

飞秒激光对硅表面微构造的研究进展

高胜淼 韩培高* 闫珂柱

(曲阜师范大学激光研究所 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165)

摘要 综述了飞秒激光对硅表面微构造的研究进展。阐述了超短脉冲诱导硅材料表面深亚波长结构的形成机理, 讨论了飞秒激光作用硅表面制备微纳结构的影响因素和该微纳结构的发光特性, 介绍了飞秒激光诱导硅材料表面微纳复合结构的生物仿生特性。揭示了飞秒激光在微结构制备方面的广泛应用前景。

关键词 光学制造; 飞秒激光; 硅; 脉冲; 发光特性

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110002

Research Progress of Femtosecond Laser Fabricating Silicon-Based Micro/Nano Structure

Gao Shengmiao Han Peigao Yan Kezhu

(Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology and Laser Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract The research progress of femtosecond laser microstructuring silicon surfaces is summarized. The formation mechanism of the deep subwavelength structure of silicon surfaces induced by ultrashort pulse is introduced, the influence factors of the preparation of micro-nano structures with femtosecond laser irradiating silicon surfaces and the luminescence properties of the micro-nano structures are discussed. The biological bionic characteristics of the micro-nano structures of silicon surfaces induced by femtosecond laser are introduced. The widespread application prospects of femtosecond laser in the preparation of the microstructures are put forward.

Key words optical fabrication; femtosecond laser; silicon; pulse; luminescence property

OCIS codes 220.4000; 350.3850; 350.3390; 320.7130

1 引言

硅是一种被广泛应用于光电子器件的半导体材料,但是由于硅本身所具有的禁带带宽以及硅表面的高反射率,限制了硅基器件的光电响应能力。利用飞秒激光对单晶硅表面进行辐照,可在材料表面上形成特定的微纳米结构,该结构可以大幅度提升硅材料的光吸收能力,并有效降低硅材料的反射率。

利用飞秒激光对硅表面微处理的研究有很多。哈佛大学的 Her 等^[1]在实验室利用飞秒激光刻蚀单晶硅片时得到了一种新型材料——黑硅;他们利用飞秒激光脉冲对硅表面微构造进行了研究^[1-2]。中国科学院西安光学精密机械研究所利用峰值功率密度高、脉冲作用时间短的飞秒激光加工 n 型单晶硅制备黑硅^[3]。

飞秒激光脉冲在一定气体环境中辐照硅表面后产生了微米级圆锥尖峰微结构,这种硅尖峰微结构在制作高效的太阳能电池^[4]和传感器材料^[5-6]方面有很大的潜在应用价值。

本文综述了飞秒激光对硅表面微构造的研究进展。从硅表面微纳结构的形成机理、影响因素、发光特性等方面展开讨论,并对飞秒激光在微结构制备中的应用前景给出了展望。

收稿日期: 2013-06-25; **收到修改稿日期**: 2013-07-11; **网络出版日期**: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(11104160)

作者简介: 高胜淼(1988—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: gsmiao1988@163.com

导师简介: 闫珂柱(1956—),男,教授,主要从事量子光学与量子信息方面的研究。E-mail: yankezhu@126.com

* **通信联系人**。E-mail: pghan@foxmail.com

2 超短脉冲诱导硅材料表面深亚波长结构的形成机理

对于飞秒激光辐照硅材料表面诱导纳米结构的机理,有不同的理论模型,包括经典散射模型、库仑爆炸-自组织模型、二次谐波模型、等离子体作用模型等。

1) 经典散射模型:1973年 Emmony 等^[7]首先提出表面散射中心可能与波纹产生相关,入射波与散射波干涉将产生能量的周期性分配,在垂直入射情况下产生表面结构的周期性等于激光波长。

2) 库仑爆炸-自组织模型:郭晓东等^[8]详细描述了该模型,激光辐照使材料表面静电场不稳定,在 240 fs 内把电子温度加热到最高,而晶格温度较低。在穿透深度内电子将激光能量完全吸收,速度达到 10^6 m/s,并以很高的动量辐射出去。电子激发引起材料表面的离子化和材料表面正离子的库仑爆炸。库仑爆炸引起电子云在偏振方向的强烈振荡,使材料表面处于不稳定的状态,库仑引力使粒子按电场方向排列,在 100 fs 的材料表面自组织过程中,原子间形成新键,进而形成规则的周期性纳米结构。由于不同的激光参量产生的热梯度不同,所以不同的脉冲下产生的表面结构周期也不相同。初始几个脉冲辐照后表面波纹中开始出现分叉现象,分叉数目随脉冲数的增加而减少,这与液体对流自组织系统非常相似。因此在激光辐照后,材料表面纳米结构的形成来自处于液态表面的自组织过程。

3) 二次谐波模型:jia 等^[9]提出纳米结构的形成来自于样品表面散射波和其产生二次谐波的干涉。二次谐波对纳米结构的形成有重要作用,随着其能量的增加,产生纳米结构的方向趋向于二次谐波的偏振方向。之后王丽等^[10]通过实验证实了入射光的二次谐波在纳米周期结构的形成中起到了重要作用。

4) 等离子体作用模型:陈长水等^[11]指出,飞秒脉冲激光与硅表面相互作用时,激发态的电子与晶格之间来不及建立起热平衡,硅表面瞬间吸收的激光能量无法传导到内部,表面不会熔化。瞬间积聚在表面的大量能量使硅表面产生等离子体,并与周围环境物质相互作用,一方面带走大量的能量,同时带走大量的表面层物质,从而在硅表面产生强烈的刻蚀作用。

3 飞秒激光辐照单晶硅制备微纳结构进展状况

1998年,哈佛大学 Her 等^[1]发现利用飞秒激光在一定气体环境下照射硅片可在硅表面激光辐照区产生微米量级的尖峰结构。2000年,他们利用飞秒激光在一定气体环境下刻蚀硅,制备出具有一定刻蚀面积的黑硅^[2]。普通硅由于禁带宽度的限制,只能吸收波长低于 $1.1 \mu\text{m}$ 的光,而哈佛大学制备出的这种微构造过的硅材料具有奇特的光电性质,如对 $0.25 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 波长的光几乎全部吸收,具有良好的场致发射特性等^[11]。此后,国内外有关飞秒激光对硅表面微构造的研究层出不穷。

3.1 制备微纳结构过程中的影响因素

3.1.1 飞秒激光参数

1) 脉宽和重复频率。

2009年,Manickam 等^[12]在大气压下用飞秒激光在空气中辐照硅制备出了纳米纤维结构,他们对纳米

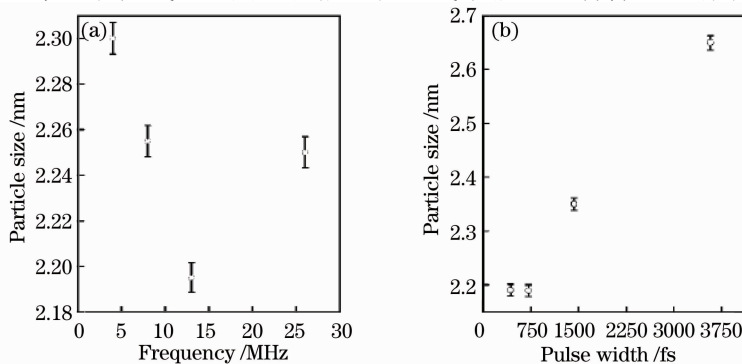


图 1 用声子限制模型表示的硅纳米颗粒尺寸。(a)颗粒尺寸与频率的关系;(b)颗粒尺寸与脉宽的关系^[12]

Fig. 1 Calculated silicon nanoparticle size using the phonon confinement model. (a) Particle size versus frequency; (b) particle size versus laser pulse width^[12]

纤维结构进行了扫描电子显微镜(SEM)分析,发现飞秒激光脉宽和频率对纤维结构的尺寸和密度有显著影响,并用声子限制模型将硅纳米颗粒尺寸与脉宽和频率的函数关系表示出来,如图1所示。

2) 脉冲数目。

2011年,上海交通大学的阮召崧等^[13]研究了硅表面微型锥状尖峰高度与飞秒激光脉冲数目之间的非线性关系,发现在64000Pa的 SF_6 气体环境,用功率1W、单脉冲激光能量密度 0.8 J/cm^2 的飞秒脉冲激光照射,超过100个脉冲才能观察到硅表面产生微型锥状尖峰。脉冲数增加到2100个之前,硅表面的微型锥状尖峰都随之增长,其后开始下降。飞秒激光照射硅表面达到2100个脉冲时,可制造出表面具有较高微型锥状尖峰的黑硅。而当飞秒激光脉冲数继续增加至5100个时,硅表面的微型锥状尖峰几乎消失,形成凹洞结构。2013年,Peng等^[14]实验发现尖峰高度和尖峰间距与飞秒激光脉冲数目呈近似线性关系,并且尖峰高度的增长率作为脉冲数目的函数与气压有关。当脉冲数目超过某一阈值时,硅表面同样形成凹洞。

3) 脉冲能量。

2012年,上海理工大学的温雅等^[15]研究了在 SF_6 环境下用飞秒激光刻蚀硅材料制备的微纳结构的表面形貌随脉冲能量的变化规律,将脉冲个数固定为1000个,发现在低脉冲能量下(低于 $300\text{ }\mu\text{J}$),硅表面没有产生明显变化;随着飞秒脉冲能量的增加,硅材料表面出现尖峰状的微纳结构,并且尖峰高度随脉冲能量增加而升高;如果脉冲能量过高(高于 $1200\text{ }\mu\text{J}$),尖峰结构的高度反而随脉冲能量的增加而降低。这对微纳结构材料的表面形态控制有重要意义。

4) 能量密度。

2013年,河南师范大学的马鹏飞等^[16]利用不同能量密度的飞秒激光在空气中直接对单晶硅片进行辐照刻蚀,研究了不同能量密度的飞秒激光辐照对单晶硅的影响,发现过低和过高的辐照能量都不利于该微纳米结构的产生,对样品光谱的反射率测试表明该微纳米结构能有效改善硅材料的反射率。2013年,华中科技大学的杨焕等^[17]研究了飞秒激光的单脉冲能量密度对单晶硅的有效刻蚀光斑大小的影响,发现当激光能量较低时,有效刻蚀直径小于光斑的理论直径;随着激光功率的增长,有效刻蚀直径大于光斑的理论直径;随着激光能量的进一步增加,有效刻蚀直径的增加率逐渐减小;当激光能量高于某一特定值时,有效刻蚀直径不再增加。

5) 飞秒激光功率与脉冲数的比例关系。

激光通量 Φ 的表达式可以写为 $\Phi = Pt/S = Pm/fS$,其中 P 为激光平均功率, t 为激光脉冲的作用时间, S 为照射在硅表面的激光光斑面积, m 为入射到硅表面的脉冲数目, f 为激光的重复频率,即激光通量的数值正比于功率和脉冲数两者的乘积。早在2000年,Her等^[2]就研究了硅表面尖峰高度与飞秒激光通量之间

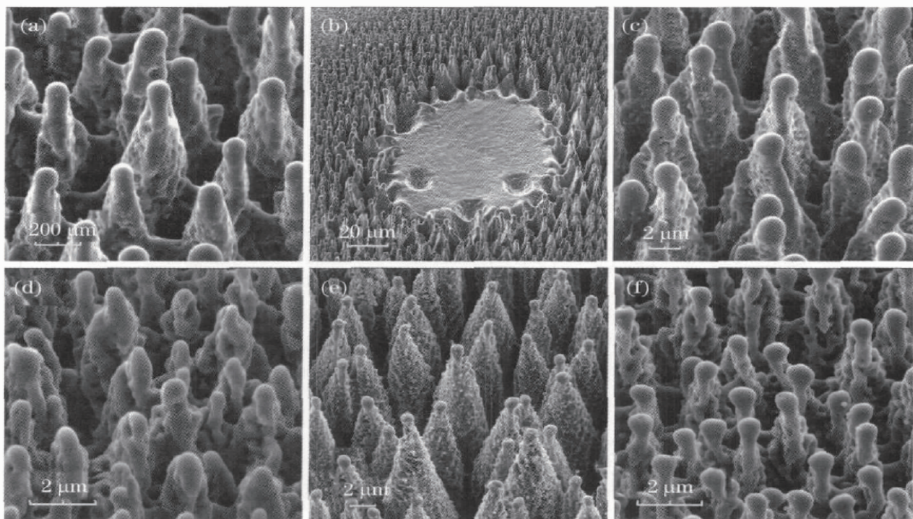


图2 SEM所观察到的硅表面微结构图^[20]

Fig. 2 SEM photos of the surface-microstructured silicon^[20]

的关系,发现尖峰高度随飞秒激光通量的降低或脉冲持续时间的增加而降低。2006年,Tull等^[18]证明飞秒激光功率和脉冲数都对硅表面微观结构的制备有重要影响。2011年,上海理工大学的Peng等^[19]用实验证明:用飞秒激光在硅表面制备微观结构时,在相同的激光通量下,激光功率和脉冲数目之间存在一个最佳比例关系,可以在硅表面形成较高的尖峰。同年,他们通过使用两种不同波长的飞秒激光脉冲分别制备了微纳结构硅基光伏材料,如图2所示^[20]。用波长800 nm和400 nm的激光光源刻蚀硅表面,激光通量相同,图2中各图对应的参数为(a)波长800 nm,功率400 mW,脉冲数500;(b)波长800 nm,功率1200 mW,脉冲数167;(c)波长800 nm,功率2000 mW,脉冲数100;(d)波长400 nm,功率50 mW,脉冲数4000;(e)波长400 nm,功率100 mW,脉冲数2000;(f)波长400 nm,功率300 mW,脉冲数667。图2即为SEM所观察到的硅表面微结构图,观察角度均为倾斜45°。证明了在相同的激光通量下,激光的功率和脉冲数的比例对硅表面微结构的形成起决定性作用^[20]。

6) 偏振方向。

我们知道飞秒激光脉冲在SF₆或N₂环境中辐照硅表面可以形成锥状尖峰阵列。2000年,Her等^[2]研究了飞秒激光诱导硅表面尖峰结构的形成,发现该尖峰底部是非对称的形状,并且尖峰底部的方向随激光偏振方向而改变,但尖峰底部的短轴方向始终与激光偏振方向平行。2006年,Zhu等^[21]研究了尖峰形状随激光束偏振方向的变化,如图3所示,用圆偏振激光辐照,尖峰形状是圆锥形的;用线偏振激光辐照,尖峰是椭圆锥形的,而且长轴与激光束偏振方向垂直。

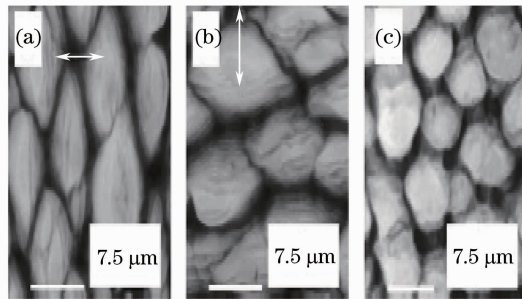


图3 N₂环境中(a),(b)线偏振激光束和(c)圆偏振激光束微构造的硅表面SEM图线(俯视图)。

箭头表示激光束偏振方向^[21]

Fig. 3 SEM images (top view) of silicon surface micro-structured by (a), (b) linearly polarized laser beam and (c) circularly polarized beam in ambient gas of N₂. The arrows indicate the polarization of laser beam^[21]

3.1.2 背景环境

早在1998年,Her等^[1]就研究了周围气体对硅表面尖峰形成的影响,发现在SF₆或Cl₂中用飞秒激光辐照硅表面有圆锥形尖峰的形成,而在真空、N₂或He中用飞秒激光辐照硅表面却没有此类尖峰结构。2004年,Shen等^[22]用400 nm、100 fs的激光脉冲在水中辐照硅表面制备出了亚微米尖峰,这些尖峰不到1 μm高,宽约200 nm,比在气体或真空中用飞秒激光制备的尖峰小一到两个数量级。他们研究了尖峰的化学成分,发现该尖峰由表面有20 nm厚氧化层的硅组成。2006年,中国科学院西安光学精密机械研究所的门海宁等^[3]在研究飞秒激光作用下的硅表面微结构时,比较了样品在空气中、浸泡于质量分数分别为0.1%和1%的硫酸溶液中的不同效果,发现在硫酸溶液中加工后的样品明显比在空气背景中的样品颜色更深,扫描电子显微镜下观察到的表面微结构的变化更为显著。同年,中国计量科学研究所的李平等^[23]研究了气体氛围对飞秒激光脉冲作用下硅表面微构造的影响,发现只有在SF₆气体中生成了准规则排列的微量级锥形尖峰结构,在其他气体氛围(真空、氮气、空气)中生成不规则排列的钝的柱状或者扁球状突起。2010年,西南科技大学的袁春华等^[24]利用钛宝石飞秒激光脉冲对单晶硅在SF₆、空气和真空环境中进行了累积脉冲辐照,研究了硅表面微结构的演化,发现真空、SF₆和空气三种环境下微结构的形成及表面形貌主要由激光烧蚀、化学刻蚀和氧化决定。对比空气、SF₆和真空中的微结构发现,尖峰的数量依次减小;SF₆中形成的尖峰高度最大,其次为真空,再次为空气。

3.1.3 杂质

2013年,河南师范大学的马鹏飞等^[25]利用相同能量密度的飞秒激光对两种不同的单晶硅片进行扫描刻蚀,研究了杂质在超短脉冲激光对材料辐照过程中的作用,发现激光辐照对材料造成的损伤受到晶体内部固有杂质缺陷的影响,并且杂质的存在可以加剧辐照损伤。

3.1.4 温度

2012年,柳岩等^[26]在不同温度下利用钛宝石激光器输出的飞秒激光脉冲(脉宽42 fs,中心波长800 nm,最大单脉冲能量3.6 mJ),通过扫描方式在硅表面诱导产生表面微结构。研究发现:随着温度升高,形成的微结构区域减小,飞秒激光诱导形成硅表面微结构的能量阈值升高。这对于研究飞秒激光与物质的相互作用和将来实现硅表面微结构的制备有重要意义。

3.2 飞秒激光作用下硅表面微结构的发光特性

近年来有关飞秒激光辐照单晶硅制备的黑硅的发光特性成为了研究的热点,并且大多在可见光区域观察到了发光带,不同的研究结果中发光带的位置虽然有所不同,但发光机制却基本相同。而近来,随着研究手段日趋成熟,在红外区域也观察到了较强的光致发光带。

2002年,Wu等^[6]用中心波长800 nm、脉宽100 fs、重复频率1 kHz的飞秒激光在空气中辐照硅表面制备微结构,并观察到了来自SiO₂的可见光致发光。发光显示了两个带,即一个与缺陷有关的绿带和一个与量子限制相关的红带。该发光强度随着氧含量的增加而增强,而不像多孔硅的发光在氧化作用下降解。2006年,门海宁等^[3]研究了飞秒激光作用下的硅表面微结构及发光特性,发现飞秒激光扫描扩展了样品的荧光激发波长,有效提高了样品的吸收效率和荧光发光相对强度(超过扫描前发光相对强度的2倍),并且扫描前硅样品发射谱为单峰,扫描后发射谱为双峰,在室温下放置一个月,其光学特性也没发生变化。2008年,Serpenguzel等^[27]研究了在空气中用飞秒激光照射硅片制成的黑硅在室温和低温下的光致发光特性,发现该光致发光强度随温度的升高而降低,并观察到了该黑硅的室温可见和近红外光致发光。2011年,Chen等^[28]研究了在空气中用800 nm、250 kHz的飞秒激光制备的黑硅的光致发光,他们通过改变扫描速度和飞秒激光功率控制在橙带(600 nm)和红带(接近680 nm)之间的光致发光带的形成。由于高重复率飞秒激光的热量积累,甚至不需要退火就可以观察到黑硅表面光诱导的微结构的红带光致发光。在532 nm连续激光辐照下橙带光致发光很容易淬灭,红带光致发光就更稳定了,这分别归因于“缺陷发光”和“量子限制效应”。2013年,复旦大学的Lü等^[29]第一次观察到了在SF₆气体环境中用飞秒激光辐照制备并进行快速热退火处理的黑硅的强红外光致发光,而未退火样品则没有光致发光,该发光是源于位错相关的发光而与硫相关的杂质中心发光无关。以上研究成果极大地促进了用于硅基光电子领域的黑硅的研究进展。

4 飞秒激光诱导硅材料表面微纳复合结构的生物仿生特性

飞秒激光诱导硅材料表面微纳复合结构具有生物仿生特性,如超疏/亲水特性等,在微电子、微流控和组织工程等领域均具有重要应用。

生物材料的疏水表面给了人们许多启发,例如,荷叶表面的超疏水性质和自清洁功能是由表面上微米乳突结构和表面蜡质层共同作用的结果。荷叶表面微米乳突结构上还有纳米结构,这种微纳结构是实现表面超疏水性的根本原因,Patankar等^[30]据此构建了一种具有“二级复合结构的柱形沟槽”模型,认为这样的多级结构更有利于实现超疏水特性。

Zorba等^[31-33]在这方面做了专门研究,提出了一种基于飞秒激光构造硅片表面制备稳定的超疏水样品的简单方法。激光加工在硅表面产生二级复合结构,并随着激光能量密度的增加而更明显。该结构在可湿性方面具有双重效果:低能量密度下,纳米级粗糙结构受到限制,液体可以渗透进固体表面的凹陷处,增大了液滴的摩擦力并降低了滑行速度;高能量密度下,该二级复合结构更明显了,液体下面有残余的空气,固体表面变得超疏水,并且增强了液滴的滑行。因此,通过选择性加工固体表面,可以利用激光加工来控制液滴的运动、滑行和制动。加工过程的简便和激光束扫描模式的灵活性,使得该技术在微流控和自动清洗表面方面的应用非常有前景。

5 结束语

本文阐述了超短脉冲诱导硅材料表面深亚波长结构的形成机理,讨论了飞秒激光作用硅表面制备微纳结构过程中的影响因素和微结构的发光特性。介绍了飞秒激光诱导硅材料表面微纳复合结构的生物仿生特性。利用飞秒激光在一定气压的气体环境里照射硅材料的表面可以生成微纳米结构,从而改善硅材料的吸收效率和光电转换效率。这种微纳结构硅为半导体的应用开辟了新的可能性,相信将来飞秒激光在硅表面微结构的制备中会有更重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Her T H, Finlay R J, Wu C, *et al.*. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(12): 1673–1675.
- 2 Her T H, Finlay R J, Wu C, *et al.*. Femtosecond laser-induced formation of spikes on silicon [J]. *Appl Phys A*, 2000, 70(4): 383–385.
- 3 Men Haining, Cheng Guanghua, Sun Chuandong. Microstructure and fluorescence property of silicon fabricated by femtosecond laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1081–1084.
门海宁, 程光华, 孙传东. 飞秒激光作用下的硅表面微结构及发光特性[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1081–1084.
- 4 Halbwax M, Sarnet T, Delaporte P, *et al.*. Micro and nano-structuration of silicon by femtosecond laser: application to silicon photovoltaic cells fabrication [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(20): 6791–6795.
- 5 Huang Z, Carey J E, Liu M, *et al.*. Microstructured silicon photodetector [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(3): 033506.
- 6 Wu C, Crouch C H, Zhao L, *et al.*. Visible luminescence from silicon surfaces microstructured in air [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(11): 1999–2001.
- 7 Emmony D C, Howson R P, Willis L J. Laser mirror damage in germanium at 10.6 μm [J]. *Appl Phys Lett*, 1973, 23(11): 598–600.
- 8 Guo Xiaodong, Li Ruxin, Yu Bingkun, *et al.*. Recent developments in nanostructures on material surface induced by femtosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(8): 3–12.
郭晓东, 李儒新, 余昺鲲, 等. 飞秒激光诱导材料表面纳米结构研究新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(8): 3–12.
- 9 Jia T Q, Chen H X, Huang M, *et al.*. Formation of nanogratings on the surface of a ZnSe crystal irradiated by femtosecond laser pulses [J]. *Phys Rev B*, 2005, 72(12): 125429.
- 10 Wang Li, Ding Ting, Qiu Jianrong. Phenomena and mechanisms of single beam femtosecond laser induced periodic microstructures [J]. *Physics*, 2007, 36(1): 63–67.
王 丽, 丁 婷, 邱建荣. 单光束飞秒激光诱导微纳周期结构的现象与机理[J]. *物理*, 2007, 36(1): 63–67.
- 11 Chen Changshui, He HuiLi, Li Jianghua, *et al.*. The research and application of ultrafast laser microstructured silicon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030003.
陈长水, 何慧丽, 李江华, 等. 超快激光微构造硅的研究与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030003.
- 12 Manickam S, Venkatakrishnan K, Tan B, *et al.*. Study of silicon nanofibrous structure formed by femtosecond laser irradiation in air [J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 13869–13874.
- 13 Ruan Zhaosong, Peng Yan, Zhu Yiming, *et al.*. Influence of the number of femtosecond laser pulses on femtosecond laser ablation silicon surface producing micro-nano structure [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(2): 245–248.
阮召松, 彭 滢, 朱亦鸣, 等. 飞秒激光烧蚀硅表面产生微纳结构过程中激光脉冲数目的影响[J]. *光学技术*, 2011, 37(2): 245–248.
- 14 Peng Y, Hong M, Zhou Y, *et al.*. Influence of femtosecond laser pulse number on spike geometry of microstructured silicon [J]. *Appl Phys Express*, 2013, 6(5): 051303.
- 15 Wen Ya, Peng Yan, Zhang Dongsheng, *et al.*. Effect of pulse energy of femtosecond laser on the formation of spikes on the silicon surface in the ambient gas of SF₆ [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0406001.
温 雅, 彭 滢, 张冬生, 等. 飞秒激光脉冲能量对 SF₆ 气体环境下硅表面尖峰结构形成的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0406001.
- 16 Ma Pengfei, Wang Kedong, Chang Fanggao, *et al.*. Effects of the irradiation on silicon by femtosecond laser of various energy densities [J]. *J Synthetic Crystals*, 2013, 42(2): 273–277.
马鹏飞, 王克栋, 常方高, 等. 不同能量密度的飞秒激光辐照对单晶硅的影响研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(2):

273–277.

- 17 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.
- 18 Tull B R, Carey J E, Mazur E, *et al.*. Silicon surface morphologies after femtosecond laser irradiation [J]. *MRS Bulletin*, 2006, 31(8): 626–633.
- 19 Peng Y, Wen Y, Zhang D S, *et al.*. Optimal proportional relation between laser power and pulse number for the fabrication of surface-microstructured silicon [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(24): 4765–4768.
- 20 Peng Yan, Wen Ya, Zhang Dongsheng, *et al.*. Effect of the relation between femtosecond laser power and pulse number for fabricating surface-microstructured silicon [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1203005.
彭 艳, 温 雅, 张冬生, 等. 飞秒激光功率与脉冲数的比例关系对制备硅表面微结构的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1203005.
- 21 Zhu J T, Shen Y F, Li W, *et al.*. Effect of polarization on femtosecond laser pulses structuring silicon surface [J]. *Appl Surf Sci*, 2006, 252(8): 2752–2756.
- 22 Shen M Y, Crouch C H, Carey J E, *et al.*. Femtosecond laser-induced formation of submicrometer spikes on silicon in water [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(23): 5694–5696.
- 23 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin, *et al.*. Study of silicon on micro-structuring using ultra-short laser pulse [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(12): 1688–1691.
李 平, 王 煜, 冯国进, 等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(12): 1688–1691.
- 24 Yuan Chunhua, Li Xiao hong, Tang Duochang, *et al.*. Silicon surface microstructures induced by femtosecond laser pulses in different background gases [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2010, 22(11): 2749–2753.
袁春华, 李晓红, 唐多昌, 等. 不同气氛下飞秒激光诱导硅表面微结构[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2749–2753.
- 25 Ma Pengfei, Liu Zhongshan, Chang Fanggao, *et al.*. Irradiated damages of femtosecond laser in two different monocrystalline silicon wafers [J]. *J Synthetic Crystals*, 2013, 42(1): 99–104.
马鹏飞, 刘中山, 常方高, 等. 飞秒激光对两种不同的单晶硅的辐照损伤研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(1): 99–104.
- 26 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 焜, 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.
- 27 Serpenguzel A, Kurt A, Inanç I, *et al.*. Luminescence of black silicon [J]. *J Nanophotonics*, 2008, 2(1): 021770.
- 28 Chen T, Si J, Hou X, *et al.*. Luminescence of black silicon fabricated by high-repetition rate femtosecond laser pulses [J]. *J Appl Phys*, 2011, 110(7): 073106.
- 29 Lü Q, Wang J, Liang C, *et al.*. Strong infrared photoluminescence from black silicon made with femtosecond laser irradiation [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(8): 1274–1276.
- 30 Patankar N A. Transition between superhydrophobic states on rough surfaces [J]. *Langmuir*, 2004, 20(17): 7097–7102.
- 31 Zorba V, Persano L, Pisignano D, *et al.*. Making silicon hydrophobic: wettability control by two-lengthscale simultaneous patterning with femtosecond laser irradiation [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(13): 3234–3238.
- 32 Zorba V, Stratakis E, Barberoglou M, *et al.*. Biomimetic artificial surfaces quantitatively reproduce the water repellency of a lotus leaf [J]. *Adv Mater*, 2008, 20(21): 4049–4054.
- 33 Zorba V, Stratakis E, Barberoglou M, *et al.*. Tailoring the wetting response of silicon surfaces via fs laser structuring [J]. *Appl Phys A*, 2008, 93(4): 819–825.