

doi:10.3788/gzxb20134205.0515

飞秒激光多光束干涉光刻硅表面减反微结构

贺锋涛¹, 周强^{1,2a}, 杨文正^{2b}, 龙学文^{2a}, 白晶^{2a}, 程光华^{2a}

(1 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 a. 瞬态光学与光子技术国家重点实验室;

b. 中国科学院超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

摘要:为了得到均匀分布的硅表面微结构,提出了一种利用多束激光干涉光刻的方法来实现对硅表面微结构分布特征的控制.利用空间光调制器实现飞秒激光多光束干涉,形成分布均匀、周期可控的空间点阵,利用聚焦的空间点阵在单晶硅表面烧蚀得到规则分布的凹坑状结构,并通过改变附加给空间光调制器的相位实现对微结构分布特征及间距的控制.用扫描电子显微镜和分光光度计分别对结构的形貌特征和光学特性进行了测量,结果表明:采用底角为 2° 的四棱锥镜相位形成四光束干涉,通过 $10\times$ 物镜聚焦,在激光功率 25 mW、曝光时间 30 s 时,可以形成间距约为 $3.3\ \mu\text{m}$ 的密排凹坑微结构,所形成的凹坑结构具有良好的减反效果,在 $1.2\sim 2\ \mu\text{m}$ 近红外波段的透过率相对抛光硅平均提高了 11.5%.

关键词:飞秒激光;空间光调制器;多光束干涉;单晶硅;减反微结构

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)05-0515-6

Femtosecond Laser Multi-beam Interference Lithography Anti-reflective Microstructure on Silicon Surface

HE Feng-tao¹, ZHOU Qiang^{1,2a}, YANG Wen-zheng^{2b}, LONG Xue-wen^{2a},
BAI Jing^{2a}, CHENG Guang-hua^{2a}

(1 School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post & Telecommunication, Xi'an 710121, China)

(2a. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics; b. Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology of CAS, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to obtain uniform distribution silicon surface microstructure, a new method was proposed based on multi-beam interference lithography to relaise the controlling of the distribution character of the microstructure. Femtosecond laser multi-beam interference was formed by Spatial Light Modulator (SLM), and the uniform distribution multi-spots with the controllable period were generated. By using these multi-spots, the regular distribution concave structures were fabricated on silicon surface, and the distribution character and period was flexibly controlled by shift the phase masks on SLM. The morphology and optical character of the microstructure were measured with Scanning Electron Microscopy (SEM) and spectrophotometer. Experimental results show that the close-packed concave structure with the period of about $3.3\ \mu\text{m}$ can be fabricated on the silicon surface under special parameters ($10\times$ focusing lens, laser power of 25 mW, exposing time of 30 s) by loading the phase of 4-facet pyramid lens with the base angle of 2° ; the formed structure shows good effect of anti-reflection;

基金项目:中科院 2010 年西部之光人才培养计划和中科院知识创新工程重点方向项目(No. KG CX2-YW-399+10)资助

第一作者:贺锋涛(1974-),男,副教授,博士,主要研究方向为激光成像关键技术及光电传感信息处理技术. Email:hefengtao@xupt.edu.cn

通讯作者:程光华(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向飞秒激光加工技术. Email:gcheng@opt.ac.cn

收稿日期:2012-12-14;录用日期:2013-02-21

its transmission at the near infrared band of $1.2\sim 2\ \mu\text{m}$ enhances 11.5% in comparison with the polished silicon.

Key words: Femtosecond laser; Spatial light modulator; Multi-beam interference; Single crystal silicon; Anti-reflective microstructure

0 引言

飞秒激光以其高加工准确度、低热效应等优点在众多领域有着广泛的应用. 近年来, 利用飞秒激光处理单晶硅以降低其表面反射率成为研究的热点. 当飞秒激光作用于单晶硅表面, 达到一定阈值后, 在辐射区域会形成微结构. 这种微结构会导致硅表面受光面积增大, 同时使入射光在相邻结构的侧壁间多次反射, 形成“陷光效应”; 此外微结构的形成使空气与材料基底交界面处的折射率突变转化为折射率渐变, 从而降低了反射率^[1]. Harvard 大学的 Mazur 小组对微结构的形成过程进行了详细的研究, 他们发现微结构起源于硅表面受到激光辐射时形成的波纹状结构, 其尺寸和密集程度都与辐射激光波长有关^[2-3]. 但是由于激光诱导微结构的形成过程是自发的, 所以形成的微结构往往分布随机杂乱, 疏密程度也难以控制.

为了实现对微结构分布特征的控制, 对辐射激光的场分布进行调制是一种可行的办法. Mazur 小组通过在硅表面放置金属网格掩模板来调制辐射激光, 形成了与网格具有相似特征的微结构^[4], 但是这种方法灵活性差, 得到的结构均匀性也一般. Hiroshi Imamoto 等利用全息的方法在硅表面烧蚀出了凹坑状结构^[5], 形成的结构分布比较均匀, 并且对红外波段的透过率有着显著的提高, 但是全息图的形成和优化过程却十分复杂, 而且全息的方法往往难以得到均匀的点阵分布^[6]. 干涉同样可以实现对激光的周期性调制, 利用双光束干涉形成的周期性条纹结构可以在多种材料中实现光栅的制备^[7-9]; 多光束干涉可以形成均匀分布的二维或三维光学点阵, 这在光子晶体的制作领域已经得到了广泛的应用^[10-12], 而且点阵的结构特征由参与干涉的光束数量决定, 周期可由各光束之间的夹角控制^[13], 这为实现微结构分布特征的控制提供了一种可行的办法.

本文利用飞秒激光多光束干涉的方法在单晶硅表面形成分布特征可控的微结构. 通过给空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)附加多棱锥镜的相位对飞秒激光的空间相位进行调制, 实现了多光束干涉, 形成了均匀分布的二维空间点阵. 利用形成的空间点阵在单晶硅表面烧蚀出凹坑状微结构, 并通过改变附加的相位得到了具有不同分布特征和

周期间距的微结构. 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)显示微结构的分布特征和周期间距均与点阵结构一致. 利用分光光度计对微结构在 $1.2\sim 2\ \mu\text{m}$ 波段的透过率进行测试, 发现它相对抛光硅平均提高了 11.5%, 显示出良好的减反效果. 与其它方法相比, 这种方法具有系统简单稳定、微结构的分布特征和周期可灵活控制等优点.

1 实验

实验装置如图 1, 所用的激光为钛宝石锁模激光再生放大系统(Spitfire, Spectra Physics)产生的超短脉冲激光, 输出的激光中心波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 150 fs. 沿水平方向偏振的线偏振激光以一定角度入射到空间光调制器(Holoeye Pluto)上, 通过给空间光调制器附加合适的相位图, 可以对飞秒激光的空间相位进行调制, 从而实现多光束干涉, 形成的干涉图样可以用 CCD 相机观察. 在烧蚀硅表面的实验中, 考虑到所用的空间光调制器是反射式工作的, 且空间点阵结构距离调制器面板比较近, 为了实验的方便, 采用一个 $4f$ (由 L_1 和 L_2 组成, 焦距均为: $f=200\ \text{mm}$) 系统将空间点阵引出, 再通过显微物镜($10\times$, $\text{NA}=0.25$)将点阵聚焦到样品表面. 双面抛光的单晶硅样品(N型掺杂, $\langle 111 \rangle$ 晶向, 厚度为 $500\ \mu\text{m}$)被放置在能够沿着平行或垂直于激光传播轴的方向移动的 XYZ 三维精密位移控制平台(Physik Instrumente)上. 激光脉冲在样品上的曝光时间由电快门(shutter)控制, 脉冲能量可通过半波片和偏振片调节. 加工过程由一个 CCD 相机实时监控.

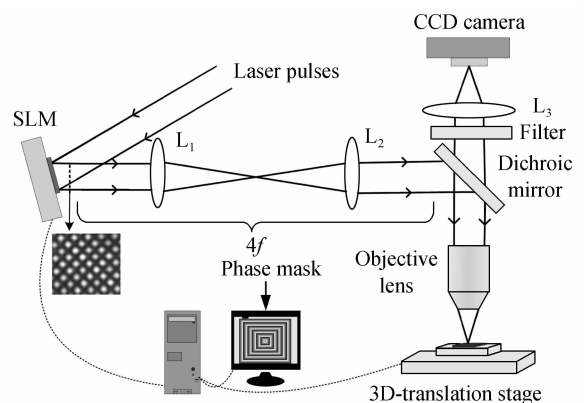


图 1 利用空间光调制器实现飞秒激光多光束干涉光刻单晶硅表面微结构实验装置

Fig. 1 Experimental setup for silicon surface microstructure fabrication by the multi-beam interference formed by SLM

2 实验结果及分析

2.1 空间光调制器形成多光束干涉

利用多棱锥镜可以形成多光束干涉^[13],实验中用于产生多光束干涉的相位都是以多棱锥镜为模型

计算得到的.首先给出形成双光束、三光束和四光束干涉所用多棱锥镜的实物模型以及各棱锥所对应的相位图形貌,同时用 MATLAB 软件对底角为 2° 的多棱锥镜形成的多光束干涉进行了模拟仿真,相应的结果如图 2.

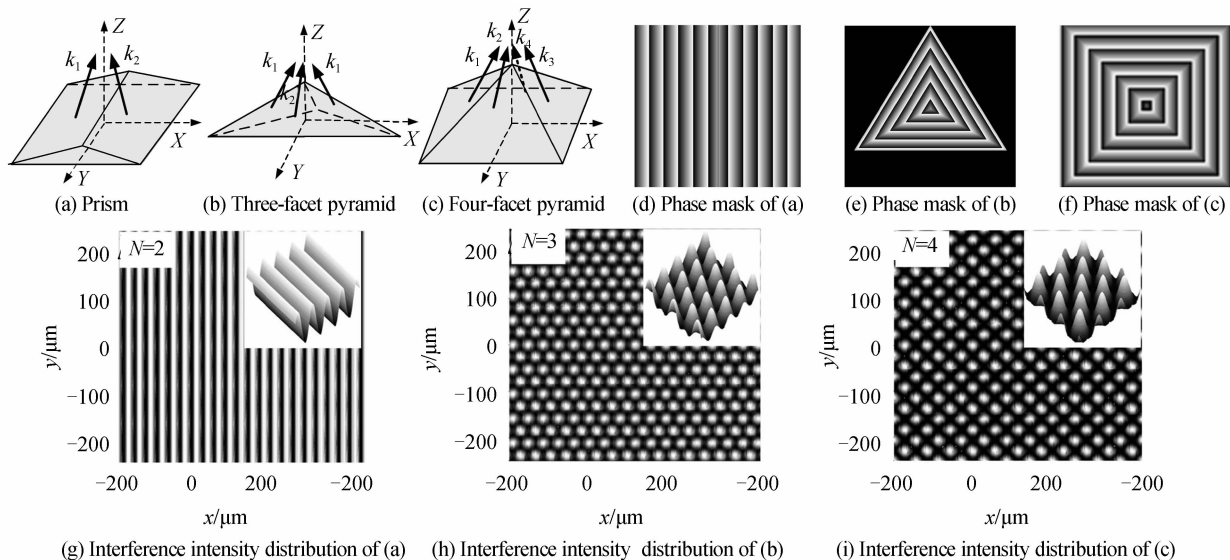


图 2 产生多光束干涉的多棱锥镜模型和相应的相位图形貌以及 MATLAB 模拟底角为 2° 的棱锥形成的干涉在 XY 面内的强度分布

Fig. 2 Geometrical configuration of the multi-facet pyramid lens and the representation of the phase masks for multi-beam interference, and simulation of the XY plane intensity distributions of the interference formed by multi-facet pyramid lens with the base angle of 2°

图 2(a)~(c)分别是可以形成双光束干涉、三光束干涉以及四光束干涉的棱镜、三棱锥和四棱锥的模型,由于它们各自的结构特征,沿 Z 轴传播的激光在通过棱锥镜后,将会被分成若干振幅相等的部分,各部分的波矢沿着传播方向 Z 对称分布,这使得形成的干涉图样具有对称性和周期性.图 2(d)~(f)是对应于棱镜、三棱锥和四棱锥模型计算出的相位图的形貌.图 2(g)~(i)分别是底角为 2° 的棱镜、三棱锥和四棱锥形成的双光束干涉、三光束干涉以及四光束干涉在 XY 面内强度分布的模拟结果,模拟过程对激光进行了平面波的近似,采用的激光波长为 800 nm 与实验中所用激光波长一致.

考虑到空间光调制器的分辨能力,实验中主要采用底角为 1° 和 2° 的多棱锥镜相位.通过给空间光调制器附加不同的相位,可以形成具有不同分布特征的空间光学点阵.实验分别形成了双光束、三光束以及四光束干涉,通过改变相位图简单方便地实现了对各种干涉图样周期的控制,并对不同相位所形成的结构周期做了对比.形成的干涉图样通过配接了 $10\times$ 显微镜的 CCD 进行观察.

图 3 是附加不同相位时所形成干涉图样照片,它们都表现出周期性,其中图 3(a)~(c)是棱锥底角为 1° 的相位所形成的双光束、三光束以及四光束

干涉图样,它们分别呈现条纹状结构、正六边形结构以及正方形结构,对应的结构周期分别约为 $46\text{ }\mu\text{m}$ 、 $53\text{ }\mu\text{m}$ 、 $66\text{ }\mu\text{m}$;图 3(d)~(f)是棱锥底角为 2° 的相位形成的双光束、三光束以及四光束干涉图样,对应的结构周期分别约为 $23\text{ }\mu\text{m}$ 、 $27\text{ }\mu\text{m}$ 、 $33\text{ }\mu\text{m}$.通过对不同相位形成的干涉结构周期进行对比可以发现:相位所对应的棱锥底角越大,形成的点阵结构周期越小;棱锥的底角增大一倍,形成的点阵结构周期就减小到原来的一半.为了对实验结果进行验证,给出双光束干涉、三光束干涉以及四光束干涉形成的干涉

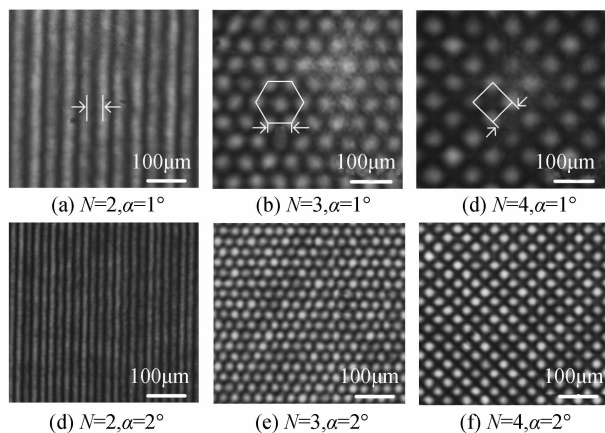


图 3 不同相位形成的干涉图样 CCD 照片

Fig. 3 CCD images of the interference patterns formed by different phase masks

结构周期的理论值,它们分别由以下几个公式计算^[14]得到.

$$d_{2\text{-beam}} = \lambda / (2 \sin \theta)$$

$$d_{3\text{-beam}} = (2/\sqrt{3}) \cdot \lambda / (2 \sin \theta) = \lambda / (\sqrt{3} \sin \theta)$$

$$d_{4\text{-beam}} = \sqrt{2} \lambda / (2 \sin \theta) = \lambda / (\sqrt{2} \sin \theta)$$

式中 λ 是辐射激光的波长, θ 是干涉角,约为多棱锥镜底角的一半(由折射定律可得: $\theta \approx (n-1)\alpha$, 棱锥的折射率 n 取 1.5). 实验中所用辐射激光的波长 λ 为 800 nm, 当相位所对应棱锥的底角 α 为 1° 时, 干涉角 θ 约为 0.5° , 计算出的双光束干涉、三光束干涉以及四光束干涉的结构周期分别为 $45.8 \mu\text{m}$ 、 $52.9 \mu\text{m}$ 、 $64.8 \mu\text{m}$; 当相位所对应棱锥的底角 α 为 2° 时, 干涉角 θ 约为 1° , 对应干涉图样的周期分别是 $22.9 \mu\text{m}$ 、 $26.5 \mu\text{m}$ 、 $32.4 \mu\text{m}$, 实验结果与理论计算结果符合得非常好. 图 3(d)~(f) 中显示的实验结果, 无论是结构特征还是周期间隔都与图 2(g)~(i) 的模拟结果非常吻合, 这表明空间光调制器附加合适的相位可以精确地模拟多棱锥镜形成多光束干涉, 并且干涉结构的分布特征和周期均可以通过改变相位的方法来方便地进行控制.

2.2 多光束干涉光刻微结构

根据上述方法, 本文利用空间光调制器实现多光束干涉, 并在抛光的单晶硅表面烧蚀出周期性微结构. 实验分别采用三棱锥相位和四棱锥相位形成三光束干涉和四光束干涉, 得到正六边形和正方形分布的空间点阵. 形成的点阵由一个 $4f$ 系统引出, 再通过一个 $10\times$ 的物镜聚焦到样品表面, 聚焦物镜一方面可以获得更高的能量密度, 另一方面可以将干涉产生的点阵间距压缩到原来的十分之一. 为实现对微结构间距的控制, 分别采用棱锥底角 α 为 1° 和 2° 的相位图进行实验. 设定辐射激光功率为 25 mW, 曝光时间为 t , 经过一定时间的激光作用, 在单晶硅表面烧蚀出了凹坑状结构. 得到的结构在显微镜下就可以清晰地观察到, 更详细的结构形貌特征可以用扫描电子显微镜观察, 图 4 给出了利用多光束干涉光刻形成的凹坑状结构的 SEM 照片.

图 4(a) 和图 4(b) 分别是利用底角为 1° 和 2° 的三棱锥相位形成三光束干涉在硅表面烧蚀出的凹坑状结构, 采用的激光功率为 25 mW, 曝光时间为 15 s. 可以看出, 三光束干涉烧蚀出的结构呈现正六边形分布, 其中图 4(a) 所示结构的间距约为 $5.5 \mu\text{m}$, 图 4(b) 中结构的间距约为 $2.8 \mu\text{m}$; 同样的激光参量下, 采用底角为 1° 和 2° 的四棱锥相位所形成的微结构如图 4(d) 和图 4(e) 所示, 它们呈现正方形分布, 图 4(d) 和图 4(e) 中结构的间距分别约为

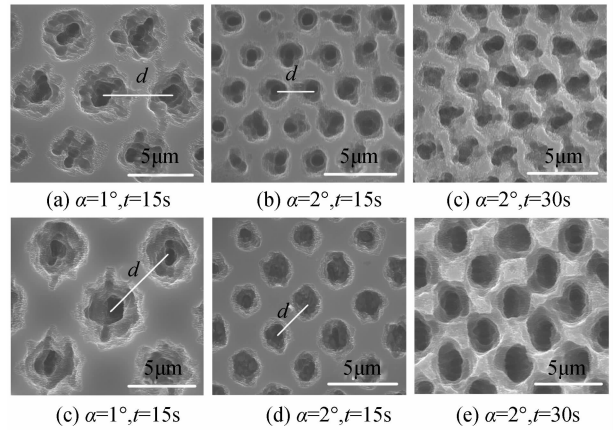


图 4 不同参量的多光束干涉在单晶硅表面形成的微结构 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of the silicon surface micro-structure fabricated by the multi-beam interference with different parameters

$6.5 \mu\text{m}$ 和 $3.3 \mu\text{m}$. 从图 4 可以看出, 烧蚀得到的微结构不仅特征与干涉所得到的点阵结构特征完全一致, 而且间距与之前得到的点阵结构经过 10 倍压缩后的结果比较相符; 同时底角为 2° 的相位形成的结构间距大约是底角为 1° 时形成的结构间距的一半, 这与理论结论是完全一致的. 以上结果表明: 利用飞秒激光多光束干涉在单晶硅表面烧蚀出的凹坑状结构, 其分布特征和周期间隔都可以通过改变多棱锥镜的相位而简单灵活地进行控制.

由图 4(a) 和图 4(d) 可以看出, 底角为 1° 的相位形成的凹坑结构间距较大, 相邻结构之间还有大面积的硅基底裸露; 图 4(b) 和图 4(e) 中由底角为 2° 的棱锥相位形成的结构间距缩减到 $3 \mu\text{m}$ 左右, 相邻结构间的裸露基底减少. 当曝光时间较短时, 得到的凹坑结构深度较小, 增加曝光时间可以在一定范围内增大结构的深度. 为此, 采用底角为 2° 的棱锥相位, 并增加激光的曝光时间到 30 s, 得到了图 4(c) 和图 4(f) 所示的结构. 由于长时间的激光作用, 凹坑结构的深度在一定范围内变大, 同时单个凹坑的损伤范围也有所增大, 相邻结构之间几乎没有裸露硅基底的存在, 形成了分布均匀排列紧密的蜂窝状深坑结构.

图 5 给出了采用底角为 2° 的四棱锥相位, 辐射激光功率为 25 mW, 曝光时间为 30 s 时, 所得到的蜂窝状深坑结构的 SEM 照片, 其中图 5(a) 是经过飞秒激光四光束干涉烧蚀得到的硅表面蜂窝状结构的整体形貌, 图 5(b) 是将结构中单个损伤坑放大后得到的详细形貌. 图 5(b) 可以显示出凹坑结构的形状, 其内壁近似于一个抛物面; 另外, 由 5(b) 可以大致估计出凹坑的深度约为 $3 \mu\text{m}$ 左右. 由图 5 所示的 SEM 照片可以看出, 烧蚀得到的蜂窝状微结构

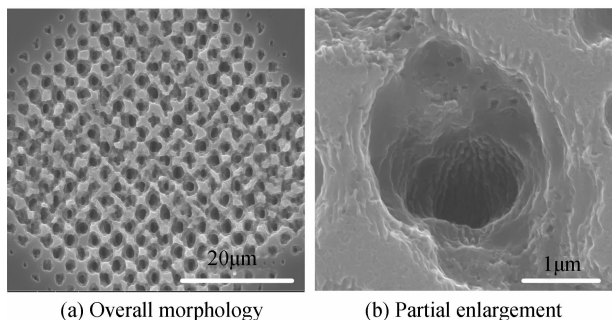


图 5 单晶硅表面蜂窝状深坑微结构 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of the silicon surface honeycomb-like microstructures

整体均匀性稍差,单个损伤坑也呈现出不规则性.造成这种结果可能的原因是实验所用飞秒激光的光束质量不够好,时间和强度的抖动是不可避免的,从而导致干涉点阵的对比度和均匀性受到影响.

2.3 减反效果测试

为测试这种蜂窝状深坑微结构的减反效果,选用底角为 2° 的四棱锥相位形成四光束干涉,固定辐射激光功率为 25 mW,单个位置曝光时间为 30 s,并通过步进式移动样品在单晶硅表面形成了大约 4 mm^2 的密排凹坑结构.利用分光光度计(Lambda 950)对形成的微结构在 $1.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 的近红外波段的透过率进行了测试,并与未经处理的抛光硅片做了对比,相应结果如图 6.

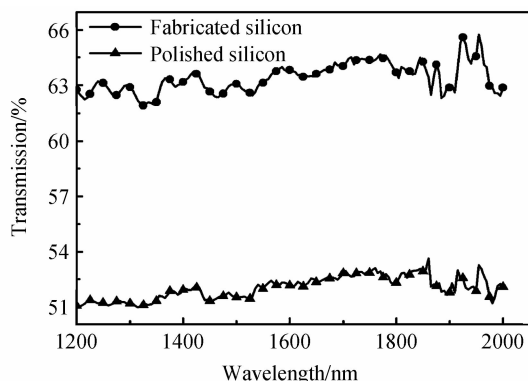


图 6 多光束干涉光刻形成的微结构硅与抛光硅透过率随波长的变化情况对比

Fig. 6 Comparison of the transmission of the polish silicon and micro-structure silicon

利用四光束干涉的方法烧蚀得到的凹坑结构,在 $1.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 波段的透过率整体提高到了 61.5% 以上,相对未经处理的抛光硅在相应波段的透过率平均增加了 11.5%.由于单晶硅的带隙为 $1.1 \mu\text{m}$,对于本实验中所测试的低于单晶硅带隙的 $1.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 波段而言,单晶硅对其吸收非常小,而主要表现是透过.因此,凹坑结构的形成所造成的硅片厚度的微小变化对此波段透过率的影响可以忽略不计,所以造成这种凹坑微结构硅的透过率提高的主要原因是:烧蚀形成的凹坑结构的内壁近似于一个抛物

面,入射光可以在侧面间来回反射,形成了“陷光效应”;同时,凹坑结构的有效折射率是从结构顶部的空气层(n_{air})到结构底部的基底层(n)是连续变化的,这使得光在结构表面的反射率降低,透过率提高.从上面的测试结果可以看出,利用多光束干涉光刻的方法烧蚀出的凹坑状微结构,分布均匀、排列紧密,具有良好的减反效果.

3 结论

本文利用空间光调制器形成飞秒激光多光束干涉对单晶硅进行光刻,在硅表面得到了规则分布的凹坑微结构.这种结构的周期可达到几个微米,分布特征和周期间距可通过改变所附加的相位图来方便地实现控制.采用底角为 2° 的棱锥相位,在辐射激光功率为 25 mW,曝光时间为 30 s 的情况下,得到了分布均匀、排列紧密的蜂窝状深坑结构,相邻结构间几乎没有裸露的硅基底.通过对所形成的蜂窝状深坑结构的特性进行测试发现,这种分布均匀排列紧密的凹坑状微结构相对于未经处理的抛光硅相比,在 $1.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 的近红外波段透过率平均提高了 11.5%.实验结果表明:通过调制激光光场分布来实现对微结构分布特征的控制是可行的,凹坑状结构同样具有良好的减反效果.这为高灵敏度的硅基红外探测器的制作提供了一种新方法.

参考文献

- [1] HUANG Y F, CHATTOPADHYAY S, JEN Y J, *et al.* Improved broadband and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with biomimetic silicon nanostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, **2**(12): 770-774.
- [2] 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.
- [3] SHEN M Y, CROUCH C H, CAREY J E, *et al.* Femtosecond laser-induced formation of submicrometer spikes on silicon in water[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(23): 5694-5696.
- [4] SHEN M Y, CROUCH C H, CAREY J E, *et al.* Formation of regular arrays of silicon microspikes by femtosecond laser irradiation through a mask [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(11): 1715-1717.
- [5] IMAMOTO H, KANEHIRA S, WANG X, *et al.* Fabrication and characterization of silicon antireflection structures for infrared rays using a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(7): 1176-1178.
- [6] HAYASAKI Y, NISHITANI M, TAKAHASHI H, *et al.* Experimental investigation of the closest parallel pulses in holographic femtosecond laser processing [J]. *Applied Physics. A: Materials Science and Processing*, 2012, **107**(2): 357-362.
- [7] ZHANG Heng, ZHOU Yun, ZHOU Lei, *et al.* Fabrication of micro-grating structures by nanosecond laser ablation of chrome film on glass substrate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 241-244.

张恒,周云,周雷,等.纳秒激光刻蚀玻璃基质铬薄膜直写微光

- 栅结构[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 241-244.
- [8] SI J H, QIU J R, ZHAI J F. Photoinduced permanent gratings inside bulk azo dye-doped polymers by the coherent field of a femtosecond laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(3): 359-361.
- [9] LI Xiang, PANG Zhao-guang, ZHANG Xing-ping. Fabrication of large-area gold nanowires grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1850-1854.
李响, 庞兆广, 张新平. 大面积金纳米线光栅的制备[J]. 光子学报, 2011, **40**(12): 1850-1854.
- [10] JIA X, JIA T Q, DING L E, *et al.* Complex periodic micro/nanostructures on 6H-SiC crystal induced by the interference of three femtosecond laser beams[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(6): 788-790.
- [11] SUN Hui-ting, SONG Zheng-xun, WENG Zhan-kun, *et al.* Fabrication of two-dimensional photonic crystal structure with defect by holographic lithography and two-photon polymerization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(z1): 1-6.
孙慧婷, 宋正勋, 翁占坤, 等. 利用干涉光刻和双光子聚合技术制造带有功能缺陷的二维光子晶体[J]. 光子学报, 2011, **40**(z1): 1-6.
- [12] KONDO T, MATSUO S, JUODKAZIS S, *et al.* Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**(6): 725-727.
- [13] LEI M, YAO B L, RUPP R A. Structuring by multi-beam interference using symmetric pyramids[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 5803-5811.
- [14] ESCUTI M J, CRAWFORD G P. Holographic photonic crystals[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(9): 1973-1987.

• 下期预告 •

近红外技术在纸张水分率测量中的应用

于殿泓, 李琳, 赵锴

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要:为了解决纸张水分率指标的在线测量问题,研究了基于近红外光谱分析的水分率测量技术,阐述了介质对光谱吸收的基本原理,分析了该原理应用于纸张水分率测量时存在的问题,探索了采用两条谱线(测量谱线和参考谱线)的方法实现水分率在线检测的关键技术,设计规划并实验研究了相应的测量方案,论述了方案中各功能模块的作用.基于光谱法和干燥称重法的水分率对比测量实验表明,基于光谱法的测量准确度可控制在0.5%以内.因此该方法可实现在线检测且满足准确度要求.

关键词:近红外光谱;水分率;纸张;在线检测