

·封面文章·

# 基于激光干涉烧蚀的硅表面微纳结构制备研究

王子涵, 王宝续<sup>1</sup>, 釜野勝<sup>2</sup>, 徐微微<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>吉林大学电子科学与工程学院集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012;

<sup>2</sup>阿南工业高等专门学校, 日本 阿南 7740017

**摘要** 基于纳秒激光双光束干涉烧蚀技术, 辅助利用湿法腐蚀技术, 并结合时域有限差分法, 从实验和理论上分析了硅表面不同周期微纳结构的制备和形成机制。结果表明: 波长为 355 nm 的纳秒激光, 可在硅表面干涉烧蚀出 600 nm 以上周期的微纳结构; 结构深度随功率或曝光时间的增加而加深, 最大深度可达到激光的趋肤深度约 50 nm; 结构周期在曝光时间大于 5 s 时发生劈裂减半, 最小可以得到 300 nm 的周期; 通过时域有限差分(FDTD)的理论模拟发现, 已形成结构对干涉光场的调制是结构劈裂的最主要原因。这些研究将在表面周期性微纳结构的制备、无掩模快速加工设备的研制、以及激光与物质的相互作用等方面有很大的应用前景。

**关键词** 超快光学; 干涉烧蚀; 纳秒激光; 周期性微纳结构; 周期劈裂

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.163201

## Fabrication of Silicon Micro/Nanostructures Based on Laser Interference Ablation

Wang Zihan<sup>1</sup>, Wang Baoxu<sup>1</sup>, Kamano Masaru<sup>2</sup>, Xu Weiwei<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

<sup>2</sup> National Institute of Technology, Anan College, Anan, 7740017, Japan

**Abstract** Based on nanosecond laser two-beam interference ablation assisted with wet-etching method and finite difference time domain (FDTD) simulation, the formation of structures on silicon is studied experimentally and theoretically. The results show that it is possible for the fabrication of structures with period more than 600 nm by a nanosecond laser with wavelength of 355 nm. The structure depth becomes deeper with the increasing of power or exposure time. The maximum depth is equal to the skin depth of laser, about 50 nm. Further, the period splits into half when the exposure time is more than 5 s, which brings a method to obtain a minimum period of 300 nm. The FDTD simulation confirms that the modulation of formed structures to the interference field is the reason for period splitting. The research shows great potential applications for the fabrication of periodic micro/nanostructures, design of maskless processing facilities, and laser-matter interactions.

**Key words** ultrafast optics; interference ablation; nanosecond laser; periodic micro/nanostructures; period splitting

**OCIS codes** 320.4240; 140.7090; 320.7130

## 1 引言

表面周期性微纳结构在抗反射、超疏水、自清洁等表面结构改性方面有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。目前制备微纳结构的方法有很多, 如自组装技术、光刻技术、纳米压印技术、电子束刻蚀技术等<sup>[5-9]</sup>。这些技术的制备过程主要分为两步: 1) 通过光刻

技术、自组装技术、电子束刻蚀技术等, 在光敏材料如光刻胶表面制备微纳结构的牺牲层, 形成掩模板; 2) 利用湿法或干法腐蚀技术, 通过控制刻蚀条件将微纳结构形貌转移到衬底表面。这些技术虽然在一些材料表面的微纳结构制备中取得了很大成果, 但通常都需要制备一次性的掩模板, 精细刻蚀过程中对真空度的要求很高, 对于不同的材

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-27

\* E-mail: xu0611318weiwei@163.com

料来说要选择不同的刻蚀材料。激光干涉烧蚀是一种基于激光干涉形成自发调制图案化光场<sup>[10-14]</sup>并结合高功率激光烧蚀<sup>[15-16]</sup>制备表面微纳结构的方法。它可以直接在空气环境中无接触、无掩模、一步直接烧蚀出周期和形貌可控的微纳结构,实现对现有技术的重要补充。基于这些优势,该技术受到了广泛关注,目前已在硫化锌等半宽禁带材料、石墨烯等薄膜材料表面成功制备出周期性微米结构阵列,实现了红外增透和超疏水等功能<sup>[11-14,17-18]</sup>,但受限于激光烧蚀的热扩散区域大、激光表面烧蚀微爆炸形成表面光栅的过程太剧烈等问题,利用激光干涉烧蚀制备亚微米结构的研究还比较少。硅作为一种重要的半导体材料,硅基的微纳结构器件制备一直是能源器件的研究热点<sup>[19]</sup>。虽然硅在常用的激光波长如 355 nm、266 nm 的吸收很高,但到目前为止,由于其高作用阈值和高表面反射,利用纳秒激光干涉烧蚀制备硅基微纳结构的报道还很少。

为探索硅表面激光干涉烧蚀微纳光栅的制备研究,加深对激光干涉烧蚀与材料相互作用过程中热烧蚀、结构反馈等物理过程的理解,扩大激光干涉烧蚀的应用领域,本文利用高功率纳秒激光干涉烧蚀技术,研究了硅表面周期性微纳结构的制备和演变规律,讨论分析了激光能量密度、曝光时间、结构周期对结构成型、结构周期劈裂和结构深度的影响,并基于时域有限差分法(FDTD)模拟计算了干涉光场在自由空间、硅表面、结构表面的分布,验证了基于光反馈机制的结构形状的演变过程,分析了激光干涉烧蚀的适用条件并展望其应用可行性。

## 2 实验部分

### 2.1 纳秒激光干涉烧蚀流程

图 1 展示了激光干涉烧蚀制备硅表面微纳结构的流程。采用 Nd:YAG 纳秒激光作为光源,光源参数如下:波长 355 nm、脉冲宽度 10 ns、重复频率 10 Hz、功率连续可调 0~1100 mW,光斑直径 8 mm。实验中通过分束镜将激光均匀分成两束,并使两束光以与样品表面法线相同夹角  $\theta$ 、重叠照射到样品表面形成激光干涉烧蚀。如图 1(a)所示,两束光由于具有稳定的相位差将会在重叠区域产生稳定的干涉效应,从而产生明暗相间的空间光强分布。实验中利用功率控制器和光开关来精确控制激光的功率和曝光时间,功率控制精度小于 50 mW,曝光

时间控制精度小于 10 ms。在激光作用之前,<100>晶相的硅分别用丙酮、乙醇、去离子水利用超声处理 15 min;在激光作用之后,为去除纳秒干涉产生的氧化,利用超声和 HF 酸(5 mol/L,1 min)腐蚀,将氧化层和干涉烧蚀产生的溅射物去除,得到如图 1(c)所示的结构类型。

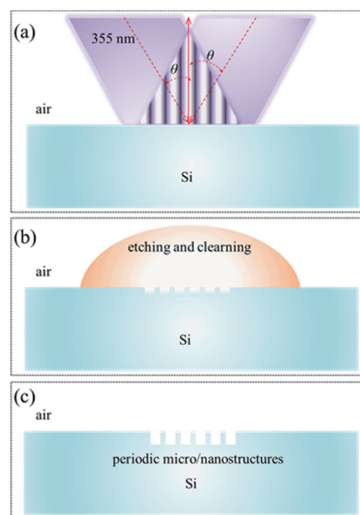


图 1 硅表面激光干涉烧蚀原理图。(a)双光束干涉烧蚀;(b)HF 酸腐蚀;(c)最终样品

Fig. 1 Mechanism of laser interference ablation on Si.

(a) Two-beam interference ablation; (b) HF etching process; (c) final sample

### 2.2 激光干涉烧蚀的原理

纳秒激光的干涉与普通激光的干涉基本相同,但由于纳秒激光脉冲宽度(10 ns)及空间相干长度的限制,在光路设计时应调节两束光之间的光程差,尽量使两光束同时到达样品表面,从而保持干涉时的高衬度。为简单起见,第一束的空间相位设为 0,考虑到两束光均为线偏振光,如图 2(a)所示,图中 X、Y 表示空间坐标轴,设  $E_0$  为两束光的电场矢量振幅,两束光的电场  $E_1$  和  $E_2$  可以表示为

$$\begin{cases} E_1 = E_{x_1} \exp(-i\omega t) \\ E_2 = E_{x_2} \exp\{-i[\omega t - \delta(x, y)]\} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\omega$  为激光频率; $t$  为时间; $E_{x_2}$ 、 $E_{x_1}$  分别为两束光在样品所在的 XY 平面内的电场分量,分别为  $E_{x_j} = (-1)^{j-1} E_0 \cos \theta$ ,  $\theta$  为入射光与法线的夹角; $\delta(x, y)$  为两束光在样品任意位置坐标  $(x, y)$  的相位差,即  $\delta(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} x \sin \theta$ ;  $\lambda$  为激光波长。当两束光相互干涉时,光强空间分布公式为

$$I = I_0 R_p \cos^2 \theta [2 - 2 \cos \delta(x, y)] / 2, \quad (2)$$

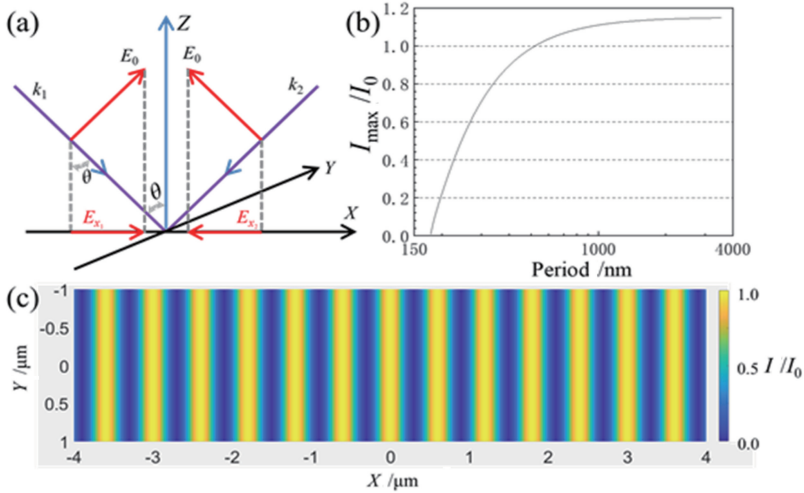


图 2 硅表面的纳秒激光干涉分析。(a)纳秒激光干涉示意图;(b)最大光强随干涉周期的变化;(c)双光束干涉的表面光强分布

Fig. 2 Analysis on nanosecond laser interference on Si. (a) Schematic of nanosecond laser interference; (b) maximum light intensity as a function of period change; (c) surface light intensity distribution of two-beam interference

式中:分束之前的总光强  $I_0 = 2E_0^2$ , 则表面反射率公式为

$$R_p = \frac{(n \cos \theta_t - n_{Si} \cos \theta)^2 + k_{Si}^2}{(n \cos \theta_t + n_{Si} \cos \theta)^2 + k_{Si}^2}, \quad (3)$$

$$\Lambda = \lambda / 2 \sin \theta, \quad (4)$$

其中  $n$  为空气的折射率 1,  $\Lambda$  为周期,  $\lambda$  为激光器的波长 (355 nm),  $n_{Si} + ik_{Si}$  表示硅在 355 nm 的折射率  $5.6795 + 2.9905i$  ( $n_{Si}$  为 5.6795,  $k_{Si}$  为 2.9905),  $\theta_t$  为折射角, 可由入射角及折射率的关系得知,  $\theta_t = \arcsin(\sin \theta / n_{Si})$ 。

依据(2)~(4)式可以得到如图 2 所示的最大光强随周期的分布及光强随位置的分布, 如图 2 (b)、(c)所示。实验中可以通过调控两束光的夹角  $\theta$ , 来实现对表面结构周期连续可调, 考虑到激光波长为 355 nm, 一般可以调控的周期范围为 180 nm 到几微米以上<sup>[12]</sup>。若样品表面的光强大于材料的烧蚀阈值, 将会在样品表面产生材料的热融化和升华, 烧蚀剥离出与周期性光场分布一致的微纳结构, 如图 2(c)所示。通常来说, 理想情况下的双光束干涉峰值强度为单光束光强的 4 倍, 即分束前总光强的 2 倍, 但考虑到激光偏振、表面反射与入射角的依赖关系, 特别是硅表面存在高反射率 (50%~60%), 当周期小于 600 nm 时, 由于增大入射角所引起的干涉光场峰值达不到烧蚀作用阈值而使表面结构无法被烧蚀, 如图 2 (b)所示。以硅为例, 实验中单束光作用下的烧蚀阈值约为 500 mW, 由图 2(b)可知, 考虑到光在到达样品表面的最大总功率约为 1000 mW 的情况

下, 很难制备出周期小于 250 nm 的结构。

### 3 激光干涉烧蚀表面周期性微纳结构

激光干涉烧蚀是一个减式加工的方式, 与普通的激光干涉交联的加式加工有共同点, 特别是在高表面反射情况下有如下不同特征:

1) 脉冲激光能量和曝光时间的影响。与连续激光在光刻胶的交联反应类似, 脉冲激光的能量和曝光时间都会对结构形貌产生影响。

2) 结构反馈光场的变化。如前文所述, 随周期不同, 硅表面的反射在 50%~60% 范围内, 在如此高表面反射的情况下, 实时形成的周期结构会对光场产生衍射效应, 对结构表面的干涉激光光场产生负反馈, 造成后续脉冲的光场重新分布, 从而影响后续结构的产生和形貌演变。

3) 其他的非线性现象带来的影响。在表面产生烧蚀、变得粗糙的情况下, 表面散射与入射激光的作用明显, 会发生如激光诱导微纳米结构等一些现象<sup>[16,20]</sup>。

#### 3.1 曝光时间对于微纳结构的影响

激光烧蚀是一个表面材料随曝光时间增加而逐渐去除的过程<sup>[15-16,20]</sup>。首先调控双光束干涉中两束光与平面法线的夹角分别为  $6.4^\circ$ , 即干涉周期为  $1.6 \mu\text{m}$ , 图 3 展示了激光干涉烧蚀制备的周期性微纳结构形貌随曝光时间的变化。如图 3(a)所示, 当曝光时间为 0.5 s 时, 周期性的微纳结构开始产生, 烧蚀产生的空气槽约占整个周期的 10%; 如图 3(b)所示, 当曝光时间增加到 1 s 时, 这一数值扩大到



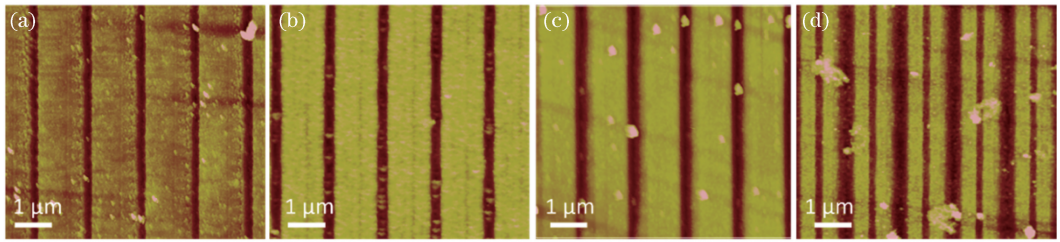


图3 激光干涉中不同曝光时间对周期性微纳结构形貌的影响。(a)曝光时间 0.5 s 的原子力显微镜(AFM)图像;(b)曝光时间 1 s 的原子力显微镜图像;(c)曝光时间 10 s 的原子力显微镜图像;(d)曝光时间 20 s 的原子力显微镜图像

Fig. 3 Effect of exposure time of laser interference on morphology of periodic micro/nanostructure. (a) Atomic force microscopy (AFM) images at exposure time of 0.5 s; (b) AFM images at exposure time of 1s; (c) AFM images at exposure time of 10 s; (d) AFM images at exposure time of 20 s

15%左右,同时结构的深度逐渐增加,结构的边缘的上端开始变得平滑;如图 3(c)所示,当曝光时间为 10 s 时,这一边缘平滑的现象尤其变得明显;如图 3(d)所示,当曝光时间增加到 20 s 时,结构的周期开始发生劈裂,由原来的  $1.6 \mu\text{m}$  变成  $0.7 \mu\text{m}$  和  $0.9 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 周期对于微纳结构影响

再次改变两束光的夹角为  $10.2^\circ$ ,得到结构的周期为  $1.1 \mu\text{m}$ ,控制激光的功率为 700 mW,当曝光的时间为 1 s,腐蚀时间为 1 min 时,可以得到图 4(a)所示的结构;当曝光时间为 5 s 时,可以观察到局部

某些光栅已经开始发生劈裂,结构的周期减半,如图 4(b)所示;而当曝光时间为 10 s 时,一个周期劈裂成三个周期,如图 4(c)、(d)所示;控制两束光的夹角为  $17.2^\circ$ ,曝光时间为 1 s,得到周期为 600 nm 的光栅结构,如图 4(e)所示;当曝光时间为 5 s 时,结构发生劈裂,周期为 300 nm,如图 4(f)所示。理论上可以将两束光的夹角控制在  $36.3^\circ$ ,实现周期为 300 nm 的光栅制备,如图 4(g)所示,为实验上获得的周期为 300 nm 的光栅。如图 4(h)所示,通过与未干涉的单束光辐照的结构表面进行对比,干涉烧蚀呈现出周期性比较好的分布。

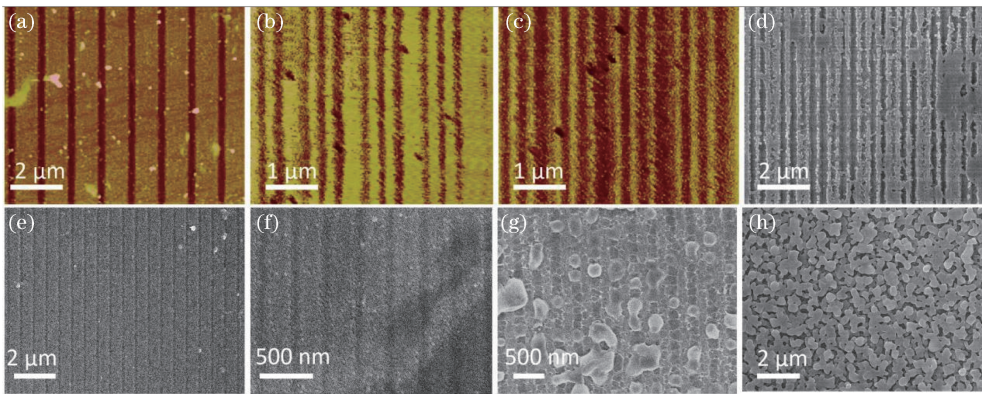


图4 不同周期对于结构演变的影响。(a)-(c)当结构周期为  $1.1 \mu\text{m}$  时,曝光时间 1 s, 5 s, 10 s 的 AFM 图像;(d)图 4(c)的 SEM 图像;(e)-(f) 当结构周期为  $0.6 \mu\text{m}$  时,曝光时间 1 s, 5 s 的 SEM 图像;(g)结构周期为 300 nm 的 SEM 图像;(h)单束光辐照后的 SEM 图像

Fig. 4 Effect of period on structural evolution. (a)-(c) AFM images at exposure time of 1 s, 5 s, and 10 s when period is  $1.1 \mu\text{m}$ ; (d) SEM image of Fig. 4(c); (e)-(f) SEM images at exposure time of 1 s and 5 s when period is  $0.6 \mu\text{m}$ ; (g) SEM image when period is 300 nm; (h) SEM image of structure ablated by only one beam

### 3.3 微纳结构深度的演变

将不同曝光时间、不同的功率烧蚀的光栅结构进行对比。当曝光时间为 0.5 s 时,结构深度虽然很浅,但会随着脉冲数的积累而逐渐增加,在 1 s 时超过了 20 nm,在 5 s 时接近饱和值 50 nm,之后结构深度随

着脉冲数的增加始终维持不变。相似的是,当利用接近激光作用阈值的功率为 500 mW 时,激光表面只有 2 nm 左右能被烧蚀掉,之后随着激光功率的增加,在 1 s 内烧蚀深度迅速增加到饱和。结构的深度与纳秒激光的趋肤深度有很大关系,可表示为

$$\delta = c/2\omega k_{si}, \quad (5)$$

式中： $\omega = 2\pi c/\lambda$ ， $\omega$  为角频率； $c$  为真空中的光速； $\lambda$  为激光波长。由硅折射率虚部  $k_{si} = 2.9905$ ，计算可得，趋肤深度约为 10 nm，实验中观测到的结构饱和深度约为 50 nm。虽然可能因为纳秒激光的功率比

较高，能够进入衬底的光能量比较高，与理论计算相差很大，但也比较真实地反映了饱和的原因。另外，由于结构深度  $h$  与倾斜角度有关，当倾斜角度越大，斜入射进入硅表面的光程越长，损耗越大，即周期越小，形成的结构深度越小。

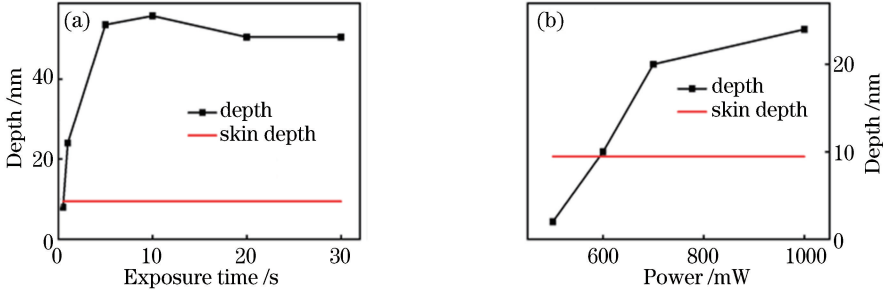


图 5 结构深度随曝光时间和功率的变化。(a)深度随曝光时间的变化；(b)深度随功率的变化

Fig. 5 Variation in structural depth with exposure time and power. (a) Depth as a function of exposure time; (b) depth as a function of power

#### 4 FDTD 模拟计算光场变化

为了研究表面结构对光场的反馈机制，利用时域有限差分法计算并对比自由空间、硅表面及带有结构的硅表面对光场的调制作用。干涉光场在自由空间沿着传播方向呈现明暗相间的周期分布，如图 6(a)所示，这也是激光干涉能够实现准三维加工的能力之一。但这种干涉光场遇到高折射率衬底时，会形成如图 6(b)所示的分布，光场在硅表面上将形成稳定的驻波分布。当结构成型之后，干涉的光场会被结构反馈迅速变形，形成如图 6(c)右半部分的光场分布，无结构边缘的光场也会被稍微影响，如图 6(c)左半部分所示。比较光场在不同情况下的分布，可以得到如下推论：

1) 硅在 355 nm 的高反射率和高吸收，导致激光能量穿透深度很浅，即烧蚀深度很浅。如图 6 所示，激光干涉的能量中心分布在硅表面上方 100 nm 左右，无法向下进行传播，导致激光向下的烧蚀能力很弱，这与实验中几十纳米的干涉烧蚀深度基本上维持不变现象相符合，由计算可得，这个深度与激光能进入材料的深度有关，如本实验所述，约为趋肤深度量级。

2) 结构对光场的负反馈作用机制是产生结构劈裂的主要原因。由图 6(c)右边硅表面激光光强的分布所示，即使是深度仅为 50 nm 的结构，也会对表面干涉光场产生变形，会将一个光强中心劈裂成两个，形成两个次级的最强点，并随着光波的传播将最强点引到两个形成结构的中心，从而烧

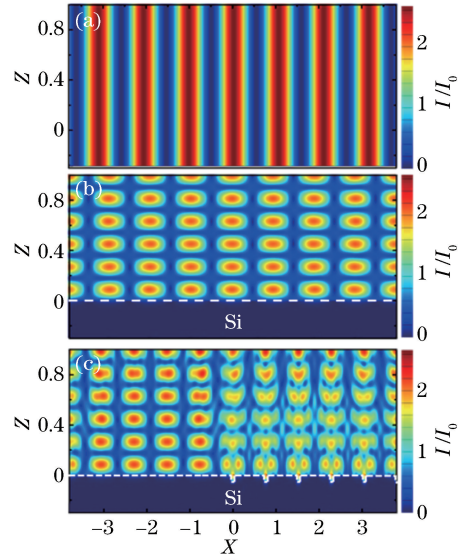


图 6 FDTD 模拟计算激光光场分别在不同介质中的传播。(a)自由空间；(b)硅表面；(c)有结构的硅表面  
Fig. 6 FDTD simulation for light intensities propagating in different media. (a) Free space; (b) silicon surface; (c) structured Si surface

蚀出一个次级结构，完成结构周期的劈裂。若功率较小，劈裂发生在已形成结构的附近，可以在一个周期内形成两次劈裂；若功率较大，一个周期内会由于光强高于作用阈值过多，只产生一次劈裂，如图 6(c)所示。模拟中所用结构的周期为 1  $\mu\text{m}$ ，图 6(c)中的结构尺寸为宽 300 nm、深度 50 nm 的槽状结构，并设定初始光强  $I_0$  为 1，颜色标尺即为光强从 0~2 倍的入射光光强。纵横坐标的单位为微米。

## 5 结 论

激光干涉烧蚀是一种快速制备大面积周期性微纳结构的方法。基于该方法在硅表面轻松实现 600 nm 以上周期性微纳结构的制备工作, 结构饱和深度达到 50 nm, 观察到了长曝光时间下的周期劈裂现象, 甚至可以得到周期为 300 nm 的结构; 由模拟结果可知, 已形成结构对入射干涉光场的反馈是结构劈裂的主要原因。结合本文研究, 使用长波长的短脉冲激光可能会更有效地降低表面反射的影响, 从而增强干涉烧蚀效率并增加结构深度, 该技术在超疏水、太阳能电池等表面微纳米结构的应用中存在一定应用潜力。同时研究材料在不同波长干涉烧蚀情况下的结构形貌演变将可能是另一个重要研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Brunner R, Sandfuchs O, Pacholski C, *et al.* Lessons from nature: biomimetic subwavelength structures for high-performance optics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 641-659.
- [2] Wang J N, Zhang Y L, Liu Y, *et al.* Recent developments in superhydrophobic graphene and graphene-related materials: from preparation to potential applications [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(16): 7101-7114.
- [3] Wu D, Chen Q D, Xia H, *et al.* A facile approach for artificial biomimetic surfaces with both superhydrophobicity and iridescence [J]. *Soft Matter*, 2010, 6(2): 263-267.
- [4] Guo C F, Sun T Y, Cao F, *et al.* Metallic nanostructures for light trapping in energy-harvesting devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e161.
- [5] Zhang J H, Li Y F, Zhang X M, *et al.* Colloidal self-assembly meets nanofabrication: from two-dimensional colloidal crystals to nanostructure arrays [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(38): 4249-4269.
- [6] Park J, Park J H, Kim E, *et al.* Conformable solid-index phase masks composed of high-aspect-ratio micropillar arrays and their application to 3D nanopatterning [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(7): 860-864.
- [7] Zhu Z D, Bai B F, You O B, *et al.* Fano resonance boosted cascaded optical field enhancement in a plasmonic nanoparticle-in-cavity nanoantenna array and its SERS application [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(6): e296.
- [8] Chen F. Micro- and submicrometric waveguiding structures in optical crystals produced by ion beams for photonic applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 622-640.
- [9] del Campo A, Greiner C. SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(6): R81-R95.
- [10] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers: reliable tools for advanced materials processing [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e149.
- [11] Wang L, Xu B B, Chen Q D, *et al.* Maskless laser tailoring of conical pillar arrays for antireflective biomimetic surfaces [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3305-3307.
- [12] Chen Y Y, Yuan D J, Yang M C, *et al.* High efficiency GaN LEDs with submicron-scale 2D periodic structures directly fabricated by laser interference ablation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 211-215.
- [13] Zhang R, Cao X W, Xu W W, *et al.* Research on the fabrication and property of hydrophobic antireflective infrared window [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5): 054201.  
张然, 曹小文, 徐微微, 等. 抗反射疏水红外窗口的制备研究 [J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 054201.
- [14] Guo L, Jiang H B, Shao R Q, *et al.* Two-beam-laser interference mediated reduction, patterning and nanostructuring of graphene oxide for the production of a flexible humidity sensing device [J]. *Carbon*, 2012, 50(4): 1667-1673.
- [15] Rao X, Ye Y X, Zhao L, *et al.* Experimental study on special-shaped parts of 2024 aluminum alloys by nano-laser peen forming [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021407.  
饶宵, 叶云霞, 赵雳, 等. 2024 铝合金异形件纳秒激光喷丸成形的实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021407.
- [16] Yang Q B, Liu S J, Wang Y T, *et al.* Superhydrophobic micro-nano structures on aluminum surface induced by nanosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091406.  
杨奇彪, 刘少军, 汪于涛, 等. 纳秒激光诱导铝板表面超疏水微纳结构 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091406.
- [17] Estevam-Alves R, Günther D, Dani S, *et al.* UV direct laser interference patterning of polyurethane

- substrates as tool for tuning its surface wettability [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 374: 222-228.
- [18] Wang X W, Wang L, Ma Z Y, *et al.* Fabrication of the three-dimensional ordered nc-Si array made by pulsed laser interference crystallization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(4): 363-365.  
王晓伟, 王立, 马忠元, 等. 激光干涉结晶法制备三维有序分布的 nc-Si 阵列 [J]. *中国激光*, 2002, 29(4): 363-365.
- [19] Chen X L, Hu J, Zhang Z Q, *et al.* Research progress in silicon photonic arrayed waveguide grating devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120009.  
陈晓铃, 胡娟, 张志群, 等. 硅光子阵列波导光栅器件研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120009.
- [20] Yang H, Huang S, Duan J, *et al.* Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser [J]. *Chinese Journal of 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.