

飞秒激光脉冲能量累积优化对黑硅表面形貌的影响

陶海岩 陈锐 宋晓伟 陈亚楠 林景全

Femtosecond laser pulse energy accumulation optimization effect on surface morphology of black silicon

Tao Hai-Yan Chen Rui Song Xiao-Wei Chen Ya-Nan Lin Jing-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 067902 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.067902

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.067902>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光烧蚀掺杂金属聚合物羽流屏蔽特性数值研究

Numerical investigation on shielding properties of the laser ablation plume of polymer doped metal

物理学报.2016, 65(19): 197901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.197901>

掺杂单晶硅纳米薄膜杨氏模量的多尺度理论模型

The multi-scale theoretical models of Young's modulus of doped monocrystalline silicon nano-film

物理学报.2015, 64(23): 236103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.236103>

Si基IV族异质结构发光器件的研究进展

Recent progress in Ge and GeSn light emission on Si

物理学报.2015, 64(20): 206102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.206102>

利用扫描隧道显微镜研究水分子在Cu(110)表面的吸附与分解

Adsorption and dissociation of water on oxygen pre-covered Cu (110) observed with scanning tunneling microscopy

物理学报.2016, 65(22): 226801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.226801>

铜箔上生长的六角氮化硼薄膜的扫描隧道显微镜研究

Scanning tunneling microscopy study of h-BN thin films grown on Cu foils

物理学报.2016, 65(11): 116801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.116801>

飞秒激光脉冲能量累积优化对黑硅表面形貌的影响*

陶海岩¹⁾ 陈锐¹⁾ 宋晓伟¹⁾ 陈亚楠²⁾ 林景全^{1)†}

1)(长春理工大学理学院, 长春 130022)

2)(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

(2016年10月19日收到; 2016年11月30日收到修改稿)

在黑硅表面制备的微结构可以使其获得多种表面功能, 这些功能在太阳能、探测器等领域具有广泛的应用. 因此, 黑硅微结构的形成机理及制备条件优化一直是研究关注的焦点. 本文的研究发现, 随着激光辐照量(提高单脉冲能量或增加积累脉冲数)的增加会遇到形貌尺寸生长的瓶颈效应: 过多的能量累积对微结构的优化和控制并没有进一步的作用. 理论计算结果表明, 产生这一现象的原因是前序飞秒激光脉冲诱导产生的微结构形貌对当前激光脉冲能量的吸收产生了调制, 使当前激光脉冲的有效烧蚀效率降低. 根据这一飞秒激光烧蚀规律, 提出了一种优化表面形貌的新方案——在辐照激光总能量一定的条件下, 通过改变激光能量的分配方式(单脉冲能量与脉冲数的组合)可实现表面形貌的优化. 这一新的工作方式不但可以提高黑硅的制备效率, 而且还有助于减少飞秒加工过程带来的表面缺陷及损伤, 并降低加工过程中的能源消耗. 这一研究成果对黑硅性能的进一步提升及其工程应用具有重要的意义.

关键词: 飞秒激光, 微结构, 黑硅, 表面形貌

PACS: 79.20.Eb, 61.72.uf, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.66.067902

1 引言

利用飞秒激光对在 SF_6 气体中的硅片表面进行聚焦辐照, 可诱导形成以微米尖峰为形貌特点的微结构, 这样微结构表面几乎可以将从紫外到近红外波段(0.2—2.5 μm)的光全部吸收, 因此表面呈黑色, 故得名“黑硅”^[1,2]. 这一光学特性使其在探测器、医学等领域具有重要的应用价值. 而且黑硅表面经过适当的化学处理还可以兼备超疏水、自清洁等润湿功能特性^[3], 与宽光谱吸收特性相结合, 使其成为制备高效太阳能电池的有力候选者^[4,5]. 同时, 黑硅的尖锥结构在场发射器件中也具有重要的应用价值^[6]. 而黑硅这些优良特性的获得, 均得益于其表面的特殊形貌, 因此如何更好地对其表面

形貌进行优化是提升黑硅性能的重要途径, 同时避免过多激光能量沉积带来的表面缺陷与损伤也是其光电性能提升的一个重要课题. 例如, 利用更少的激光辐照获得最佳的结构形貌, 这样既节省了能源消耗同时又有效减少甚至避免材料表面的损伤. 目前对黑硅形貌优化的研究已经被开展, 在单点辐照的实验方式下, 进行了激光能量密度^[7]、波长^[8,9]、脉宽^[10]、辐照脉冲数^[11]和气体种类及气压^[12,13]等实验条件对表面形貌影响的研究. 发现单脉冲激光能量密度对黑硅微观形貌尺寸有着显著的影响, 提高激光能量是获得更大尺寸微结构的理想方式. 而对于从多个脉冲能量累积的角度研究激光能量对形貌的影响还很少^[14]. 黑硅表面形貌的演化是伴随着辐照表面的激光脉冲累积过程的, 在累积激光总能量一定的前提下, 单个脉冲的飞秒

* 国家自然科学基金(批准号: 61605017)、长春市科技计划(批准号: 14KP007)、长春理工大学青年科学基金(批准号: XQNJJ-2015-01)和光电信息控制和安全技术重点实验室基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: linjingquan@cust.edu.cn

激光能量和累积的脉冲数之间具有多种组合方式,不同的组合方式是否会对表面形貌产生影响还有待于进行深入研究.这一物理机理的明确,对于避免过多激光能量沉积造成的基底损伤等负面影响有着重要的意义.据我们所知,到目前为止,尚未见到这种飞秒激光脉冲能量累积优化对表面形貌产生影响的研究报道.

本文通过飞秒激光聚焦扫描的方式制备黑硅样品,研究激光能量的不同分配方式(单脉冲能量和累积脉冲数的组合数值)对黑硅表面尖峰尺寸的影响.实验结果发现,单向提高激光能量或累积脉冲数,微结构尺寸不会一直增加,而是会出现一个尺寸生长的瓶颈.通过建立的物理模型对其机理进行分析,由于脉冲积累烧蚀过程中每一发脉冲对硅表面都引起不同程度的形貌变化,同时这些形貌对后续脉冲激光能量的吸收会产生调制,使其有效烧蚀效率逐渐降低,从而出现瓶颈.这一实验现象的发现使我们对入射飞秒激光能量累积在黑硅制备过程所起到的作用有了新的认识,从而提出一种新的黑硅表面形貌优化方案——恰当地选择单脉冲能量和脉冲数的组合来控制微结构演化过程,从而更有利于表面微观形貌结构的优化.这种优化表面微结构的新方法可以有效提高黑硅制备效率,降低加工过程中的能源消耗,更重要的是同时减小了微结构制备过程中对基底材料造成的缺陷及损伤.这对黑硅的工程应用具有重要的意义,同时这种新方法对其他材料微结构表面的制备技术的发展也具

有一定指导意义.

2 实验装置与方法

实验装置如图1所示,飞秒激光由美国 Coherent 公司生产的 Libra 型 Ti:sapphire 飞秒激光系统提供,输出为线性偏振光,中心波长为 800 nm,重复频率为 1 kHz,脉宽 50 fs,最大输出单脉冲能量 4 mJ.实验中使用 N 型 (111) 单面抛光的单晶硅片,厚度为 0.5 mm,电阻率为 1—100 $\Omega\cdot\text{m}$.实验前用丙酮将硅片表面清洗干净,然后将样品放置于真空室内的三维电控平移台上(日本 Sigma).将真空室内的气压抽至 10^{-2} Pa,随后冲入 SF_6 气体使腔内气压达到 70 kPa.由激光器输出的飞秒激光通过中性密度衰减片(ND filter)调节激光能量,再由聚焦透镜($f = 300$ mm)聚焦垂直入射到真空室内的样品表面,样品表面平行于 x - y 面.通过电脑程序控制平移台在 x 和 y 平面进行移动,从而可实现飞秒激光对硅片表面的光栅式扫描.平移台 x 轴沿水平方向,其运动速度定义为扫描速度. y 轴沿竖直方向,完成每次扫描后进行下一次扫描时所移动的距离为扫描间距.激光入射方向始终沿着硅靶面的法线方向(沿平移台 z 轴),沿 z 轴移动平移台,固定透镜与靶面之间的距离,使所获得激光聚焦光斑直径约为 200 μm .在实验中,通过改变激光脉冲能量的方式变化烧蚀激光能量密度.

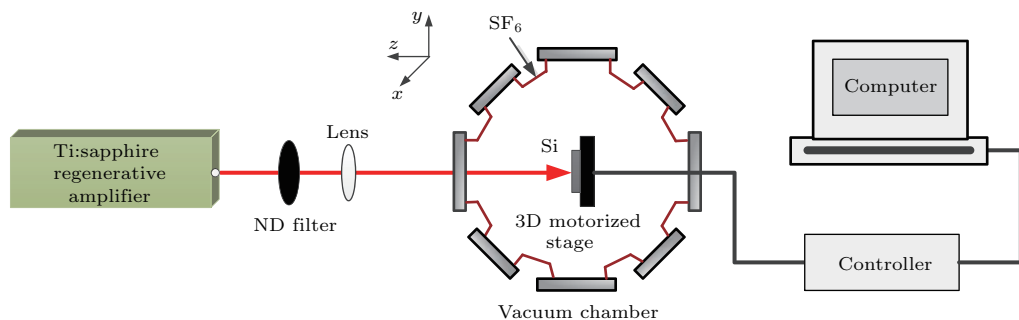


图1 飞秒激光制备硅表面微结构的实验装置图

Fig. 1. The experiment setup of femtosecond laser fabricating microstructure on silicon.

3 实验结果与讨论

飞秒激光诱导硅表面微结构的形成主要是由于激光脉冲累积烧蚀所造成,而激光能量的累积方式主要分为两种:1)单个脉冲能量不变的情况下改

变激光的扫描速度,也就是改变单位面积硅片所接收的激光脉冲数;2)总辐照脉冲数不变的情况下,改变激光单脉冲能量.下面我们通过实验来研究扫描速度和单脉冲激光能量对硅表面微结构尺寸的影响.

在本文中对所制备黑硅样品表面微结构高度

的测量采取以下方式: 将已经制备好的黑硅样品沿着晶向方向进行切割, 并对切割后样品截面进行扫描电镜成像观测. 图2为飞秒激光制备黑硅样品截面的典型扫描电子显微镜 (SEM) 图像, 随机取10个峰进行高度测量并取平均值, 即得到了所制备黑硅样品的微结构高度.

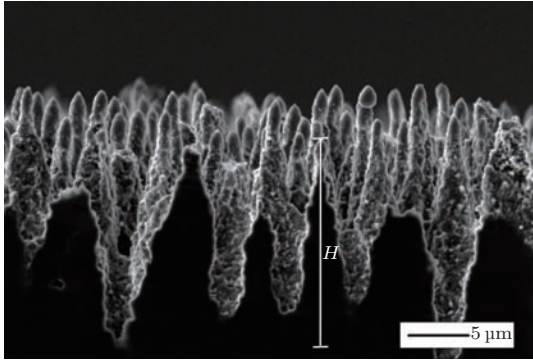


图2 激光能量为 240 μJ, 扫描间距 40 μm, 扫描速度 0.8 mm/s 时获得的黑硅样品截面 SEM 形貌图

Fig. 2. Cross sectional SEM image of the laser-treated Si sample by 240 μJ laser energy with scanning speed of 0.8 mm/s and line interval of 40 μm, respectively.

3.1 飞秒激光扫描速度对硅表面微结构形貌的影响

首先进行飞秒激光脉冲数对硅表面微结构尺寸影响的实验研究. 图3所示为扫描间距为 40 μm 时不同激光能量条件下制备微结构高度随激光扫描速度的变化趋势. 我们知道, 扫描速度决定硅表面单位面积所接收的脉冲数: 扫描速度越快, 单位面积累积的脉冲数越少; 扫描速度越慢, 单位面积接收的脉冲数越多. 因此在分析表面微结构高度变化规律时发现, 随着单位面积累积的激光脉冲数逐渐增加(随着扫描速度的逐渐减小), 微结构的高度先稍有增加, 随后几乎保持不变. 在扫描速度为 3.2—2.4 mm/s 时, 随着脉冲数的增加微结构的高度迅速增长; 扫描速度为 2.4—0.8 mm/s 时, 继续增加脉冲数, 微结构的变化并不明显, 高度增长缓慢, 几乎保持不变. 这说明微结构的生长仅在脉冲能量最初积累的阶段产生影响.

下面分析产生这种形貌尺寸增长饱和和现象的原因. 随着辐照到硅表面的激光脉冲数逐渐累积, 硅表面的几何形貌也随之发生改变, 同时表面对激光的吸收效率也逐渐发生变化^[15], 那么在微结构形成和演化的过程中, 具有微结构后的硅片如何影

响激光能量的有效吸收的过程需要被揭示. 图4所示为硅表面几何形貌随激光脉冲累积烧蚀后的变化趋势示意图, I_0 为入射激光强度, θ_A 和 θ_B 分别为微结构左右斜面与平面(硅片表面平面)所成的角度, I_A 与 I_B 为微结构斜面接收激光强度的垂直分量. 第一发激光脉冲入射到硅表面时, 表面是平整的, 由于激光是垂直入射的(如图4(a)所示), 此时硅表面对激光能量的吸收仅取决于表面光吸收率. 随着激光脉冲数的累积, 硅表面的锥形微结构开始形成, 此时入射光与锥形结构的表面有一个角度, 我们把入射光分解成垂直结构表面和平行结构表面的两个分量, 能够对锥形结构起烧蚀作用的只有垂直于表面的分量 I_A 和 I_B (如图4(b)所示), 继续增加脉冲数, 锥形结构会逐渐增长, 锥形结构的底角 θ_A 和 θ_B 也会逐渐增大, 当 $\theta_A = \theta_B = \pi/2$ 时(理论情况下), 入射光 I_0 平行于结构表面, 此时 I_A 与 I_B 达到最小值 $I_A = I_B = 0$ (如图4(d)所示).

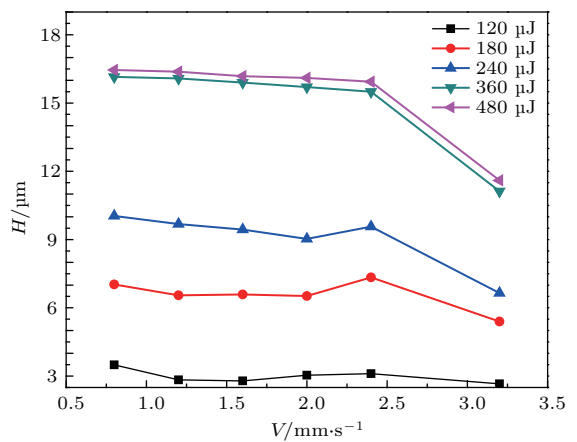


图3 不同激光能量条件下扫描速度对微结构高度的影响规律

Fig. 3. Dependence of the height of microstructure on scanning speed under the different laser energies.

以上物理过程进一步表达如下: 定义 $I_i = I_0 G(A, \theta_i)$, I_i 是硅片从入射激光吸收到的有效激光强度, 即 I_A 或 I_B . 这部分激光能量对硅表面微结构尺寸的增长是有利的; I_0 正比于入射到硅表面的单脉冲激光能量, 与飞秒激光的本身参数相关, 实验中激光的能量是固定的, 因此 I_0 是不变的, 所以 I_i 只由 $G(A, \theta_i)$ 决定; $G(A, \theta_i)$ 是一个关于硅表面物理性质的函数, 与材料表面的几何形貌及光学参数有关, 根据图4的几何关系, 具体可表示如下^[16]:

$$G_i(A, \theta_i) = A(\theta_i) \cos(\theta_i) = (1 - R(\theta_i)) \cos(\theta_i),$$

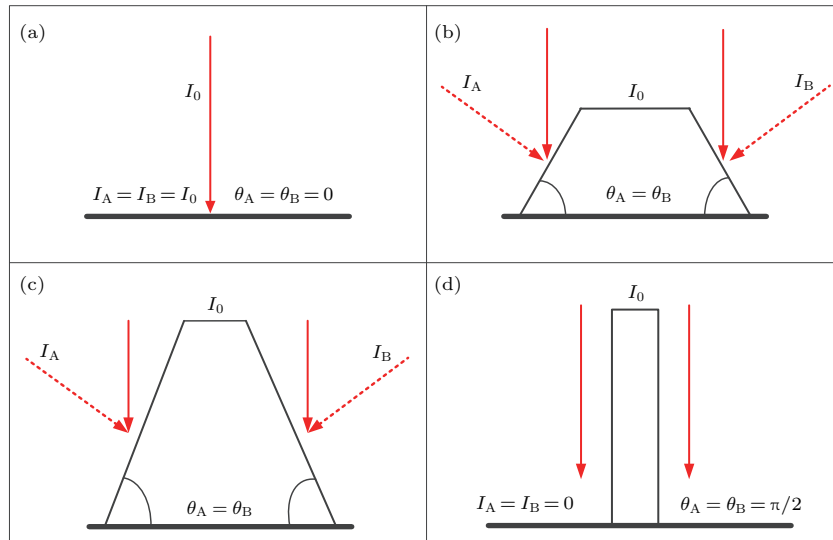


图4 硅表面几何形貌随激光烧蚀变化的示意图

Fig. 4. Schematic illustration of evolution of the local profile under laser irradiation (vertical microcolumns).

$A(\theta_i)$ 为材料对激光的吸收效率, θ_i 为锥形结构的底角, $R(\theta_i)$ 是反射率; 实验中所用到的激光为平行偏振光, 因此反射率 $R(\theta_i)$ 为

$$R(\theta_i) = R_p(\theta_i),$$

$R_p(\theta_i)$ 是水平方向的反射率 [17]:

$$R_p = \frac{(n^2 + \kappa^2) \cos^2 \theta_i - 2n \cos \theta_i + 1}{(n^2 + \kappa^2) \cos^2 \theta_i + 2n \cos \theta_i + 1},$$

n 和 κ 分别是材料的折射率系数和复数折射率系数. 通过以上公式进一步可以得到

$$G_i(A, \theta_i) = \frac{4n \cos^2 \theta_i}{(n^2 + \kappa^2) \cos^2 \theta_i + 2n \cos \theta_i + 1}.$$

我们用 MATLAB 软件对 $I_i = I_0 G(A, \theta_i)$ 进行数值计算, 从图 4 可以看出 θ_i 的取值范围为 $0-90^\circ$, 每隔一度取一组数据, 获得图 5 所示的模拟结果. 可以明显地看到, 随着角度 θ_i 的增加, $I_i(A, \theta_i)$ 不断减小, 并且减小的速率越来越快. I_i 的大小直接影响表面结构尺寸的变化: I_i 越大, 微结构尺寸增长越快; I_i 越小, 微结构尺寸增长越慢. 结合图 4 和图 5 可分析得出, 在激光辐照硅表面前期, 表面接收到较少激光脉冲辐照时, 相应的锥形结构的底角 θ_i 也较小, 因此激光吸收的有效能量 I_i 会很大, 此时微结构尺寸的增长速度是最快的; 随着激光脉冲数的增加, 表面微结构的尺寸逐渐增长, 锥形结构的底角 θ_i 也随之增大, 相应的 $I_i(A, \theta_i)$ 开始变小; 当入射到硅表面的脉冲数达一定时, 硅片从每个激光脉冲吸收到的有效能量不足以达到硅的烧蚀

阈值, 这时微结构的尺寸增长缓慢甚至停止. 对比图 3 的实验数据和图 5 的模拟结果可以看出, 模拟结果与实验数据符合得很好.

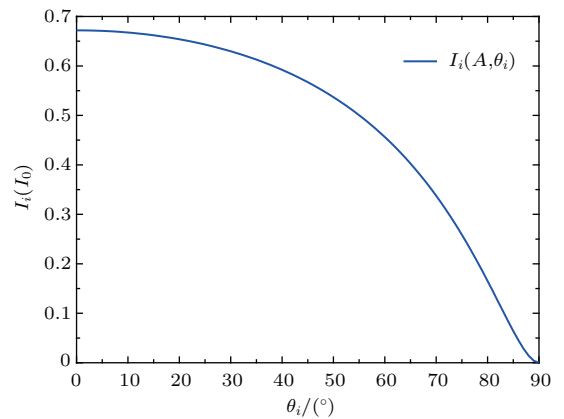


图5 用于微结构形成的有效激光强度 $I_i(A, \theta_i)$ 随角度 θ_i 的演化规律

Fig. 5. Evolution of effective laser intensity versus the angles.

3.2 飞秒激光单脉冲能量对微结构形貌的影响

基于以上研究发现了一个有趣的现象(如图 3), 在激光能量为 $360 \mu\text{J}$ 和 $480 \mu\text{J}$ 时, 两条曲线非常接近, 这说明单脉冲能量增加到一定值后, 表面形貌尺寸增长也能出现饱和现象. 为了进一步研究激光能量累积对表面形貌的影响, 我们固定辐照脉冲数目(固定扫描速度), 改变单个激光脉冲的能量, 研究激光脉冲能量对表面形貌的影响. 如

图6所示, 图中的6条曲线分别是在不同的扫描速度下获得的微结构高度随激光能量变化的实验测量结果. 可以明显看到以下几个现象: 从扫描速度的角度看, 速度为3.2 mm/s时制备出的硅表面微结构的高度明显小于其他速度, 而其他速度条件下制备出的微结构的高度相差并不大, 这与之之前讨论的扫描速度对微结构影响的实验结果相符; 从激光能量的角度看, 在能量为120—300 μJ 区间时, 微结构的高度迅速增加, 而当能量为300—480 μJ 时, 微结构的高度变化缓慢, 几乎保持不变, 对于这个现象我们仍然可以用前面的数学模型来解释.

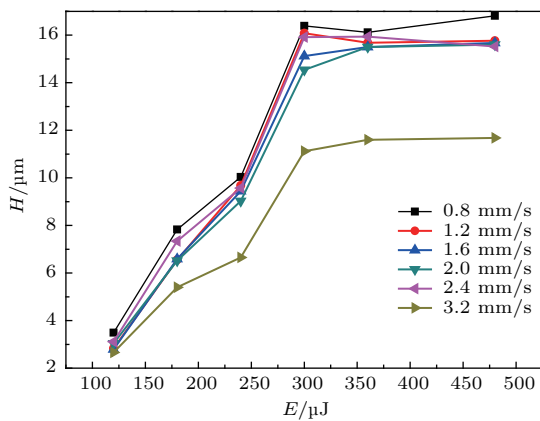


图6 (网刊彩色) 相同扫描条件微结构高度随激光能量的变化

Fig. 6. (color online) Dependence the height of microstructure on laser energy under the different scanning speeds.

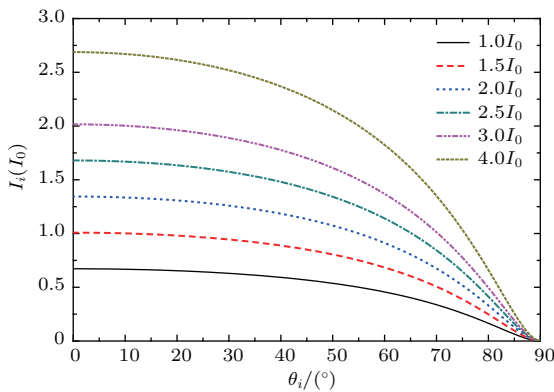


图7 (网刊彩色) 不同激光强度条件下, 用于微结构形成的有效激光强度 I_i 随角度 θ_i 的演化规律

Fig. 7. (color online) Evolution of effective laser intensity versus the angles under different laser energies.

图7为激光垂直入射到硅表面时, 不同激光能量条件下, 硅片吸收的有效激光强度 I_i 随锥形微结构底角 θ_i 变化的曲线. 其中令 I_0 分别取 $1.0I_0$,

$1.5I_0$, $2I_0$, $2.5I_0$, $3I_0$ 和 $4I_0$. 我们可以看到 I_i 随 θ_i 增大逐渐减小, 并且随着 θ_i 逐渐接近 90° , 不同激光能量条件下获得的有效吸收强度 I_i 值也逐渐接近, 当 θ_i 达到某一定值时, 入射的激光能量仅有很小一部分对硅表面产生烧蚀作用, 即 I_i 将接近甚至小于硅的烧蚀阈值, 这种情况下, 继续增加 I_0 (增加激光能量), 对微结构尺寸的增加作用有限. 以上的模拟结果与图6的实验结果相符合.

3.3 飞秒激光制备硅表面微结构的最佳能量累积方式

通过以上的实验结果和理论分析可以得出, 利用飞秒激光对硅表面进行微结构制备时, 在一定范围内增加激光脉冲数或激光能量都会引起硅表面微结构尺寸的增长, 而且硅表面吸收的有效激光能量由激光单脉冲能量和前序脉冲制备的微结构底角共同决定, 但是当微结构的尺寸达到一定时, 继续增加激光能量或脉冲数, 对微结构的生长没有明显的作用. 那么当相等的激光总能量累积沉积在硅表面时, 激光总能量的不同分配方式(单脉冲能量与脉冲数的组合)会对形成微结构的尺寸产生影响. 这样在辐照脉冲数(扫描速度)和单脉冲激光能量之间会存在一个最佳的组合方式, 那么在这个条件下我们能够使用有限的激光能量制备出最理想的硅表面微结构. 下面我们通过实验来进行验证. 保持入射到硅表面单位面积的激光总能量不变(本实验情况下为 3.75 J/m^2), 改变激光能量分配方式的条件下, 对硅表面微结构进行制备. 图8是在不同实验条件下所获得的硅表面微结构的SEM图像, 可以清晰地看到, 微结构的尺寸和分布产生了明显的变化.

随后对1—6号样品表面微结构高度进行了测量统计, 结果如图9所示. 虽然6种样品表面接收的激光总能量完全相同, 但形成的微结构尺寸却不一致: 脉冲数累积最多(样品1)和单脉冲能量最大(样品6)的样品表面形貌都没有形成尺寸最大的微结构分布, 而样品4和5表面微结构的高度和间距达到最大. 综上, 我们在用飞秒激光对硅表面进行微结构制备时, 不仅仅要单纯考虑增加激光辐照量(增加脉冲能量或脉冲辐照数目), 还要考虑激光能量的累积方式(不同的累积脉冲数和单脉冲激光能量的组合方式).

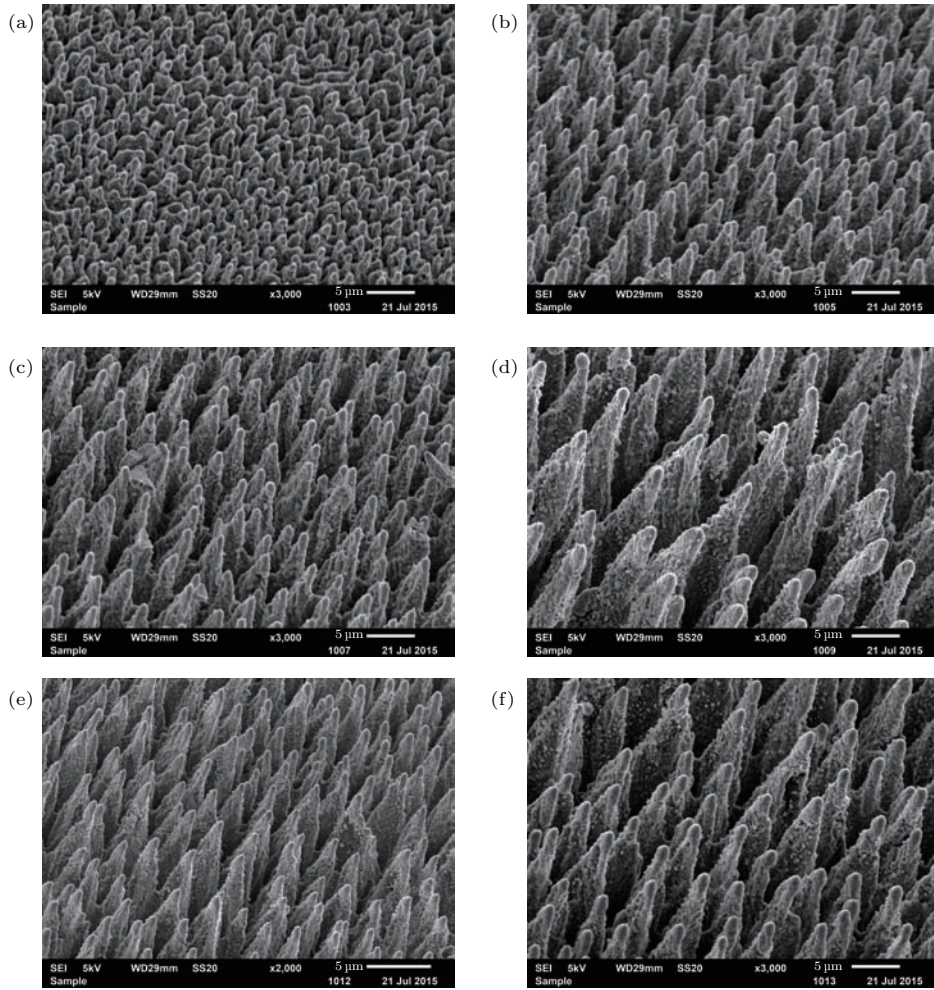


图8 在入射总激光能量一定的条件下, 改变激光单脉冲能量与脉冲数组合方式对黑硅表面微结构形貌的影响 (a) 120 μJ , 0.8 mm/s; (b) 180 μJ , 1.2 mm/s; (c) 240 μJ , 1.6 mm/s; (d) 300 μJ , 2.0 mm/s; (e) 360 μJ , 2.4 mm/s; (f) 480 μJ , 3.2 mm/s

Fig. 8. Combination effect of single pulse energy and pulse number on black silicon surface topography with fixed total incident laser energy: (a) 120 μJ , 0.8 mm/s; (b) 180 μJ , 1.2 mm/s; (c) 240 μJ , 1.6 mm/s; (d) 300 μJ , 2.0 mm/s; (e) 360 μJ , 2.4 mm/s; (f) 480 μJ , 3.2 mm/s.

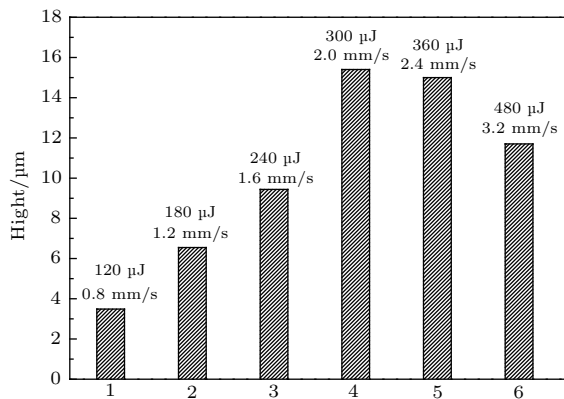


图9 在入射总激光能量固定的条件下, 改变激光单脉冲能量与脉冲数组合方式获得的微结构高度统计图

Fig. 9. Statistical data for the measured geometrical size of micro-structure achieved by optimizing both of single pulse energy and pulse number under the condition of a fixed total laser irradiation energy.

4 结 论

本文研究了在飞秒激光制备黑硅过程中能量累积方式(总能量一定时, 单脉冲能量与脉冲数的组合方式)对微结构尺寸的影响. 实验发现, 过多的激光脉冲数和过高的单脉冲能量对于表面微结构的生长都存在瓶颈效应. 通过建立的物理模型对这一现象进行了分析和解释, 结果表明前序脉冲制备的微结构形貌对当前激光脉冲吸收效率的改变导致了这些瓶颈效应. 而且硅表面吸收的有效激光总能量(用于烧蚀制备微结构的)由激光单脉冲能量和脉冲数共同决定. 在激光总辐照量一定的条件下, 仅通过调节脉冲数和单个激光脉冲能量之间组合关系, 便可对表面形貌尺度进行优化和控制. 这种通过分配飞秒激光能量的方式为黑硅表面形貌

结构优化提出了一种新方案. 这些结果对于提高硅表面微结构的制备效率和减少表面损伤及降低加工过程中的能量消耗都具有重要的意义.

参考文献

- [1] Wu C, Crouch C H, Zhao L, Carey J E, Younkin R, Levinson J A, Mazur E, Farrell R M, Gothoskar P, Karger A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1850
- [2] Peng Y, Chen X Q, Zhou Y Y, Xu G J, Cai B, Zhu Y M, Xu J, Henderson R, Dai J M 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 073102
- [3] Baldacchini T, Carey J E, Zhou M, Mazur E 2006 *Langmuir* **22** 4917
- [4] Tao H, Lin J, Hao Z, Gao X, Song X, Sun C, Tan X 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 201111
- [5] Tao H, Song X, Hao Z, Lin J 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 061402
- [6] Maloney P G, Smith P, King V, Billman C, Winkler M, Mazur E 2010 *Appl. Opt.* **49** 1065
- [7] Her T H, Finlay R J, Wu C, Mazur E 2000 *Appl. Phys. A* **70** 383
- [8] Peng Y, Zhang D S, Chen H Y, Wen Y, Luo S D, Chen L, Chen K J, Zhu Y M 2012 *Appl. Opt.* **51** 635
- [9] Yang H D, Li X H, Li G Q, Yuan C H, Tang D C, Xu Q, Qiu R, Wang J P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027901 (in Chinese) [杨宏道, 李晓红, 李国强, 袁春华, 唐多昌, 徐琴, 邱荣, 王俊波 2011 物理学报 027901]
- [10] Crouch C H, Carey J E, Warrender J M, Aziz M J, Mazur E, Genin F Y 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1850
- [11] Peng Y, Hong M, Zhou Y Y, Fang D, Chen X Q, Cai B, Zhu Y M 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 051303
- [12] Younkin R, Carey J E, Mazur E, Levinson J A, Friend C M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 2626
- [13] Dong X, Li N, Liang C, Sun H, Feng G J, Zhu Z, Shao H Z, Rong X M, Zhao L, Zhuang J 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 081301
- [14] Peng Y, Wen Y, Zhang D S, Luo S D, Chen L, Zhu L M 2011 *Appl. Opt.* **50** 4765
- [15] Yang J, Luo F F, Kao T S, Li X, Ho G W, Teng J H, Luo X G, Hong M H 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e185
- [16] Conde J C, González P, Lusquiños F, León B 2009 *Appl. Phys. A* **95** 465
- [17] Ward L 1994 *The Optical Constants of Bulk Materials and Films* (2nd Ed.) (London: Institute of Physics)

Femtosecond laser pulse energy accumulation optimization effect on surface morphology of black silicon*

Tao Hai-Yan¹⁾ Chen Rui¹⁾ Song Xiao-Wei¹⁾ Chen Ya-Nan²⁾ Lin Jing-Quan^{1)†}

1) (School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

2) (Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

(Received 19 October 2016; revised manuscript received 30 November 2016)

Abstract

Arrays of sharp conical spike microstructures are created by repeatedly irradiating silicon surfaces with focused femtosecond laser pulses in SF₆. The absorbance of light is increased to approximately 90% in a wavelength range from the near ultraviolet (0.25 μm) to the near infrared (2.5 μm) by the microstructured silicon surface. The microstructured surface presents pitch-black because of enhanced absorption with a broad wavelength range, which is called black silicon. The unique microstructure morphology of black silicon surface formed by femtosecond laser can also bring a lot of other surface functions, for example, self-cleaning and field emission. These functions make black silicon highly desirable in solar energy, detectors and other fields. Therefore, the forming mechanism and conditions of fabrication optimization for black silicon microstructure have always been the focus of research. In our work, the sample is moved by motor-controlled stage while the laser beam is fixed. In the case of laser beam scanning, arrays of sharp conical spikes on the silicon are manufactured in 70 kPa SF₆. The aim of the experiment is to find how to optimize the distribution of the laser energy in a number of laser accumulation pulses (the combination of single pulse energy and pulse number) to control the surface morphology of the black silicon. Experimental results show that there appears a bottleneck effect of morphology size growth with the increase of laser irradiation (improving the single pulse energy or increasing pulse accumulation number). Excessive energy accumulation brings no extra effect on optimizing and controlling of microstructure morphology on the surface. Based on theoretical results obtained from a physical model we proposed, we find that the reason for this phenomenon is that the microstructure morphology induced by former sequence pulse modulates the laser energy absorption of current laser pulse, and changes the laser ablation efficiency of the current pulse. According to this physical mechanism, we propose a new way of optimizing surface morphology, with fixing the total laser irradiation energy. And the size and distribution of surface morphology can be achieved by optimizing the distribution of the laser energy in a number of laser accumulation pulses. This approach can not only improve the efficiency of silicon surface preparation of microstructures but also reduce the surface defects and damage. Furthermore, the proposed method can reduce the energy consumption in the process of femtosecond machining. It is of great significance for the engineering application of black silicon.

Keywords: femtosecond laser, microstructures, black silicon, surface topography

PACS: 79.20.Eb, 61.72.uf, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.66.067902

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61605017), the Science and Technology Planning Project of Changchun, China (Grant No. 14KP007), the Young Scientists Fund of Changchun University of Science and Technology, China (Grant No. XQNJJ-2015-01), and the Foundation of the Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, China.

† Corresponding author. E-mail: linjingquan@cust.edu.cn