

# 光斑重叠率对飞秒激光硅材料表面着色的影响

柏 锋<sup>1,2</sup> 范文中<sup>1,2</sup> 李阳博<sup>1,2</sup> 泮怀海<sup>1,2</sup> 李虹瑾<sup>1,2</sup> 赵全忠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 研究了光斑重叠率对飞秒激光硅材料表面着色的影响。实验结果表明:飞秒激光在硅材料表面着色是由于在其表面诱导出了周期纳米条纹结构;在飞秒激光功率一定的情况下,较高和较低的光斑重叠率都不能实现着色;在选定激光功率范围内,光斑重叠率越大,呈现的颜色越丰富,着色效率越高。另外反射率的测量结果表明着色后样品在可见光范围内反射率下降了 50% 左右。得到了飞秒激光硅材料表面着色的参数窗口,为飞秒激光半导体着色的推广提供了技术参考。

**关键词** 材料;激光着色;飞秒激光;光斑重叠率;硅材料

**中图分类号** O437; TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0703001

## Influence of Overlapping Rate of Focused Femtosecond Laser Spot on the Silicon Surfaces Colorization

Bai Feng<sup>1,2</sup> Fan Wenzhong<sup>1,2</sup> Li Yangbo<sup>1,2</sup> Pan Huaihai<sup>1,2</sup>

Li Hongjin<sup>1,2</sup> Zhao Quanzhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The influence of overlapping rate of focused femtosecond laser spot on colorization of silicon surfaces is investigated. Experimental results indicate that the generation of periodic nanoscale ripple structures induced by femtosecond laser pulses is responsible for the silicon surfaces colorization. In the case of a certain femtosecond laser power, the colorization cannot be realized with too high or too low overlapping rate of focused laser spots. For a special range of laser power, the denser overlapping rate of focused laser spots, the more colors are observed, and the higher colorization efficiency is achieved. In addition, the measurement results of reflection indicate that the reflection rate of colorized samples reduces about 50% in the visible light range. The window parameters for silicon surfaces colorization by femtosecond laser are obtained, which paves the way for femtosecond laser semiconductor colorizing technology.

**Key words** materials; laser colorizing; femtosecond laser; overlapping rate of focusing spot; silicon

**OCIS codes** 350.3390; 320.2250; 330.1690

## 1 引言

硅材料广泛应用在集成电路<sup>[1]</sup>、探测器<sup>[2]</sup>、传感器<sup>[3]</sup>、微机电系统<sup>[4]</sup>和太阳能电池<sup>[5-6]</sup>等领域。对硅材料表面进行着色不仅可以提高探测器效率<sup>[7]</sup>,扩宽传感器光谱响应范围<sup>[8]</sup>,还可以装饰硅材料器件外观<sup>[9]</sup>。例如,在实现光伏建筑一体化时,需要将太阳能电池直接建造在建筑物的立体面、屋顶、栅栏、遮阳篷、墙面甚至

**收稿日期:** 2016-01-05; **收到修改稿日期:** 2016-03-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(11374316)

**作者简介:** 柏 锋(1989—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲激光微纳加工等方面的研究。E-mail: fbai@siom.ac.cn

**导师简介:** 赵全忠(1974—),男,博士,研究员,主要从事超短脉冲激光微纳加工等方面的研究。

E-mail: zqz@siom.ac.cn(通信联系人)

汽车表面, 色彩多样的太阳能电池不仅可以起到装饰作用, 而且能够满足人们的审美情趣<sup>[10-12]</sup>。另一方面, 近几年飞秒激光表面改性技术受到了广泛的关注<sup>[13-17]</sup>, 飞秒激光表面着色技术作为其中的一个重要方向同样成为了研究的热点<sup>[18-19]</sup>。飞秒激光在硅材料表面着色是飞秒激光着色技术的一个重要的方面, 并且拓宽了飞秒激光着色技术的应用范围。因此硅材料表面着色具有重要应用意义。

硅材料表面着色是指通过镀膜、表面微加工等方法使其表面呈现出不同的颜色。对晶体硅太阳能电池来说, 传统的彩色太阳能电池制作方法是在其表面镀一层减反膜, 并通过调节减反膜的厚度来实现太阳能电池表面颜色的调节<sup>[20-22]</sup>。但是这一方法有两个主要缺点: 1) 减反膜在实现太阳能电池表面着色的同时会增加表面的反射率, 从而导致太阳能电池能量转换效率降低。2) 减反膜厚度精度要求较高, 需在四分之一光波长的尺度内(约为数十到一两百个纳米), 因此精确调控减反膜厚度对镀膜工艺要求非常高。近些年出现的利用飞秒激光对硅材料表面着色的技术引起了人们的注意<sup>[23-24]</sup>, 该技术可以克服以上传统镀膜着色的两个缺点。因为飞秒激光相比普通激光在处理材料时没有明显的热扩散现象, 只改变材料的表面形貌结构而对其内部不造成损伤, 研究利用飞秒激光在硅材料表面着色技术有着重要的现实意义。

到目前为止, 虽然已经有文献对飞秒激光在硅材料表面着色进行了报道<sup>[23-24]</sup>, 但是仍没有深入研究飞秒激光光斑重叠率对着色的影响, 也没有文献给出飞秒激光的着色参数窗口。光斑重叠率在飞秒激光着色过程中起着非常重要的作用。光斑重叠率直接决定硅材料能否被着色, 较高和较低的光斑重叠率都不能实现着色。着色后所能呈现的颜色的种类数与光斑重叠率呈正相关, 光斑重叠率越大, 着色后样品所呈现的颜色的种类就越多。本文研究了不同能量密度和光斑重叠率下着色样品的扫描电镜图(SEM)、不同观测角度下样品的颜色、样品着色前后的反射率。并解释了样品颜色随观测角度变化的原因及飞秒激光光斑重叠率对着色所起的作用。重点讨论了光斑重叠率对着色样品的角色散本领和着色效率的影响。给出了飞秒激光在硅材料表面着色的窗口。

## 2 实 验

实验采用的是 Spectra-Physics 公司的 Sprt-fire 钛宝石飞秒激光器。飞秒激光器的脉宽为 120 fs, 中心波长为 800 nm 重复频率为 1 kHz, 输出的光斑为 TEM<sub>00</sub> 模, 水平偏振。飞秒激光基模高斯光束从激光器出射依次经过衰减片, 半波片, 爬高反射镜组, 快门, 进入三维显微加工系统, 经物镜聚焦后的光斑直径为 12.4 μm, 实验光路图如图 1 所示, M 为反射镜。三维显微加工系统由 Nikon 公司的 CFI60 显微镜、Prior Scientific 公司的 ProScan II<sup>TM</sup> 三维控制平台和 Sony 公司的 DXC-390P 成像系统等组成。显微镜所用的物镜为 5×物镜(NA=0.15), 三维移动平台的精度为 0.1 μm。实验所用样品均为(100)晶面的硼掺杂单晶硅。实验前, 将样品放入纯度大于 99.9% 的无水酒精(乙醇)中用超声波清洗 3 min。将表面清洗干净的样品固定在三维显微加工平台上并调节平台高度, 使飞秒激光刚好聚焦于样品表面。激光垂直于样品平面入射, 通过加工程序控制平台移动来实现扫描, 平台的移动方式如图 1(b)所示, 间隔为 20 μm, 扫描区域为一个 4 mm×4 mm 的区域。

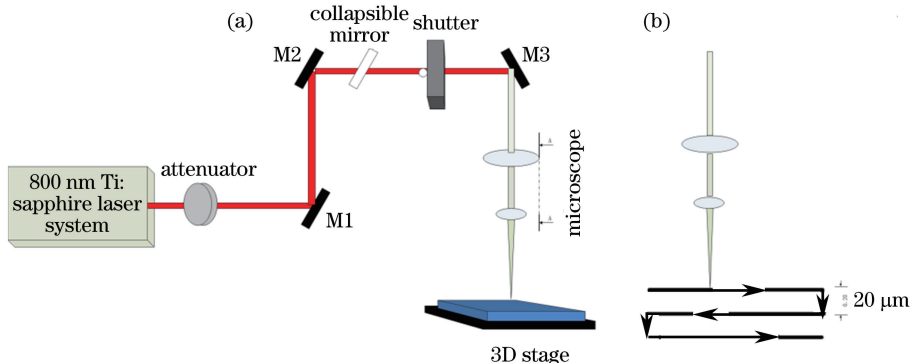


图 1 飞秒激光加工示意图。(a) 实验装置; (b) 扫描方式

Fig. 1 Schematic diagram of femtosecond laser processing. (a) Experimental setup; (b) scanning approach

为了观察飞秒激光处理后样品随角度变化的颜色,采用的装置如图 2 所示。利用光谱非常接近日光的卤素灯作为光源,将其产生的白光由一根光纤引出;将光源、样品和 CCD 固定在一个平面内,即图 2 中的虚线平面内;在  $y$  方向上左右移动二维平台调节入射光的角度并用 CCD 记录不同角度下的颜色。图 2 中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为入射角和出射角, $\gamma$  为表面周期性微结构的方向矢量(即光栅矢量)与入射平面的夹角。实验使用 JSM 的 6360LV 扫描电子显微镜观察样品处理前后的表面形貌变化。

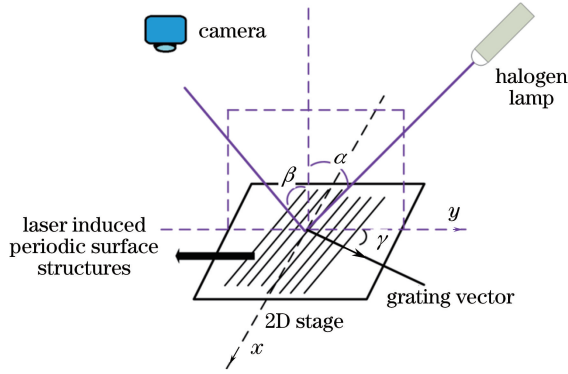


图 2 颜色获取装置图

Fig. 2 Experimental setup of the color-reading

### 3 结果及讨论

#### 3.1 实验结果与分析

影响飞秒激光在硅材料表面着色效果的因素有激光的能量密度、重复频率和扫描速度。飞秒激光的重复频率和扫描速度都通过改变相邻两个光斑的横向重叠率来影响着色,因此影响着色效果的因素可以归纳为飞秒激光的能量密度和相邻两个光斑的重叠率。实验中扫描间隔固定为  $20 \mu\text{m}$ ,对实验结果影响较小,可以忽略不计。为了方便计算,在光斑极小( $10 \mu\text{m}$  左右)的情况下可以将光斑近似为方形,则重叠率为重叠部分的长度除以光斑直径。又因为脉冲持续时间为飞秒量级( $10^{-15} \text{ s}$ )远远小于相邻脉冲间隔( $10^{-3} \text{ s}$ ),所以重复频率的倒数近似为相邻两个脉冲的时间间隔。基于以上两个假设,可以得到扫描速度、重复频率、光斑直径和光斑重叠率之间的数学关系为

$$\frac{\nu}{f} = d(1 - \varphi), \tag{1}$$

整理得

$$\varphi = 1 - \frac{\nu}{df}, \tag{2}$$

式中  $f$  为激光重复频率, $d$  为光斑直径, $\nu$  为扫描速度, $\varphi$  为光斑重叠率。实验所用的飞秒激光器的重复频率固定为  $1 \text{ kHz}$ ,因此改变扫描速度即可改变光斑重叠率。光斑重叠率与扫描速度的对应关系如表 1 所示,计算过程中  $d = 12.4 \mu\text{m}$ 。

表 1 不同扫描速度下的光斑重叠率

Table 1 Overlapping rate of spot at different scanning speeds

| Scanning speed / (mm/s) | 0.2  | 0.4  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Overlapping rate / %    | 98.4 | 96.8 | 91.9 | 83.9 | 75.8 | 67.7 | 59.7 |

实验中飞秒激光的能量密度变化范围为  $0.13 \sim 1.32 \text{ J/cm}^2$ ,而光斑重叠率范围为  $59.7\% \sim 98.4\%$ 。从图 3 中可以看出,对于每一个特定的能量密度,当光斑重叠率太高或者太低时都不能实现硅材料表面着色。例如对于能量密度为  $1.32 \text{ J/cm}^2$  的飞秒激光,当光斑重叠率大于  $91.9\%$  或小于  $59.7\%$  时,都不能实现很好的着色。图 3 中的空白区表明在其对应的激光参数下,飞秒激光几乎不能对硅片产生作用。

通过测量样品的 SEM 图来进一步观察硅片表面在飞秒激光处理之后的形貌特征,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,部分被飞秒激光加工后的硅片表面出现了周期为波长尺度的纳米条纹。从图 3 和图 4 的对比

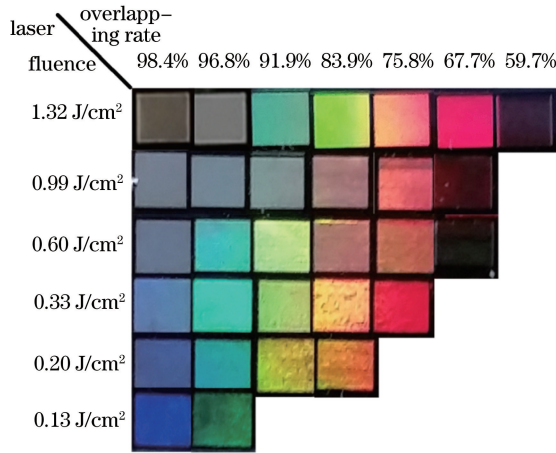


图 3 飞秒激光在不同能量密度和光斑重叠率条件下在硅材料表面着色的效果图

Fig. 3 Images of the colors formed on silicon surfaces by femtosecond laser pulses with different energy densities and overlapping rates

可以看出,被成功着色的区域都出现了周期为波长尺度的纳米条纹,而未着色的区域没有出现条纹。由此,可以得出硅材料表面的颜色是由于飞秒激光在硅材料表面诱导形成了周期性结构的纳米条纹。图 4 中箭头方向表示飞秒激光偏振方向,其平行于扫描方向。

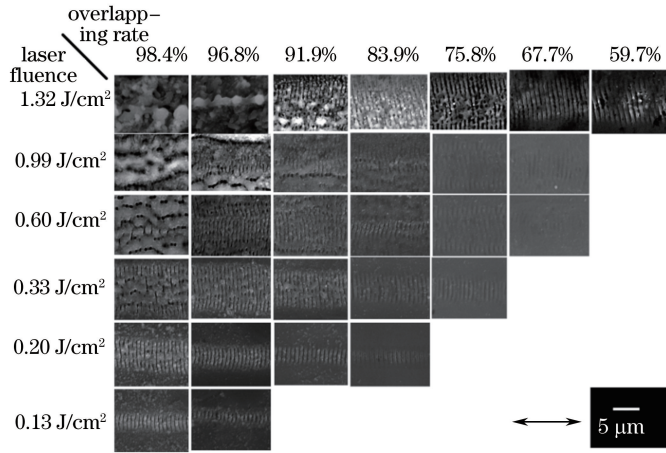


图 4 不同能量密度和光斑重叠率条件下飞秒激光照射样品的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of the samples irradiated by femtosecond laser pulses with different energy densities and overlapping rates

飞秒激光在硅材料表面着色是因为飞秒激光在其表面诱导出了周期性结构的纳米条纹。因此推测这种周期性结构类似于反射光栅具有分光作用。为了验证这个推测,实验中采用如图 2 所示的装置研究了着色样品表面的颜色与观测角度之间的对应关系。在飞秒激光能量密度为  $1.32 \text{ J/cm}^2$ ,重叠率为  $83.9\%$ 时,实验结果如图 5 所示,实验结果表明飞秒激光着色后,样品表面相邻颜色对应的  $\alpha, \beta$  的角度差约为  $2^\circ$ 。

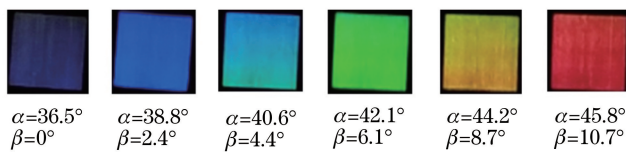


图 5 不同角度下着色样品表面呈现的颜色

Fig. 5 Colors of sample surface viewed with different angles

基于大量实验,总结了飞秒激光在硅材料表面着色的窗口,如图 6 所示。图中的阴影部分为飞秒激光在硅材料表面着色的参数窗口。从图 6 中可以明显看出,随着光斑重叠率的增加,在较小的能量密度条件下,可以实现着色;随着能量密度的增加,在较小光斑重叠率条件下,也可以实现着色。图 6 中参数在阴影区内

才能实现着色。

研究了飞秒激光着色前后硅片样品表面的反射率变化情况。同样以飞秒激光能量密度为  $1.32 \text{ J/cm}^2$  光斑重叠率为  $83.9\%$  时的着色样品为研究对象,其结果如图 7 所示。从图中可以清楚地看出,着色后样品表面的反射率普遍低于  $25\%$ ,在可见光范围内反射率下降了  $50\%$  左右。反射率下降原因有两个:1) 在表面诱导出了条纹,样品表面的比表面积增大;2) 条纹有一定的深度,能够起到一定程度的陷光作用。

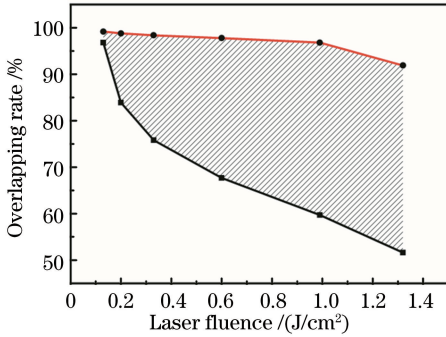


图 6 飞秒激光在硅材料表面的着色窗口  
Fig. 6 Parameter window of femtosecond laser colorizing silicon surface

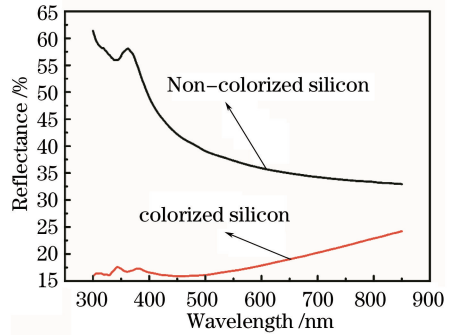


图 7 着色前后样品的反射率  
Fig. 7 Reflectance of the sample before and after colorizing

### 3.2 条纹形成原理

实验所形成的条纹周期在波长附近,因此可以用反射模型来解释条纹的形成原因。实验条纹形成的原因可以归纳为两点:1) 入射光与反射光在表面发生干涉,形成初始条纹。形成条纹的光栅矢量  $\mathbf{G}(\mathbf{G}=2\pi/\Lambda)$ 、入射光的波矢  $\mathbf{k}_i$ 、反射光的波矢  $\mathbf{k}_r$  之间的关系满足

$$\mathbf{k}_{rt} = \mathbf{k}_{it} \pm \mathbf{G}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{k}_{it}$ 、 $\mathbf{k}_{rt}$  分别为  $\mathbf{k}_i$ 、 $\mathbf{k}_r$  的切向分量,  $\Lambda$  为所形成条纹的周期,小角度入射的情况下<sup>[25-27]</sup>:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{1 \pm \sin \theta}, \quad (4)$$

式中  $\theta$  为光的入射角,(3)、(4)式中的正负号分别对应于反射光朝着入射光束出射和反射光背离入射光束出射的情况。其次,形成的初始条纹具有正反馈作用,促进条纹的生长。从图 8(b)中可以明显看出在同一能量密度下,随着光斑重叠率的增加条纹的长度也随之增加,这就说明了初始条纹可以与之后的飞秒脉冲作用促进条纹的生长变长,这一结果与 Huang 等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

### 3.3 显色原理

光栅方程为

$$d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (5)$$

式中  $d$  为光栅常数即周期, $\lambda$  为波长, $\alpha$ 、 $\beta$  为图 2 中的入射角和反射角, $m$  为衍射级次。入射光与反射光在法线的同一侧时(5)式取正号,入射光与反射光在法线两侧时取负号。图 2 中的入射角和反射角在法线的同一侧。当考虑光栅矢量的方向时,(5)式就是光栅矢量与入射平面夹角为  $0$  的特殊情况,因此(5)式变为<sup>[29]</sup>

$$d(\sin \alpha \cos \gamma \pm \sin \beta) = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (6)$$

式中  $\gamma$  为光栅矢量与入射平面的夹角。为了验证(5)式的适用性,将图 5 中的数据带入(5)式。因为一级衍射较强,观察到的都是一级,所以取  $m=1$ ,图 3 观察用的样品的条纹周期为  $717.8 \text{ nm}$ ,当  $\alpha=36.5^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$  时,带入(5)式得到色散的波长为  $426 \text{ nm}$ ,这正是紫色光的波长与图 5 中的颜色相对应的情况。将图 5 中其他颜色带入都可以得到相对应的结果。由此证明了着色是因为飞秒激光在表面诱导出的纳米条纹具有类似于光栅的分光作用。由(6)式可知,当  $\gamma=90^\circ$  时,不呈现出光栅特性,这与实验结果相符,将样品旋转  $90^\circ$  观察不到任何色彩。由于形成条纹的方向垂直于偏振方向,所以可以通过调控偏振方向来调节颜色。

由光栅知识可知,相邻颜色之间的角度差由光栅的角色散本领决定。角色散本领越大,各种颜色在空间上就分的越开,着色后样品表面呈现的颜色就越丰富。由光栅的角色散公式

$$\frac{d\eta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \eta}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (7)$$

式中  $\eta$  为相邻两种颜色的夹角,  $\lambda$  为入射光的波长,  $d$  为光栅的周期。可以得出飞秒激光诱导的条纹周期越小, 其分色本领越强, 着色后的样品所能呈现的颜色也就越丰富。其次飞秒激光诱导的条纹越长, 着色区域就越大, 着色效率也就越高。因此评价飞秒激光着色的质量取决于条纹的周期和条纹的长度。通过实验发现对于同一能量密度, 光斑重叠率越大, 所形成的周期越小, 实验结果如图 8(a) 所示, 这一结果与 Zhao 等<sup>[30]</sup> 的研究结果相一致。这说明在能够诱导出条纹的情况下, 光斑重叠率越大, 飞秒激光着色的颜色就越丰富。图 8(b) 表明同一能量密度下光斑重叠率越大所形成的条纹越长, 飞秒激光着色效率越高。从图 8(b) 中还发现, 能量密度越大诱导的条纹越长, 因此也可以选择较高的能量密度, 来获得较高的着色效率。

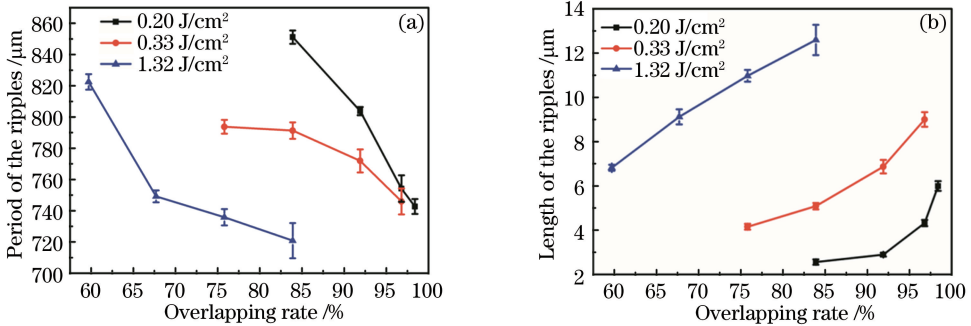


图 8 条纹的(a) 周期和(b) 长度随光斑重叠率的变化图

Fig. 8 (a) Period and (b) length of ripples with the overlapping rates variation

## 4 结 论

研究了飞秒激光在硅材料表面着色现象和机理, 并探究了飞秒激光光斑重叠率对着色的影响。证明飞秒激光在硅材料表面着色是由于在其表面诱导出了纳米条纹结构。利用光栅方程很好地解释样品的颜色随角度变化而改变的现象, 说明这种条纹类似于光栅结构具有分光的作用。研究发现在一定的范围内, 飞秒激光光斑重叠率越大, 所诱导的条纹周期越小, 条纹周期越小色散能力越强, 着色后颜色也越丰富。光斑重叠率越大, 诱导出的条纹就越长, 着色效率也就越高。给出了飞秒激光在硅材料表面着色的窗口, 讨论了着色前后样品表面反射率的变化, 发现其反射率在可见光波段下降了 50% 左右。该研究结果有望在光伏器件上得到应用。

## 参 考 文 献

- Chen R, Ng K W, Ko W S, *et al.*. Nanophotonic integrated circuits from nanoresonators grown on silicon[J]. Nat Commun, 2014, 5: 4325.
- Agnese R, Ahmed Z, Anderson A J, *et al.*. Silicon detector dark matter results from the final exposure of CDMS II[J]. Phys Rev Lett, 2013, 111(25): 251301.
- Huang Z, Carey J E, Liu M, *et al.*. Microstructured silicon photodetector[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(3): 3506.
- Waits C M, Modafe A, Ghodssi R. Investigation of gray-scale technology for large area 3D silicon MEMS structures[J]. J Micromech Microeng, 2003, 13(2): 170.
- Zhang M, Ren Y, Cheng D, *et al.*. Solar cell performance improvement via photoluminescence conversion of Si nanoparticles[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(6): 063101.
- He Z, Zhong C, Su S, *et al.*. Enhanced power-conversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure[J]. Nat Photonics, 2012, 6(9): 591-595.
- Mei H, Wang C, Yao J, *et al.*. Development of novel flexible black silicon[J]. Opt Commun, 2011, 284(4): 1072-1075.
- Stubenrauch M, Fischer M, Kremin C, *et al.*. Black silicon-new functionalities in microsystems[J]. J Micromech Microeng, 2006, 16(6): S82.

- 9 Petkie R, Dibachi R, Leising B, *et al.*. Solar cell with colorization layer: U.S. 12/060,012[P]. 2008-3-31.
- 10 Benemann J, Chehab O, Schaar-Gabriel E. Building-integrated PV modules[J]. *Sol Energy Mat Sol C*, 2001, 67(1): 345-354.
- 11 Henson J. Integrating BIPV: How the market for building integrated photovoltaics is being created in the USA [J]. *Refocus*, 2005, 6(3): 28-30.
- 12 Norton B, Eames P C, Mallick T K, *et al.*. Enhancing the performance of building integrated photovoltaics [J]. *Sol Energy*, 2011, 85(8): 1629-1664.
- 13 Wu Dongjiang, Zhou Siyu, Ma Guangyi, *et al.*. Experiment of quartz glass flute precise thinning by femtosecond laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303009.  
吴东江, 周思雨, 马广义, 等. 飞秒激光精密减薄石英玻璃凹槽实验 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303009.
- 14 Chen Zhifeng, Zhang Bingzhi, Chen Daxin, *et al.*. Ultrafast magnetization precession in FePt film induced and probed by femtosecond laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(s1): s107001.  
陈志峰, 张冰志, 陈达鑫, 等. 飞秒激光诱导与探测 FePt 薄膜超快磁化进动的研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s107001.
- 15 Wang Haozhu, Yang Fenghe, Yang Fan, *et al.*. Investigation of femtosecond-laser induced periodic surface structure on molybdenum [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0103001.  
王浩竹, 杨丰赫, 杨帆, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0103001.
- 16 Long Jiangyou, Wu Yingchao, Gong Dingwei, *et al.*. Femtosecond laser fabricated superhydrophobic copper surface and their anti-icing properties [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0706002.  
龙江游, 吴颖超, 龚鼎为, 等. 飞秒激光制备超疏水铜表面及其抗结冰性能 [J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0706002.
- 17 Zhao Shiqiang, Li Ling. Numerical investigation of phase change during thermal ablation of gold films induced by femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1214001.  
赵士强, 李凌. 飞秒脉冲激光烧蚀金膜的相变传热研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1214001.
- 18 Vorobyev A Y, Guoa C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(4): 041914.
- 19 Yao J, Zhang C, Liu H, *et al.*. Selective appearance of several laser-induced periodic surface structure patterns on a metal surface using structural colors produced by femtosecond laser pulses [J]. *Appl Surf Sci*, 2012, 258(19): 7625-7632.
- 20 Tobias I, El Moussaoui A, Luque A. Colored solar cells with minimal current mismatch [J]. *IEEE T Electron Dev*, 1999, 46(9): 1858-1865.
- 21 Li M, Zeng L, Chen Y, *et al.*. Realization of colored multicrystalline silicon solar cells with SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub>:H double layer antireflection coatings [J]. *Int J Photoenergy*, 2013: 1-8.
- 22 Selj J H, Mongstad T T, Sondena R, *et al.*. Reduction of optical losses in colored solar cells with multilayer antireflection coatings [J]. *Sol Energy Mat Sol C*, 2011, 95(9): 2576-2582.
- 23 Ionin A A, Kudryashov S I, Makarov S V, *et al.*. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces [J]. *Appl Phys A*, 2012, 107(2): 301-305.
- 24 Yang H D, Li X H, Li G Q, *et al.*. Formation of colorized silicon by femtosecond laser pulses in different background gases [J]. *Appl Phys A*, 2011, 104(2): 749-753.
- 25 Buividas R, Mikutis M, Juodkazis S. Surface and bulk structuring of materials by ripples with long and short laser pulses: Recent advances [J]. *Prog Quant Electron*, 2014, 38(3): 119-156.
- 26 Sipe J E, Young J F, Preston J S, *et al.*. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory [J]. *Phys Rev B*, 1983, 27(2): 1141.
- 27 Young J F, Preston J, Van Driel H, *et al.*. Laser-induced periodic surface structure. II. Experiments on Ge, Si, Al, and brass [J]. *Phys Rev B*, 1983, 27(2): 1155.
- 28 Huang M, Zhao F, 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.
- 29 Dusser B, Sagan Z, Soder H, *et al.*. Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking [J]. *Opt Express*, 2010, 18(3): 2913-2924.
- 30 Zhao Q Z, Malzer S, Wang L J. Formation of subwavelength periodic structures on tungsten induced by ultrashort laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(13): 1932-1934.