W Kautek, *et al.*. Femtosecond laser interaction with silicon under water confinement[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 467(1-2): 334-341.
- 7 Q Z Zhao, S Malzer, L J Wang. Formation of subwavelength periodic structures on tungsten induced by ultrashort laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(13): 1932-1934.
- 8 V R Bhardwaj, E Simova, P P Rajeev, *et al.*. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(5): 057404.
- 9 Y Yang, J Yang, C Liang, *et al.*. Sub-wavelength surface structuring of NiTi alloy by femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2008, 92(3): 635-642.
- 10 J Wang, C Guo. Ultrafast dynamics of femtosecond laser-induced periodic surface pattern formation on metals[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(25): 251914.
- 11 R Younkin, J Carey, E Mazur, *et al.*. Infrared absorption by conical silicon microstructures made in a variety of background gases using femtosecond-laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(5): 2626-2629.
- 12 A Y Vorobyev, V S Makin, C Guo. Brighter light sources from black metal: significant increase in emission efficiency of incandescent light sources[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(23): 234301.
- 13 T Baldacchini, J E Carey, M Zhou, *et al.*. Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser[J]. *Langmuir*, 2006, 22(11): 4917-4919.
- 14 M Huang, F Zhao, Y Cheng, *et al.*. Mechanisms of ultrafast laser-induced deep-subwavelength gratings on graphite and diamond[J]. *Phys Rev B*, 2009, 79(12): 125436.
- 15 J E Sipe, J F Young, J S Preston, *et al.*. Laser-induced periodic surface structure, I. Theory[J]. *Phys Rev B*, 1983, 27: 1141 - 1154.
- 16 M Huang, F Zhao, Y Cheng, *et al.*. Origin of laser-induced near-subwavelength ripples: interference between surface plasmons and

- incident laser[J]. ACS Nano, 2009, 3(12): 4062-4070.
- 17 G Miyaji, K Miyazaki, K Zhang, *et al.*. Mechanism of femtosecond-laser-induced periodic nanostructure formation on crystalline silicon surface immersed in water[J]. Opt Express, 2012, 20(14): 14848-14856.
- 18 Luo Zhenzhong. Application and development of molybdenum[J]. China Molybdenum Industry, 2003, 27(2): 7-10.  
罗振中. 钼的应用及其发展[J]. 中国钼业, 2003, 27(2): 7-10.
- 19 Wu Zhou, Sun Yuanjun. Magic metal—molybdenum[J]. China Molybdenum Industry, 2010, 34(2): 1-6.  
武 洲, 孙院军. 神奇的金属——钼[J]. 中国钼业, 2010, 34(2): 1-6.
- 20 A K Sharma, J Smedley, T Tsang, *et al.*. Formation of subwavelength grating on molybdenum mirrors using a femtosecond Ti:sapphire laser system operating at 10 Hz[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(3): 033113.
- 21 A M Bonch-Bruевич, M N Libenson, V S Makin, *et al.*. Surface electromagnetic waves in optics[J]. Opt Eng, 1992, 31(4): 718-730.
- 22 E D Palik. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. New York: Academic Press, 1998.
- 23 K F Palmer, D Williams. Optical properties of water in the near infrared[J]. J Opt Soc Am, 1974, 64(8): 1107-1110.
- 24 Z Lin, L V Zhigilei, V Celli. Electron-phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron-phonon nonequilibrium[J]. Physical Review B, 2008, 77(7): 075133.
- 25 L Xue, J Yang, Y Yang, *et al.*. Creation of periodic subwavelength ripples on tungsten surface by ultra-short laser pulses[J]. Applied Physics A, 2012, 109(2): 357-365.
- 26 Q Gan, Y J Ding, F J Bartoli. “Rainbow” trapping and releasing at telecommunication wavelengths[J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(5): 056801.
- 27 T López-Ríos, D Mendoza, F J García-Vidal, *et al.*. Surface shape resonances in lamellar metallic gratings[J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(3): 665-668.
- 28 J A Porto, F J García-Vidal, J B Pendry. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits[J]. Phys Rev Lett, 1999, 83(14): 2845 - 2848.

栏目编辑: 张 雁