

利用飞秒激光辐照结合湿法腐蚀方法制备高纵横比全硅槽的研究

李艳娜^{1,2} 陈 涛^{1*} 潘 安¹ 司金海¹ 侯 洵¹

¹西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049

²西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

摘要 利用飞秒激光辐照结合湿法腐蚀方法,制备了高纵横比硅基狭槽。首先利用透镜聚焦飞秒激光至硅片表面,在硅内部诱导结构变化;再结合氢氟酸(HF)溶液选择性腐蚀去除结构变化区域,从而制备出高纵横比硅基狭槽;最后,通过光学显微镜和扫描电子显微镜对狭槽形貌进行表征,研究了狭槽纵横比对激光加工条件如激光功率、扫描速率和数值孔径的依赖特性。结果表明,激光加工条件对于制备高纵横比硅基狭槽存在最优选择。通过优化激光加工参数,可制备出深度为291 μm ,纵横比为25.3的硅基狭槽。相对于显微物镜,透镜的工作距离较大,加工过程可以避免镜片污染,且具有成本低,通光孔径大等优点。

关键词 超快光学; 飞秒激光; 硅基狭槽; 湿法腐蚀; 透镜

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0103007

Fabrication of High-Aspect-Ratio All-Silicon Grooves Using Femtosecond Laser Irradiation and Wet Etching

Li Yanna^{1,2} Chen Tao¹ Pan An¹ Si Jinhai¹ Hou Xun¹

¹School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

²Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract A simple method of fabricating high-aspect-ratio all-silicon grooves using lens-focused femtosecond laser irradiation and wet etching is demonstrated. Firstly femtosecond laser is focused on silicon surface to induce structural changes inside silicon. Then laser-induced structural change regions are selectively removed by hydrofluoric acid (HF) etching to form high-aspect-ratio silicon grooves. Finally, optical microscope and a scanning electronic microscope are employed to characterize the morphology of the grooves, respectively. The dependences of the grooves aspect ratios on the laser irradiation parameters, such as the laser average power, scanning velocity and the lens numerical aperture, are investigated. By optimizing the laser irradiation parameters, grooves with depth of 291 μm and aspect ratio of 25.3 are produced. Compared with microscope objective lens, lens owns longer working distance, which can keep it from being polluted by the debris erupting from specimen during laser irradiation. Besides, lens has the advantages of low cost and large aperture.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; all-silicon groove; wet etching; lens

OCIS codes 320.2250; 230.4000; 350.3850; 160.6000

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(11204236, 61235003, 61308006)、中国博士后科学基金(2013M542351)

作者简介: 李艳娜(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光微纳加工方面的研究。E-mail: liyanna@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 司金海(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事超快非线性光学和超快成像、飞秒激光微纳加工等方面的研究。

E-mail: jinhaisi@mail.xjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: Tchen@mail.xjtu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

单晶硅是半导体产业重要的材料,硅基高纵横比狭槽和微纳结构在微流路器件、太阳能电池以及红外光电探测器等方面有着重要的应用前景。通常,人们利用等离子体刻蚀等工艺制备高纵横比硅基狭槽,并将其成功地应用于半导体器件中的硅基贯通结构^[1]、微传感器^[2]、光子晶体结构^[3]、微化学反应器^[4]等领域。然而,等离子体刻蚀加工成本高昂,刻蚀速率低,且加工环境较苛刻,需要掩膜辅助刻蚀,实验流程相对复杂^[5-6]。激光直写技术由于具有灵活性好、精度高的特点,在半导体微纳结构的刻蚀中有着广泛的应用。传统的连续激光或长脉冲激光加工过程伴随着较大的热效应,影响了加工的微结构质量。飞秒激光具有极短的脉冲持续时间和极高的峰值功率,当其应用于材料的加工和处理时,有着长脉冲加工技术不可比拟的优点,比如能够实现超精细加工、“冷”加工及真三维加工等,在微纳加工领域引起了广泛的关注^[7]。利用飞秒激光直写技术可直接在硅片上制备出纵横比为10的狭槽结构^[8]。然而由于激光烧蚀产生的残留物会阻挡激光能量向硅内部传输^[9-10],因此利用飞秒激光直写技术很难制备出高纵横比的深硅槽。此外,激光辐照过程中氧会被掺入激光辐照区域而引入杂质^[11],不利于狭槽在半导体器件或微流路器件中应用。

最近,课题组利用显微物镜聚焦飞秒激光辐照硅基表面,发现在辐照区域沿着激光能量的传播方向产生了较深的结构变化^[12-13],且结构变化区域的纵横比较高,元素分析表明氧元素被引入到结构变化区域以硅的氧化物的形式存在。进一步,我们将飞秒激光辐照和化学腐蚀方法结合起来,利用氢氟酸(HF)溶液选择性腐蚀去除结构变化区域,从而制备出纵横比达44的全硅基狭槽^[14]。由于利用飞秒激光进行硅材料的微加工过程中会有大量的碎屑溅出,而显微物镜的工作距离较短,溅射物极易对物镜造成污染。相比较而言,透镜的工作距离较长,加工过程产生碎屑基本不会污染镜片,且透镜具有成本低,通光孔径大的优势,在飞秒激光微加工领域具有更好的应用前景。

本文开展了利用透镜聚焦飞秒激光辐照结合湿法腐蚀方法制备高纵横比硅基狭槽的研究。利用中心波长为800 nm的飞秒激光经过透镜聚焦在硅基底上诱导产生材料结构变化,然后结合HF溶液选择性腐蚀去除结构变化区域,从而制备出全硅基狭槽。研究了狭槽纵横比对激光加工条件如激光功率、扫描速率和数值孔径(NA)的依赖特性,通过优化激光加工参数,制备出深度为291 μm ,纵横比为25.3的硅基狭槽。

2 实验流程

实验样品的加工工艺流程主要包括激光辐照和化学腐蚀两个步骤,如图1所示。实验所用激光光源为美国Coherent公司生产的Libra-USP-HE钛宝石再生脉冲放大系统,该系统能够产生中心波长为800 nm、脉冲宽度为50 fs、重复频率为1 kHz的激光脉冲。利用光学显微镜(Nikon eclipse lv100)和扫描电子显微镜(SEM, FEI Quanta 250 FEG Serials)对样品上制备出的结构形貌进行表征。

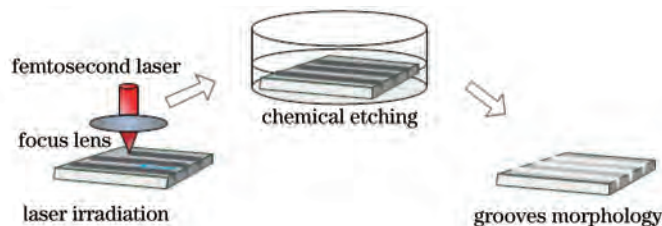


图1 飞秒激光加工制备硅基狭槽的实验流程图

Fig.1 Technological process for the fabrication of the silicon-based grooves

实验前将待加工硅片依次放置在酒精、去离子水中分别超声清洗20 min后将其置于通风厨中风干以备使用。首先,利用透镜将飞秒激光聚焦到水平固定在三维移动平台上的硅片表面,通过聚焦激光辐照使硅内部诱导产生结构变化。实验中使用的是P型单晶硅,晶面为(100),电阻率为 $1\sim 5\ \Omega\cdot\text{cm}$,厚度为500 μm 。激光辐照的示意图如图1所示,蓝色箭头表示激光扫描方向。入射到样品的激光功率通过旋转可变衰减器进行调节,在三维移动平台的控制软件中可以设置需要的扫描速率、扫描间隔和聚焦深度。然后,将飞秒激光照射后的样品置于质量分数为20%的HF溶液中进行超声辅助化学腐蚀,腐蚀时间为120 min,去除结构变

化区域,形成狭槽结构。由于硅为不透明的材料,为了对飞秒激光在硅内部诱导微结构的变化进行表征,利用蓝宝石抛光纸将飞秒激光辐照后的硅样品沿激光扫描方向抛光到激光扫描线的任意长度处,从侧面进行观察。经过 HF 溶液腐蚀后,再次将样品侧面抛光到任意深长度处并观察制备出的高纵横比狭槽的截面形貌。每次抛光后均利用酒精和去离子水分别对样品进行超声清洗。实验中,在每一个加工条件下均加工 3 条狭槽,狭槽宽度取所有狭槽半深处宽度的平均值,狭槽深度取所有狭槽纵深的平均值,狭槽纵横比定义为狭槽深度与宽度比值。

实验中利用透镜或者显微物镜将飞秒激光聚焦在硅片表面并进行逐行扫描。所使用的透镜通光口径为 25.4 mm,入射光斑半径为 4 mm,设定的扫描间隔为 100 μm 。数值孔径是表征光学元件对光束的聚焦能力的重要参数,透镜的数值孔径为

$$NA = n \cdot \sin\left(\frac{a}{2}\right), \quad (1)$$

$$a = 2 \arctan\left(\frac{r}{f}\right), \quad (2)$$

式中 n 为硅与透镜间媒质的折射率, r 为入射在透镜上的光斑半径, f 为透镜焦距, a 为透镜的孔径角度。激光光束经透镜聚焦后光斑半径 r_0 为

$$r_0 = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi \cdot NA}, \quad (3)$$

式中 M^2 为激光束光束质量因子, λ 为激光波长。以焦距为 30 mm 的透镜为例,在空气中 $n=1$,计算得到数值孔径为 0.13,实验中使用的高斯光束的光束质量因子为 $M^2=1.3$,相应的聚焦光斑半径约为 2.54 μm 。

3 实验结果分析

3.1 透镜加工与显微物镜加工结果比较

图 2 为利用透镜和显微物镜聚焦飞秒激光诱导硅结构变化及经化学腐蚀后制备的狭槽形貌图。激光加工条件为:激光功率 $P=30.0 \text{ mW}$,扫描速率 $v=5 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,透镜焦距 $f=30 \text{ mm}$,其 $NA=0.13$,显微物镜的放大倍数为 5 $\times$,其 $NA=0.15$,工作距离为 23.5 mm。两者数值孔径非常接近。

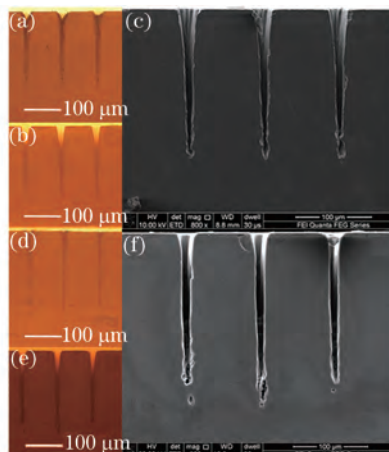


图 2 飞秒激光诱导硅结构变化及经化学腐蚀后制备的狭槽形貌。(a)和(b)为焦距 $f=30 \text{ mm}$ 的透镜聚焦飞秒激光加工硅片 HF 溶液腐蚀前和腐蚀后形成狭槽的光学显微镜图片,(c)为(b)相应的 SEM 图片;(d)和(e)为 5 $\times$ 物镜聚焦飞秒激光加工硅片 HF 溶液腐蚀前和腐蚀后形成狭槽的光学显微镜图,(f)为(e)相应的 SEM 图片

Fig.2 Morphology of structure changes and the chemical selective etching induced grooves. (a) and (b) Optical microscope images of structure change regions before and after chemical etching induced by lens ($f=30 \text{ mm}$) focused femtosecond laser, (c) SEM images of (b); (d) and (e) optical microscope images of structure change regions before and after chemical etching induced by microscope objective lens (5 $\times$) focused femtosecond laser, (f) SEM images of (e)

图 2(a)和(d)中的黑色部分分别为利用透镜($f=30 \text{ mm}$)和显微物镜(5 $\times$)聚焦飞秒激光辐照硅片后,在辐照区域沿着激光能量的传播方向产生的结构变化。两样品经氢氟酸腐蚀后的光学显微图像如图 2(b)和(e)所示。从

图中可以看出腐蚀后样品中黑色区域减少。进一步利用SEM对腐蚀后样品截面形貌进行观察可知,飞秒激光诱导的结构改变部分被腐蚀去除,形成了微槽,结果分别如图2(c)和(f)所示。图2(c)为利用透镜聚焦激光辐照后腐蚀加工出的狭槽,其平均深度和宽度分别为 $196\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10.1\text{ }\mu\text{m}$,其纵横比为19.4;图2(f)为利用显微物镜聚焦激光辐照后腐蚀加工出的狭槽,其平均深度和宽度分别为 $201\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10.5\text{ }\mu\text{m}$,其纵横比为19.1。可见利用数值孔径相似的透镜和显微物镜聚焦激光可以制备出形貌基本一致的狭槽。上述实验中由于样品侧面剖开,飞秒激光诱导的结构改变部分被HF溶液同时从狭槽顶部和侧面进行腐蚀。对于仅从狭槽顶部腐蚀的情况,经过足够长的腐蚀时间也可以获得类似的结构,但由于腐蚀液仅能从顶部进入,狭槽形成的腐蚀时间有所增加。

对于狭槽的形成机制可以做如下解释:经元素测量分析,在飞秒激光辐照区域诱导出含氧的结构变化区域,氧元素含量自顶部到底部逐渐减小^[14]。氧元素的掺入是由于在飞秒激光辐照区域,出现了悬空键,从而能够俘获氧原子^[15-16],杂质氧元素以硅的氧化物的形式存在于结构变化区域。当经过激光辐照的硅片置于HF溶液中时,HF溶液会腐蚀硅的氧化物生成可溶于水的产物,从而将结构变化区域去除。由于HF溶液与纯硅基本不发生反应,这种腐蚀具有较强的选择性,基于这种选择性能有效制备出高纵横比的狭槽结构^[17]。

3.2 狭槽纵横比与激光加工条件的依赖关系

由狭槽形成机理的分析可知,实验中刻蚀出的硅基狭槽由最初飞秒激光诱导的结构改变区域决定。进一步,研究了狭槽形貌对激光功率、扫描速率和透镜的NA等激光加工条件的依赖关系。

3.2.1 狭槽纵横比与激光功率的依赖关系

图3为狭槽截面形貌随激光功率的变化趋势图。激光加工条件为:透镜焦距 $f=50\text{ mm}$,其数值孔径 $NA=0.08$,扫描速率 $v=5\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由图3(a)可以看出,当激光功率增加时,狭槽深度和宽度均不断增大。这是由于入射激光光强呈高斯分布,当扫描速度一定时,随着激光功率的增加,光斑的有效烧蚀面积也会随之增大,从而会增大狭槽宽度。当激光功率增加时,硅吸收的激光能量也增多,则制备的狭槽深度随之增大。而狭槽深度增加幅度大于宽度的增幅,因此狭槽纵横比也呈增大趋势,如图3(b)所示。

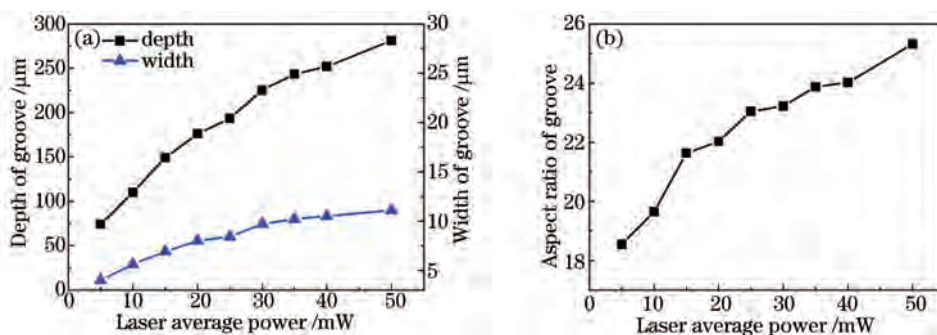


图3 狭槽截面形貌与激光功率的依赖关系。(a) 狭槽纵深、宽度与激光功率的依赖关系;

(b) 狭槽纵横比与激光功率的依赖关系

Fig.3 Influences of laser average power on (a) groove depths and width and (b) aspect ratio of groove

3.2.2 狭槽纵横比与激光扫描速率的依赖关系

图4为狭槽截面形貌随激光扫描速率的变化趋势图。激光加工条件为:透镜焦距 $f=50\text{ mm}$,其数值孔径 $NA=0.08$,激光功率 $P=30\text{ mW}$ 。

由图4(a)可知,当扫描速率增加时,狭槽的深度迅速减小,而狭槽的宽度基本不变。这是由于激光诱导微结构区域在横向的尺度由光斑中超过阈值部分的宽度决定,当激光功率一定时,飞秒激光诱导的狭槽宽度基本不变。当扫描速率增加时,在硅材料内单位面积上累积的激光能量减小,导致诱导的折射率变化结构深度减少,从而狭槽深度减少,进而狭槽的纵横比降低,如图4(b)所示。

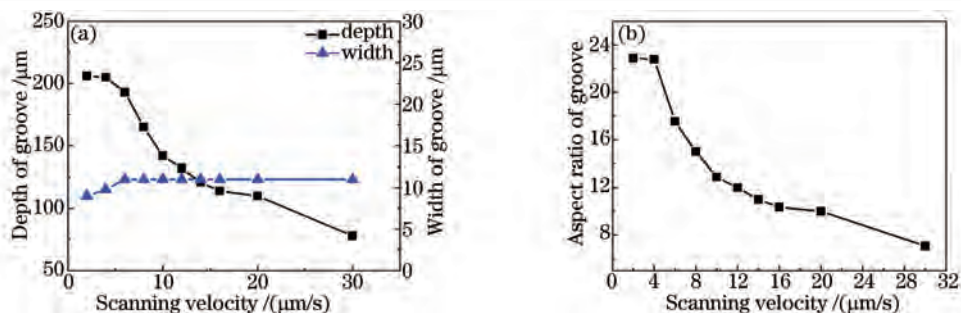


图4 狭槽截面形貌与激光扫描速率的依赖关系。(a) 狭槽纵深、宽度与扫描速率的依赖关系;

(b) 狭槽纵横比与扫描速率的依赖关系

Fig.4 Influences of scanning velocity on (a) groove depth and width and (b) aspect ratio of groove

3.2.3 狭槽纵横比与数值孔径的依赖关系

图5为狭槽截面形貌随数值孔径的变化趋势图。激光加工条件为:激光功率 $P=50\text{ mW}$,扫描速率 $v=5\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验中使用焦距 f 分别为120 mm ($NA=0.03$), 100 mm ($NA=0.04$), 50 mm ($NA=0.08$), 30 mm ($NA=0.13$) 透镜和 $5\times$ 显微物镜($NA=0.15$)聚焦飞秒激光进行加工。

由图5(a)可以看出,随着 NA 由0.03增加到0.15,狭槽深度先增加后减小,在 $NA=0.08$ 时达到最大,约为280 μm 。而狭槽宽度先逐渐减小,当 NA 从0.04逐渐增加到0.15时,狭槽宽度几乎不变,约为15 μm 。这种现象产生的原因可以理解如下:利用透镜或者显微物镜聚焦激光光束时,由(3)式可知 NA 越小,焦平面聚焦光斑尺寸越大,焦深也越大。对于制备狭槽的深度来说,随着 NA 的减小,焦深的增加促使狭槽深度呈现递增趋势(NA 从0.15降到0.08)。另一方面,随着 NA 的减小,聚焦光斑尺寸变大,辐照在硅内部的激光功率密度降低,当 NA 小到一定程度时,会使得达到硅破坏阈值的深度减小,从而狭槽深度减小(NA 从0.08降到0.03)。飞秒激光诱导结构变化的宽度是由激光的横向能量分布决定。当激光功率与扫描速率一定时,飞秒激光在硅材料接近表面处的损伤线宽主要由光斑大小决定, NA 越大,激光焦点的直径越小,加工出狭槽宽度越小。但飞秒激光在硅内部诱导产生深的高纵横比结构时其传输受到非线性效应(例如自陷效应)的影响^[11],由此导致当透镜的 NA 从0.04增加到0.15时,所加工出狭槽的宽度变化不大。

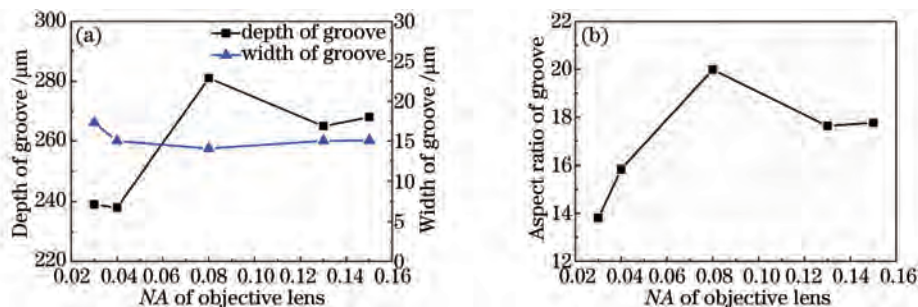


图5 狭槽截面形貌与 NA 的依赖关系。(a) 狭槽纵深、宽度与 NA 的依赖关系;(b) 狭槽纵横比与 NA 的依赖关系

Fig.5 Influences of lens NA on (a) groove depths and widths and (b) aspect ratio of groove

根据图5(a)中结果计算出相应的狭槽纵横比随聚焦透镜 NA 的变化,如图5(b)所示。当 NA 从0.03增加到0.15时,狭槽纵横比先增大后减小。当 $NA=0.08$ 时,狭槽纵横比达到最大为20。根据文献[14],利用显微物镜加工时,在 $NA=0.15$ 和 $NA=0.3$ 条件下加工出的狭槽纵横比相差不大,而当 $NA>0.3$ 时加工狭槽的纵横比迅速减小。因此利用飞秒激光辐照结合湿法腐蚀制备高纵横比深硅槽时,适合采用较小数值孔径($NA<0.3$)的透镜或者显微物镜进行聚焦^[18],用于制备半导体器件中的隔离槽、微流路器件以及微传感器梳状结构等^[19-22]。相对而言,具有大数值孔径的显微物镜可加工出的微结构的宽度更窄^[18,23],而深度相对浅,更适合用于宽度在亚微米量级的硅基光子晶体^[24-25]或硅基表面薄膜光子晶体结构^[26]的制备。利用 $NA=0.08$ 的透镜取代比其数值孔径更大的 $5\times$ 显微物镜,不仅加工出狭槽的宽度相差不大,还可以获得更高的纵横比,而该透镜的焦距为50 mm,明显大于 $5\times$ 显微物镜工作距离(23.5 mm),可以避免飞秒激光加工时喷射材料的污染。

4 结 论

开展了利用透镜聚焦飞秒激光辐照硅,结合湿法腐蚀方法制备高纵横比硅基狭槽的研究。利用透镜聚焦飞秒激光辐照硅基表面,在硅内部诱导结构变化区域后,采用HF溶液选择性地去除结构变化部分,从而制备出高纵横比的全硅基狭槽。研究得到了狭槽纵横比与激光加工条件的依赖关系:狭槽的宽度、深度和纵横比均随着激光功率的增加而增大;狭槽的深度和纵横比随着扫描速率的增加而减小,随着NA的增加先增大后减小。为制备高纵横比的硅基狭槽,应该综合考虑透镜NA、激光功率和扫描速率等激光加工条件。

利用飞秒激光辐照结合湿法腐蚀方法制备高纵横比深硅槽时,适合采用透镜或者小的数值孔径($NA < 0.3$)的显微物镜进行聚焦。而使用透镜可以获得更大工作距离以避免加工过程产生的碎屑对镜片造成污染。此外透镜具有成本低,通光孔径大的优势,能够采用多光束并行加工的方式提高加工效率,在飞秒激光微加工领域具有更好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Ito T, Karahashi K, Kang S Y, *et al.*. Characteristics of silicon etching by silicon chloride ions[J]. J Vac Sci Tech A, 2013, 31(3): 031301.
- 2 Astrova E V, Tolmachev V A, Fedulova G V, *et al.*. Optical properties of one-dimensional photonic crystals fabricated by photo-electrochemical etching of silicon[J]. Appl Phys A, 2010, 98(3): 571-581.
- 3 Barillaro G, Strambini L M, Annovazzi-Lodi V, *et al.*. Optical characterization of high-order 1-D silicon photonic crystals[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2009, 15(5): 1359-1367.
- 4 Hendry E, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L, *et al.*. Optical control over surface plasmonpolariton assisted THz transmission through a slit aperture[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(12): 123901.
- 5 McAuley S A, Ashraf H, Atabo L, *et al.*. Silicon micromachining using a high-density plasma source[J]. J Phys D, 2001, 34(18): 2769-2774.
- 6 Yongqi Fu, Ngoi Kok Ann Bryan. Fabrication of three-dimensional microstructures by two-dimensional slice by slice approaching via focused ion beam milling[J]. J Vac Sci Technol B, 2004, 22(4): 1672-1678.
- 7 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.
- 8 Crawford T H R, Borowiec A, Haugen H K. Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses[J]. Appl Phys A, 2005, 80(8): 1717-1724.
- 9 Aglyamov S R, Karpouk A B, Bourgeois F, *et al.*. Ultrasound measurements of cavitation bubble radius for femtosecond laser-induced breakdown in water[J]. Opt Lett, 2008, 33(12): 1357-1359.
- 10 Vogel A, Linz N, Freidank S, *et al.*. Femtosecond-laser-induced nanocavitation in water: implications for optical breakdown threshold and cell surgery[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(3): 038102.
- 11 Pan An, Si Jinhai, Chen Tao, *et al.*. Fabrication of high-aspect-ratio grooves in silicon using femtosecond laser irradiation and oxygen-dependent acid etching[J]. Opt Express, 2013, 21(14): 16657-16662.
- 12 Ma Yuncan, Shi Haitao, Si Jinhai, *et al.*. High-aspect-ratio grooves fabricated in silicon by a single pass of femtosecond laser pulses [J]. J Appl Phys, 2012, 111(9): 093102.
- 13 Li C, Shi X, Si J, *et al.*. Photoinduced multiple microchannels inside silicon produced by a femtosecond laser[J]. Appl Phys B, 2010, 98(2-3): 377-381.
- 14 Ma Yuncan, Pan An, Si Jinhai, *et al.*. A simple method for fabrication of high-aspect-ratio all-silicon grooves[J]. Appl Surf Sci, 2013, 284(50): 372-378.
- 15 Izawa Y, Setuhara Y, Fujita M, *et al.*. Ultrathin amorphous Si layer formation by femtosecond laser pulse irradiation[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(4): 044107.
- 16 Crawford T H R, Yamanaka J, Botton G A, *et al.*. High-resolution observations of an amorphous layer and subsurface damage formed by femtosecond laser irradiation of silicon[J]. J Appl Phys, 2008, 103(5): 053104.
- 17 Pande A A, Mui D S L, Hess D W. SiO₂ etching with aqueous HF: design and development of a laboratory-scale integrated wet etch/

- dry reactor[J]. IEEE T Semiconduct M, 2011, 24(1): 104–116.
- 18 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
夏 博, 姜 澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
- 19 Ogawa S, Soda S, Lee SS, *et al.*. RF-MEMS switch with through-silicon via by the molten solder ejection method[J]. Sens Actuat A, 2012, 181: 77–80.
- 20 Wang X, Zeng W, Lu G, *et al.*. High aspect ratio Bosch etching of sub-0.25 μm trenches for hyperintegration applications[J]. J Vac Sci Tech B, 2007, 25(4): 1376–1381.
- 21 W Ong, J Kee, A Ajay, *et al.*. Buried microfluidic channel for integrated patch-clamping assay[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(9): 093902.
- 22 R Hintsche, Ch Kruse, A Uhlig, *et al.*. Chemical microsensor systems for medical applications in catheters[J]. Sens Actuat B, 1995, B27(1–3): 471–473.
- 23 Yuan D Q, Zhou M, Cai L, *et al.*. Processing microstructure on film by femtosecond laser[J]. Optica Applicata, 2009, 39(3): 629–635.
- 24 Tolmachev V A, Astrova E V, Pilyugina J A, *et al.*. 1D photonic crystal fabricated by wet etching of silicon[J]. Opt Mater, 2005, 27(5): 831–835.
- 25 Zhou C Z, Wang C, Li Z Y. Fabrication and spectra-measurement of high Q photonic crystal cavity on silicon slabs[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 014214.
周长柱, 王 晨, 李志远. 硅基二维平板光子晶体高 Q 微腔制作和光谱测量[J]. 物理学报, 2012, 61(1): 014214.
- 26 W L Barnes, A Dereux, T W Ebbesen. Surface plasmon sub-wavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(14): 824–830.

栏目编辑: 张 雁