

激光与光电子学进展

s 偏振激光斜入射诱导类“叶脉”状自组织条纹结构(特邀)

耿娇^{1,2}, 严吉^{1,2,3}, 石理平^{1,2*}¹西安电子科技大学杭州研究院, 浙江 杭州 311231;²西安电子科技大学光电工程学院, 陕西 西安 710071;³上海应用技术大学理学院, 上海 201418

摘要 在金属铂和非晶硅构成的复合薄膜上,观察到了在斜入射条件下由 s 偏振激光诱导产生的、具有氧化周期性结构的、远离中轴线且外侧结构倾斜的周期性结构。首先,稳态照射下产生的条纹结构呈叶脉状,既不平行也不垂直于激光偏振方向;其次,动态扫描时产生的结构取向单一且与扫描方向有关;最后,结构周期随着入射角的增大而减小。这几个现象均与通常的激光烧蚀周期性结构不同。这些发现为调控激光诱导自组织提供了更多可能性。

关键词 激光诱导周期性表面结构; 斜入射; 纳米光栅; 金属-半导体复合薄膜

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232621

s-Polarized Laser Oblique Incidence Induces “Leaf Vein-Like” Self-Organizing Stripe Structures (Invited)

Geng Jiao^{1,2}, Yan Ji^{1,2,3}, Shi Liping^{1,2*}¹Hangzhou Institute of Technology, Xidian University, Hangzhou 311231, Zhejiang, China;²School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;³College of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

Abstract On the composite thin-film composed of platinum metal and amorphous silicon, periodic structures with oxidation periodicity induced by s-polarized laser, far from the central axis, and tilted outer structures are observed under oblique incidence conditions. First, the generated stripe structures exhibit a leaf vein-like pattern, neither parallel nor perpendicular to the polarization direction of the laser. Second, the structural orientation generated during dynamic scanning is single and dependent on the scanning direction. Finally, the period of the structure decreases with increasing incident angle. These phenomena differ from typical laser ablation periodic structures. This discovery provides more possibilities for regulating laser-induced self-organization.

Key words laser-induced periodic surface structures; oblique incidence; nano-gratings; metal-semiconductor composite thin-film

1 引言

激光诱导周期性表面结构(Laser-induced periodic surface structures, LIPSS)是一种在激光照射下固体材料表面自发形成的微纳米结构,其形成机制涉及复杂的激光与物质相互作用的过程,包括一系列的线性和非线性光学效应^[1-6],以及入射光与材料表面激发的电磁波发生相互干涉,形成了复杂的电场分布^[7]。干涉

导致激光能量在空间分布上被选择性地吸收,造成局部温度升高,最终驱动材料表面自发形成周期性的条纹结构。

LIPSS 的形成过程具有可调控性,可以调整其激光参数(如入射角度、激光波长、脉冲宽度、照射时间、能量密度、偏振方向、扫描方向、扫描速度等)和材料特性(如光学性质、电声耦合系数、热导率等)。这使得 LIPSS 成为一种具有良好可调性和可重复性的微纳米

收稿日期: 2023-11-05; 修回日期: 2023-11-30; 录用日期: 2023-12-03; 网络首发日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(62105269)

通信作者: *shiliping@xidian.edu.cn

结构加工技术^[8-9]。除上述内容外,LIPSS 还有一些比较明显的特点,比如加工速度快、系统简单、稳定性高、适用性强等^[2, 10-12]。LIPSS 的这些特点使其在基础研究和工程领域,如机械、医学、纳米制造和传感技术等具有许多潜在的应用价值^[13-22]。深入了解 LIPSS 的形成机制,探索多种策略下形成的不同形貌 LIPSS,有助于推动其在不同领域的科学研究和技术应用,为未来的创新性发展奠定基础。

激光诱导周期性表面结构可由激光烧蚀或激光诱导材料表面氧化形成。需要指出的是,氧化诱导自组织是近年来才受到重视的一种新型的自组织现象。得益于多方面的原因,氧化 LIPSS 的制作工艺可以有效提高加工质量;首先,氧化过程所需的能量远低于烧蚀阈值,因此产生的热量残余远低于烧蚀效应;其次,氧化反应是把氧分子注入到材料中形成堆积的氧化物纳米颗粒,不会有大量的烧蚀碎屑喷出,这同时解决了烧蚀 LIPSS 时存在的热量残余和烧蚀碎屑等问题^[8-9]。LIPSS 根据其空间周期(Λ)与激光波长(λ)的关系可分为两大类^[3]:低空间频率 LIPSS (Low-spatial frequency LIPSS, LSFL, $0.5\lambda < \Lambda < \lambda$) 和高空间频率 LIPSS (High-spatial frequency LIPSS, HSFL, $\Lambda < 0.5\lambda$)。其中低空间频率可进一步细分为两个子类,第一子类(LSFL-I)主要出现在高吸收率材料上,其结构周期一般略小于激光波长($\Lambda \approx \lambda$),且周期性结构的取向垂直于激光偏振方向。第二子类低空间频率(LSFL-II)则主要形成在低吸收率材料表面,其结构周期约等于激光波长除以材料的折射率($\Lambda \approx \lambda/n$),同时结构的取向平行于激光偏振方向。这样分类的依据是基于 LIPSS 形成的物理机制,其本质上是由材料的光学吸收特性和表面电磁波的分类决定的。

上述分类虽然是基于激光正入射条件的,但也可以引申到斜入射的情况^[23-24]。通常情况下,表面电磁波干涉模型^[1]可用于解释斜入射条件的 LIPSS。本文研究的是 LSFL-II 类结构,根据入射角度 θ 和固体的介电常数 ϵ , s 偏振激光诱导的结构其周期遵循以下关系^[1]

$$\Lambda_s \approx \frac{\lambda}{\sqrt{\xi^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中: $\xi^2 = |\text{Re}(\epsilon)| / [|\text{Re}(\epsilon)| - 1]$, 对于等离子体活跃的强吸收材料 $\text{Re}(\epsilon) \ll -1$, 上述方程可以简化为

$$\Lambda_s \approx \frac{\lambda}{\cos \theta}. \quad (2)$$

由式(2)可知,对于 s 偏振光,正常情况下,由表面等离子体效应诱导的结构的周期随入射角度的增大而增大。但不管是稳态照射还是移动光束或样品,其取向均垂直于激光偏振方向^[19]。

本研究报道了一种在 s 偏振斜入射下可形成远离中轴线且外侧条纹倾斜的氧化自组织周期结构,主要体现在三个方面。第一,当斜入射的 s 偏振光照射到

由金属铂和非晶硅构成的复合薄膜结构上时,形成了一种独特的氧化自组织条纹,呈现类似“叶脉”的形态,不同于正入射 LIPSS 的排列方式,其排列方向既不垂直于入射光的偏振方向,也不平行于光的偏振方向。第二,沿着偏振方向扫描样品,获得了一个高度规则的一维纳米光栅阵列,但其取向与激光偏振方向存在一定夹角,且与扫描方向相关。第三,随着入射角的增大,周期性纳米结构的周期呈现出减小的趋势,难以用式(1)、(2)进行描述。实验结果表明通过调整入射光的角度和扫描方向,可以有效控制纳米光栅的取向、倾斜角度以及周期,为优化 LIPSS 制备工艺和实现更加灵活的纳米结构调控提供了新的方向。

2 实验设备

实验示意图如图 1 所示,其中扫描方向为激光偏振方向 y 或者 $-y$ 。 k_{in} 为入射光在薄膜表面的矢量分量; k_{spp} 为表面等离子体共振波矢量; k_G 为光栅耦合表面电磁波矢量。在本研究中,使用了一台国产皮秒激光器,其脉冲重复频率为 100 kHz,脉宽为 10 ps,中心波长为 1064 nm。使激光束经过一个焦距 $f=200$ mm 的透镜聚焦样品,样品安装在倾斜台和三维位移台上,前者可以控制入射光与样品之间的夹角 θ 。本文主要研究 s 偏振激光,入射角从 0° 到 80° 作用到样品上的不同情况。实验选用了一种由金属铂和非晶硅组成的易氧化复合薄膜作为样品。利用磁控溅射系统在室温下依次将 100 nm 厚的铂和 50 nm 厚的非晶硅沉积到单晶硅衬底上,从而形成金属-半导体复合薄膜,并利用轮廓仪和椭偏仪精确测量所获得的复合薄膜的厚度和介电常数。

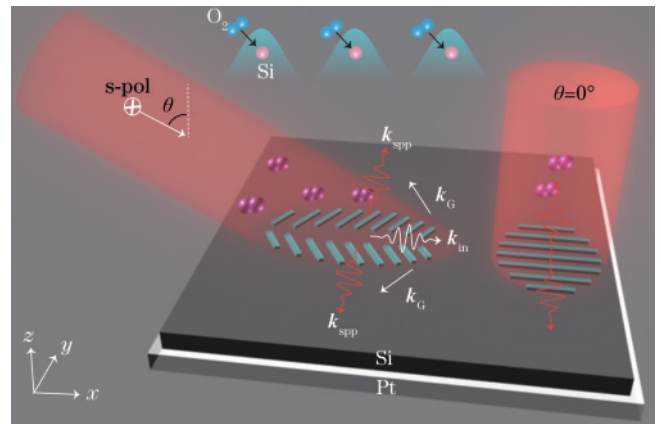


图 1 利用皮秒激光以入射角 θ 斜入射到样品表面诱导产生氧化 LIPSS 的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of induction of oxidized LIPSS by picosecond laser at an oblique incidence angle θ on sample surface

值得注意的是,为了避免样品表面因烧蚀 LIPSS 而产生的干扰,将激光能量精确地降低到产生激光诱导氧化 LIPSS 阈值附近,激光能量密度在焦点处约为

10 mJ/cm², 远低于硅材料的多脉冲烧蚀阈值(约为 200 mJ/cm²)。近些年来,人们在 Ti、Cr、W 等金属薄膜上均观察到了氧化 LIPSS 现象^[13]。相对于通常情况下激光诱导烧蚀自组织结构的减材方式,LIPSS 是在激光的诱导下发生氧化反应,通过将空气中的氧分子吸收到材料表面形成氧化物颗粒,这个过程不会有因烧蚀而减材掉的颗粒物的喷出,从而保持了材料表面的干净,降低了表面缺陷对表面波传播的影响。特别是对于所制备的复合薄膜而言,下层低损耗金属可以产生长程表面等离子元传输,大大提升了加工效率。

2 实验结果与分析

2.1 稳态照射

图 2 展示了在 s 偏振态下,入射角从 0°到 80°时激

光稳态照射于样品表面时的结果,其中 E_0 表示实际入射光的电场方向,也是激光偏振方向。可以发现激光斜入射时产生的周期性条纹结构完全不同于正入射时产生的规则、单一周期和单一取向的结构,它呈现出类似于叶脉状的结构,沿着电场方向两端的条纹会以一定的角度呈对称性倾斜,且条纹倾斜角度随着斜入射角度 θ 的增大而增大。垂直于电场方向的两端也分别呈现出不同的形态。这与以往的研究结果不同,过去人们只关注到了当入射光为 p 偏振时,在斜入射的情况下,产生的 LIPSS 的周期会变大(背向)或者变小(前向),光栅的取向则垂直于激光偏振方向。而这里侧重于入射光为 s 偏振的斜入射研究,发现形成了一种具有远离中轴线且外侧条纹倾斜的周期性纳米结构,呈现类“叶脉”的形态。

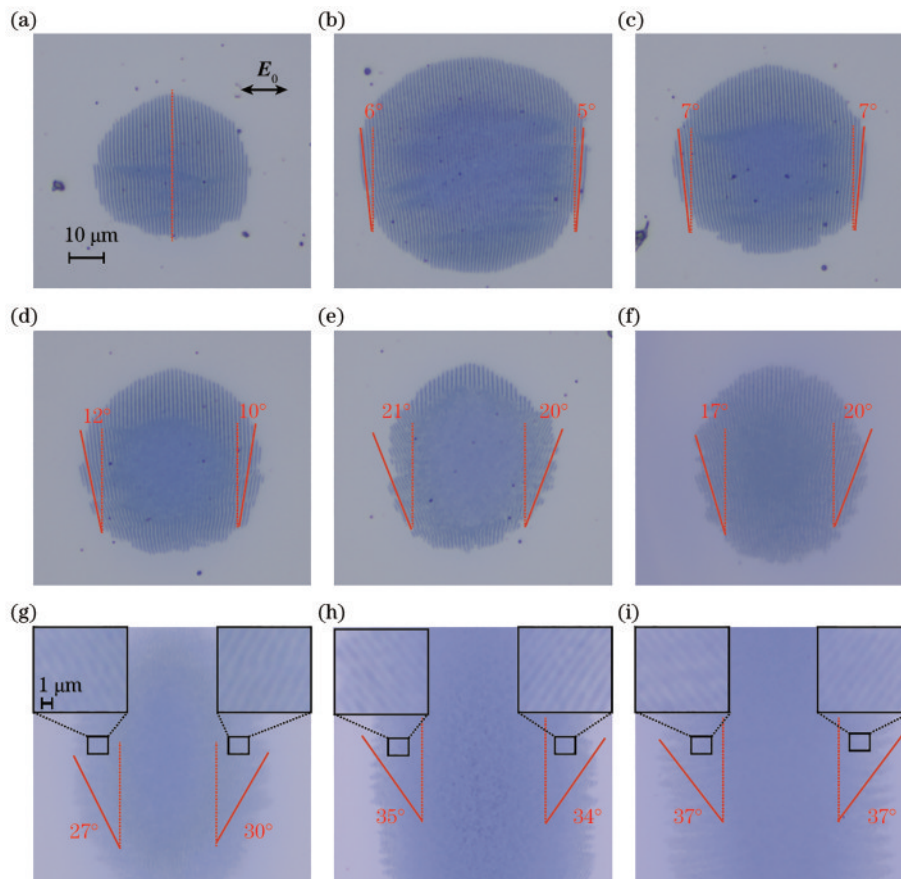


图 2 激光入射角 θ (从 0°到 80°)的情况下,激光稳态照射样品表面形成的氧化 LIPSS 结构光镜图。(a)0°;(b)10°;(c)20°;(d)30°;(e)40°;(f)50°;(g)60°;(h)70°;(i)80°

Fig. 2 Optical microscope images of oxidative LIPSS obtained by steady-state laser irradiation at incident angles θ from 0° to 80° states. (a) 0°; (b) 10°; (c) 20°; (d) 30°; (e) 40°; (f) 50°; (g) 60°; (h) 70°; (i) 80°

2.2 动态扫描

在利用 LIPSS 技术进行材料表面纳米结构制备的过程中,通常需要对样品或光斑进行扫描以获得大面积的周期性结构。在本实验中,当对样品沿偏振方向($\pm y$)进行扫描时,会形成如图 3 所示的单一周期和单一取向的高度规则条纹,且结构取向与扫描方向有关。

在不同斜入射角度下,通过分别沿 y 方向和 $-y$

方向对样品进行扫描,获得了不同光栅取向的氧化纳米光栅结构,如图 3 所示。当沿着 y 方向进行扫描时,所形成光栅向左倾斜;当沿着 $-y$ 方向扫描时,所形成光栅则均向右倾斜。这里,扫描速度 $v=100 \mu\text{m/s}$,能量密度约为 10 mJ/cm^2 。例如,当入射角为 80°时,沿着激光偏振方向 y 方向扫描得到的周期性纳米结构方向与偏振方向成 38°夹角。然而,沿着 $-y$ 方向扫描时,得

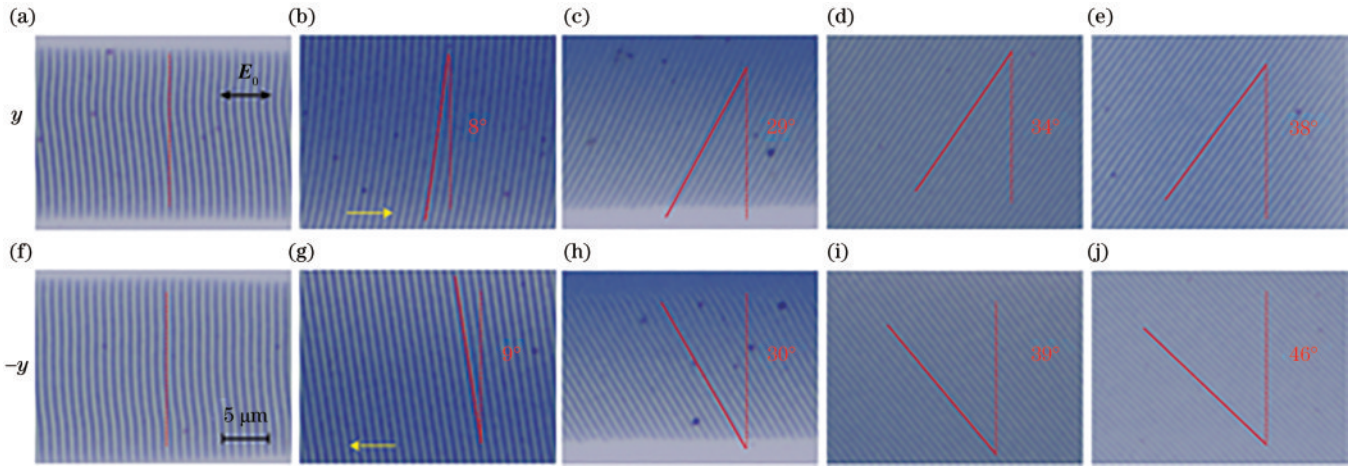


图3 激光以不同的入射角度 θ (从 0° 到 80°)作用在样品表面,并分别沿着 y 和 $-y$ 方向进行扫描(箭头方向),形成的规则氧化LIPSS结构的光镜图。(a)(f) 0° ; (b)(g) 20° ; (c)(h) 40° ; (d)(i) 60° ; (e)(j) 80°

Fig. 3 Optical microscope images of regular oxidized LIPSS obtained by scanning laser along y and $-y$ directions respectively at incident angles θ from 0° to 80° . (a) (f) 0° ; (b) (g) 20° ; (c) (h) 40° ; (d) (i) 60° ; (e) (j) 80°

到的周期性纳米光栅与偏振方向成 -46° 夹角。而当入射角为 0° 时,即如图3(a)、(f)所示,得到的周期性纳米光栅结构与样品扫描方向无关,没有取向差异。此外,当入射角度较大时,激光诱导的周期性纳米结构呈现出更规则、更有序的倾斜光栅。需要指出的是,虽然这里仅展示了下层金属为铂、上层半导体为非晶硅的复合薄膜的情况,但是假如将下层金属换成如Ag、Au等低损耗金属时,也可以观察到一样的现象。

经过测量在不同入射角下动态扫描后得到的一维光栅的周期,发现在同样的入射角下,沿着 y 方向与 $-y$ 方向得到的光栅周期大小几乎相等,但是氧化光栅的周期大小随着入射角 θ 的增大而减小,如图4所示。在 $\theta=80^\circ$ 时,光栅周期减小到 800 nm 左右。由式(2)可知,以往正常的表面等离激元诱导自组织结构,在s偏振态激发下,其周期会随入射角增大而增大。因此,在s偏振斜入射下结构周期随角度增大而减小这一实验结果并不符合经典公式,但目前尚未找到合适的公式来拟合此实验结果。

2.3 数值模拟

当前LIPSS领域的研究尚处于发展阶段,虽然已经提出了一些与其形成机制相关的可能理论,但这些不足以解释多种复杂的LIPSS机理。电磁场数值模拟是深入探索LIPSS形成机制和影响因素的重要工具。因此为了进一步理解本文报道的激光斜入射LIPSS“叶脉”状结构条纹背后的原因,本文使用数值方法(Lumerical FDTD solutions)对硅膜表面的电场分布进行了分析,结果如图5(a)所示。仿真中为了模拟实验中真实的情况,构建了一个类似的体系,即在硅衬底上先覆盖一层 100 nm 厚的铂薄膜,再覆盖一层 50 nm 厚的非晶硅薄膜,随后将一个直径为 300 nm 的二氧化硅纳米球嵌入在非晶硅膜内,但不嵌入下层金属层,以此作为散射源来模拟该颗粒周围的电磁场

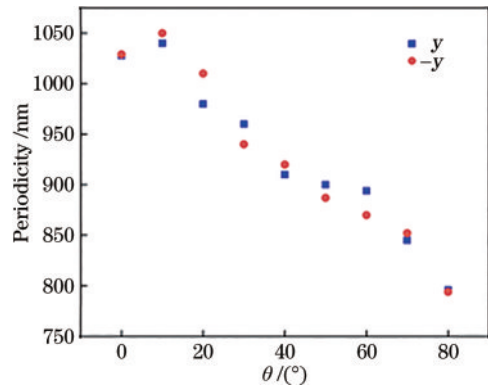


图4 实验上分别沿着 y 和 $-y$ 方向进行扫描时,实验测得的规则氧化LIPSS结构的周期 Λ_s 与入射角 θ 的关系图

Fig. 4 A graph depicting the relationship between periodicity Λ_s and incident angle θ of regular oxidized LIPSS structures, formed by scanning along y and $-y$ directions

分布。这是因为样品的上层非晶硅在激光作用下极易发生氧化反应,并在薄膜缺陷处会先形成氧化物颗粒,随后在激光的持续作用下该颗粒会作为种子结构以诱导逐渐生成周期性结构。设置激光为s偏振,以入射角 80° 斜入射并作用到样品表面。更多关于数值仿真参数请参考文献[18]。

图5(a)展示的是在光束正入射情况下氧化硅纳米颗粒附近由于入射光与激发的表面等离激元相互作用后形成的干涉条纹,其周期约为 880 nm ,且取向垂直于光源偏振方向(E_0)。当光束入射角 $\theta=80^\circ$ 时,从图5(b)中的仿真结果中可以看出,散射源二氧化硅颗粒周围的电磁场分布上下对称,呈现出具有规律的远场干涉条纹,其中 E 是入射光与表面电磁波发生干涉后的电场方向。电场近场增强区域以一定的角度分布在散射源两端。此时,干涉条纹的取向与 x 轴方向夹角约为 43° ,与实验室观察到的条纹倾斜角接近,而周

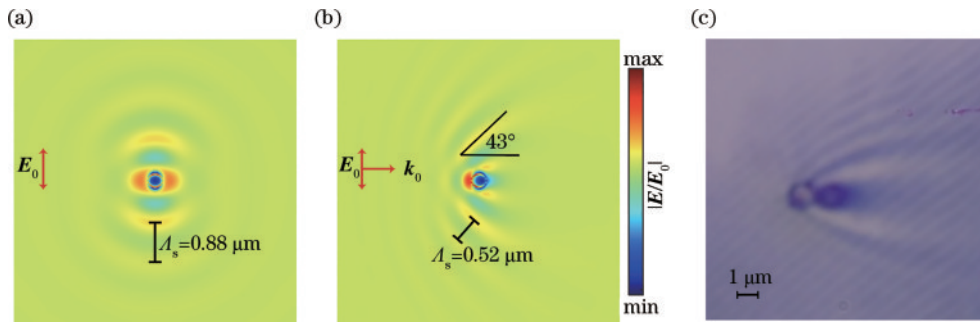


图5 基于FDTD方法数值模拟激光(a) $\theta=0^\circ$ 正入射情况和(b) $\theta=80^\circ$ 斜入射下,铂硅复合薄膜中嵌入二氧化硅纳米颗粒后的硅膜表面电场分布;(c)在 $\theta=80^\circ$ 斜入射条件下,散射颗粒周围的电场情况

Fig. 5 FDTD-based numerical simulation of electric field distribution at silicon film interface when embedding a silica nanoparticles into Pt/Si composite thin-film under laser incidence at (a) $\theta=0^\circ$, and (b) $\theta=80^\circ$; (c) electric field around a scattering particle under $\theta=80^\circ$ inclined incidence conditions

期则相对于正入射时有了明显的减小。需要指出的是,数值模拟显示在 80° 入射角下的干涉条纹周期是520 nm,而实验上测到的周期约为800 nm。造成这个差异的原因可能是数值模拟只考虑了材料本征的介电常数,而实验中在飞秒激光照射下还存在双光子吸收等非线性过程。从数值模拟结果中可以看出,当光束斜入射时,纳米结构将会沿着倾斜的干涉条纹方向生长。图5(c)是在实验中,以 80° 角入射对样品进行大面积扫描的过程中得到的一个结果。该散射源是样品上的一个随机缺陷,可以发现以该缺陷为散射源得到的电场分布与图5(a)中的数值模拟结果一致。

结合数值模拟和实验结果,本文给出一个猜测来解释为什么在s偏振斜入射下周期性结构会与激光偏振有一个夹角,如图1中所示。入射光在薄膜表面存在一个动量分量 k_{in} ,该分量与表面等离激元的动量 k_{sp} 方向不平行。因此,为了满足等离激元激发的动量守恒条件 $k_{in}+k_G=k_{sp}$,产生的纳米光栅动量 k_G 将不再沿着偏振方向。另外一个问题是,以往烧蚀产生的LIPSS为什么在s偏振斜入射下观察不到倾斜条纹呢?可能的原因是烧蚀LIPSS形成速度很快,来自表面多个散射源的同时干涉。而氧化LIPSS由于形成速度非常慢,一般只来自竞争过程产生的单一种子源,从而在逐渐生长的过程中形成了倾斜的条纹。进一步,就容易理解为什么条纹取向与扫描方向有关。因为当沿着y方向进行扫描时,形成的条纹结构来自于散射源上方的种子结构,而当沿着-y方向进行扫描时,形成的条纹结构则来自于散射源下方的种子结构。

3 结 论

在金属-半导体两层复合薄膜表面利用LIPSS原理,通过单束皮秒激光在s偏振斜入射的情况下获得了周期性纳米光栅。研究发现所产生的光栅既不垂直也不平行于激光偏振方向,呈叶脉状,且两侧对称,其纹理条纹的倾斜角度与入射角有关。另外还发现,当沿着偏振方向对产生的叶脉状自组织结构进行扫描

时,干涉条纹取向与扫描方向有关。当扫描方向由左往右时,以叶脉状结构右边的纹理取向为准,会产生取向单一的纳米光栅结构;反之,当扫描方向由右往左时,取向以叶脉状结构左边的纹理为准,同样形成取向单一的纳米光栅结构;更为有趣的是,研究中观察到随着激光斜入射入射角的增大,形成的纳米光栅的周期随之减小。当入射角由 0° 增加到 80° 时,激光诱导氧化自组织纳米光栅周期由 $1\ \mu\text{m}$ 逐渐减小到800 nm左右。另外,结合数值模拟和实验结果,猜测为了满足等离激元激发的动量守恒条件,因此产生的纳米光栅动量将不再沿着偏振方向而呈现出倾斜状。

虽然,目前尚不能对上述产生的激光斜入射LIPSS“叶脉”状结构在理论上进行较好的解释,但这项研究为进一步提高LIPSS加工可控性和加工多样性提供了新的思路,这项研究的结果有望为激光诱导表面自组织周期性结构的理解提供新的见解,也为激光加工和材料表面处理领域的进一步研究提供了启示。

参 考 文 献

- [1] Bonse J, Gräf S. Maxwell meets Marangoni: a review of theories on laser-induced periodic surface structures[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(10): 2000215.
- [2] Geng J, Yan W, Shi L P, et al. Surface plasmons interference nanogratings: wafer-scale laser direct structuring in seconds[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 189.
- [3] Wang L, Chen Q D, Cao X W, et al. Plasmonic nano-printing: large-area nanoscale energy deposition for efficient surface texturing[J]. Light, Science & Applications, 2017, 6(12): e17112.
- [4] 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.
- [5] Bonse J, Baudach S, Krüger J, et al. Femtosecond laser ablation of silicon-modification thresholds and morphology [J]. Applied Physics A, 2002, 74(1): 19-25.

- [6] 姜玺阳, 王飞飞, 周伟, 等. 飞秒激光与材料相互作用中的超快动力学[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2200001. Jiang X Y, Wang F F, Zhou W, et al. Ultrafast dynamics of femtosecond laser interaction with materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2200001.
- [7] Geng J, Yan W, Shi L P, et al. Quasicylindrical waves for ordered nanostructuring[J]. Nano Letters, 2022, 22(23): 9658-9663.
- [8] Öktem B, Pavlov I, Ilday S, et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses[J]. Nature Photonics, 2013, 7: 897-901.
- [9] 石理平, 耿娇, 仇旻. 扫描方向对金属和硅复合薄膜表面激光诱导自组织加工质量的影响(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(7): 0752303. Shi L P, Geng J, Qiu M. Influence of scanning direction on the quality of LIPSS on metal-Si hybrid films(invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7): 0752303.
- [10] Zhang Y C, Jiang Q L, Long M Q, et al. Femtosecond laser-induced periodic structures: mechanisms, techniques, and applications[J]. Opto-Electronic Science, 2022, 1(6): 220005.
- [11] Gnilitzki 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: 8485.
- [12] Lin Z Y, Hong M H. Femtosecond laser precision engineering: from micron, submicron, to nanoscale[J]. Ultrafast Science, 2021, 2021: 9783514.
- [13] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. Light, Science & Applications, 2016, 5(8): e16133.
- [14] Zhang Y C, Jiang Q L, Cao K Q, et al. Extremely regular periodic surface structures in a large area efficiently induced on silicon by temporally shaped femtosecond laser [J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 839-847.
- [15] Osellame R, Hoekstra H J W M, Cerullo G, et al. Femtosecond laser microstructuring: an enabling tool for optofluidic lab-on-chips[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(3): 442-463.
- [16] Liu H G, Lin W X, Hong M H. Hybrid laser precision engineering of transparent hard materials: challenges, solutions and applications[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 162.
- [17] Geng J, Xu L Y, Yan W, et al. High-speed laser writing of structural colors for full-color inkless printing[J]. Nature Communications, 2023, 14: 565.
- [18] Geng J, Shi L P, Liu J K, et al. Laser-induced deep-subwavelength periodic nanostructures with large-scale uniformity[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(2): 021104.
- [19] Geng J, Fang X G, Zhang L, et al. Controllable generation of large-scale highly regular gratings on Si films[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 273.
- [20] Geng J, Shi L P, Sun X Y, et al. Artificial seeds-regulated femtosecond laser plasmonic nanopatterning[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(11): 2200232.
- [21] 肖蒲庐, 陈观华, 陈宇, 等. 飞秒激光织构钛合金表面形貌及润湿性研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602208. Xiao P L, Chen G H, Chen Y, et al. Morphology and wettability of titanium alloy surface textured by femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602208.
- [22] 谢辰, 孙世贤, 贾而穉, 等. 基于动态多焦点双光子聚合的微螺旋结构制备 [J]. 中国激光, 2023, 50(24): 2402402. Xie C, Sun S X, Jia E S, et al. Fabrication of micro-helix structures via two-photon polymerization based on dynamic multi-focus holograms[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(24): 2402402.
- [23] Porta-Velilla L, Martínez E, Frechilla A, et al. Grain orientation, angle of incidence, and beam polarization effects on ultraviolet 300 ps-laser-induced nanostructures on 316L stainless steel[J/OL]. Laser & Photonics Reviews: 1-21[2023-09-05]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/lpor.202300589>.
- [24] Zhang H, Colombier J P, Witte S. Laser-induced periodic surface structures: arbitrary angles of incidence and polarization states[J]. Physical Review B, 2020, 101(24): 245430.