

文章编号: 1001-4322(2013)11-2900-05

## 双尺度织构的激光光刻工艺\*

贺海东, 郝敬宾, 赵恩兰, 杨海峰, 唐 玮, 朱 华, 钱济国

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 搭建了双光束激光干涉光刻系统和激光快速扫描系统。利用干涉光刻系统, 实现了不同周期、不同深度、大面积的表面规则光栅织构的构筑。利用激光快速扫描器的二维扫描功能, 通过控制激光功率和扫描速度, 对曝光量和填充线条间距进行了优化。提出了两种双尺度复合织构的制备方法: 一种是在激光快速扫描系统中对抗蚀剂表面分别进行  $x, y$  方向的扫描光刻, 然后在干涉光刻系统中进行双光束干涉光刻; 另一种是在激光干涉光刻系统中进行两次曝光, 每次曝光的入射角不同。实验结果表明: 这两种方法在制备双尺度复合织构方面具有快速、廉价、操作简易等优点。

**关键词:** 双光束干涉; 双尺度; 表面织构; 激光光刻

**中图分类号:** TN305.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.3788/HPLPB20132511.2900

近年来, 微/纳米织构对材料表面润湿性能和摩擦性能的影响已成为材料科学领域的一个研究热点。制备微纳米织构的方法有很多种, 例如化学腐蚀、激光加工、电子束刻蚀、光刻等<sup>[1-4]</sup>。双尺度复合织构(在两个尺度上都存在规则的周期结构)在自然界中普遍存在, 其表面往往会表现出一些特殊的现象, 如荷叶表面的自清洁效应、水黾能在水面上自由站立等<sup>[5-6]</sup>。有着双尺复合度织构的表面能够有效改善材料的润湿性能和摩擦性能。江雷等人<sup>[7]</sup>采用激光刻蚀的方法, 通过调整催化剂在材料表面的分布, 制备出了双尺度织构, 实验结果表明: 双尺度复合织构能够使表面同时具有较大的接触角和较小的滚动角, 这是单一的微米或纳米结构难以达到的。然而, 现有的加工方法很难制备出结构小、大面积的双尺度复合织构。从 20 世纪 60 年代至今, 光刻技术有了很大的发展, 广泛应用于集成电路、掩模、MEMS、材料科学等方面。陈欣等人<sup>[8]</sup>利用激光干涉光刻技术和等离子刻蚀技术制备出周期 200、线宽 100 nm 的掩膜。施瑶等人<sup>[9]</sup>利用光刻和电铸技术在不锈钢基板和铝基板上加工出不同参数的条纹沟槽, 有效改善了其表面的润湿性能。姜亮等人<sup>[10]</sup>利用光刻技术在 PDMS 表面制作凹坑阵列型表面织构, 并对其进行了摩擦磨损试验研究。采用光刻技术制备的微/纳米织构排列规则、截面轮廓平滑, 而且易加工出尺寸较小的织构。激光干涉光刻是一种新兴的光刻技术, 与其他的光刻方法相比, 具有系统简单廉价、可实现大面积曝光、结构尺寸容易控制等优点<sup>[11-13]</sup>。本文搭建了双光束激光干涉光刻系统和激光快速扫描系统, 采用激光干涉光刻系统在抗蚀剂表面构造了不同周期、不同深度的微米级光栅织构, 利用激光快速扫描系统对大尺度网格织构的构筑进行了优化, 同时提出了两种双尺度复合结构的制备方法。

## 1 实 验

### 1.1 仪器

光源采用美国 PHOTONICS 公司生产的 DSH-355-10 型紫外激光器: 波长 355 nm, 脉宽 20 ns, 平均功率 10 W。采用 CSPM-5500 原子力显微镜, 在接触模式下对加工后样品表面形貌进行表征。

图 1 为激光干涉光刻平台和激光快速扫描平台系统图。激光器 1 发出的紫外激光经过反射镜 2 反射后, 其方向按顺时针旋转了 90°, 然后依次通过电子开关 3、扩束镜 4(放大倍数为 5 倍)和分束镜 5。分束后的激光: 一束进入激光快速扫描系统①, 通过激光快速扫描器, 聚焦在固定于三维移动平台 13 的样品上; 另一束进入激光干涉光刻系统②, 经过光阑 6、反射镜 7 和分束镜 8 被分为相干的两束, 然后由反射镜 9、反射镜 10 调整两束光的方向, 从而在固定于三维移动平台 11 上的样品表面发生干涉。

\* 收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105360, 51205394); 江苏省自然科学基金项目(BK2011218); 中国博士后科学基金项目(2012T50522); 中国博士后项目(2011M500966); 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金项目(GZ200905); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金项目(SKLTkf10B06)

作者简介: 贺海东(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光光刻工艺的研究; hhdumt@163.com。

通信作者: 郝敬宾(1981—), 男, 讲师, 主要从事微纳米加工技术方面的研究; jingbinhao@cumt.edu.cn。

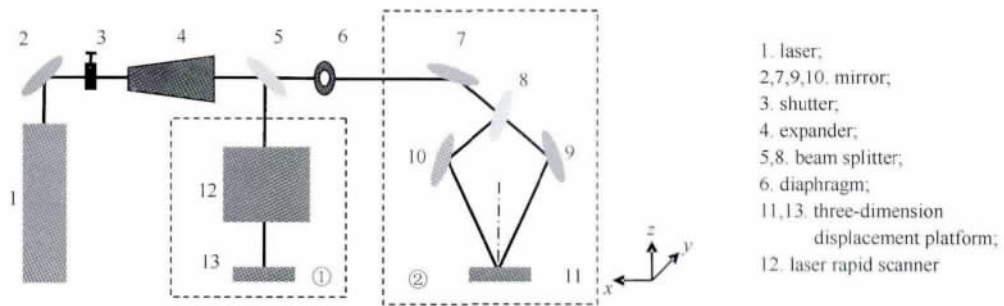


Fig. 1 Sketch of system for two-beam interference lithography and laser rapid scanning

图 1 双光束干涉光刻和激光快速扫描系统图

## 1.2 样品制备

使用尺寸为  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的 Si 片作为基底,在丙酮、酒精和去离子水中分别超声清洗 5 min,以除去基底表面的杂质。将清洗后的基底在  $100\text{ }^\circ\text{C}$  下烘干 30 min,使其表面充分的干燥,然后熏一层六甲基二硅胺,用于增强光刻胶与基底的黏附性。将北京化学试剂研究所生产的 BP212 型紫外正胶分别以  $500\text{ r/min}$  旋涂 20 s,  $5000\text{ r/min}$  旋涂 60 s 均匀涂覆在基底表面,再经过前烘、曝光、后烘、显影、坚膜等步骤,得到了所需的表面织构。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 光栅织构

光栅织构的几何参数主要包括周期、深度和线宽。周期可通过两束光的夹角来控制,深度和线宽则由曝光量决定。为了得到高对比度的图形,在干涉曝光过程中调节两束光与抗蚀剂基片平面法线的夹角(入射角)相等,此时干涉条纹周期

$$P = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为激光波长,  $355\text{ nm}$ ;  $\theta$  为入射角度。

双光束干涉光刻实验由图 1 中的②光路系统来完成,激光功率通过激光器电流  $I$  控制,调节光阑孔直径的大小改变曝光面积,电子开关设定曝光时间,入射角通过反射镜 9、反射镜 10 和三维移动平台 11 的  $z$  方向位移进行调节。实验过程中,光阑孔直径为  $3\text{ mm}$ ,分别研究了激光器电流、曝光时间和入射角度对光栅织构几何参数的影响。设三维移动平台 11 的  $z$  轴方向为基片的法线方向,离反射镜 9、反射镜 10 最近的一端为位移最大值,另一端为零点。

首先,将  $z$  轴移动到最大位移处,改变反射镜角度,使两束光在抗蚀剂表面进行干涉,经测量入射角约为  $17.5^\circ$ 。设定激光电流  $I$  为  $30\text{ A}$ ,曝光时间  $t$  分别为  $3, 5, 7\text{ s}$ ,得到光栅织构周期为  $1171\text{ nm}$ ,光栅深度分别为  $151, 214, 293\text{ nm}$ ,平均线宽分别为  $610, 580, 560\text{ nm}$ ,曝光时间为  $3\text{ s}$  的原子力显微镜(AFM)形貌如图 2(a)所示。然后,将  $z$  轴移动到零位,此时入射角约为  $6.0^\circ$ 。设定曝光时间为  $3\text{ s}$ ,激光电流分别为  $30.0, 30.2, 30.4\text{ A}$ ,得到的光栅织构周期为  $3540\text{ nm}$ ,光栅深度分别为  $189, 394, 712\text{ nm}$ ,平均线宽分别为  $1909, 1468, 1233\text{ nm}$ ,激光器电流为  $30.2\text{ A}$  的 AFM 形貌如图 2(b)所示。最后,将  $z$  轴移动到中间的某一位置,测得入射角大小约为  $8.5^\circ$ ,在激光电流和曝光时间分别为  $30.0\text{ A}, 3\text{ s}$  时,得到的光栅织构周期为  $2250\text{ nm}$ ,光栅深度为  $171\text{ nm}$ ,线宽为  $998\text{ nm}$ ,如图 2(c)所示。

从表 1 中 1, 2, 3 组数据可以看出:当激光电流一定,随着曝光时间的增加,光栅的深度逐渐增大,平均线宽逐渐减小,且基本呈线性;当曝光时间相同,随着激光电流的增大,光栅的深度逐渐增加,平均线宽逐渐减小,但是当电流从  $30.0\text{ A}$  增大到  $30.2\text{ A}$  时,光栅深度增加了  $205\text{ nm}$ ,而电流从  $30.2\text{ A}$  增大到  $30.4\text{ A}$  时,光栅深度增加了  $318\text{ nm}$ ,可见,当电流增量相同时,电流越大,光栅深度增加得越多;由 1, 4, 7 组数据反映出,当曝光量相同时,光栅深度会随着周期的增大而增大。由图 2 可以看出,利用激光干涉光刻技术制备的不同周期、深度和平均线宽的光栅织构排列规整、截面轮廓平滑,而且易实现大面积曝光。

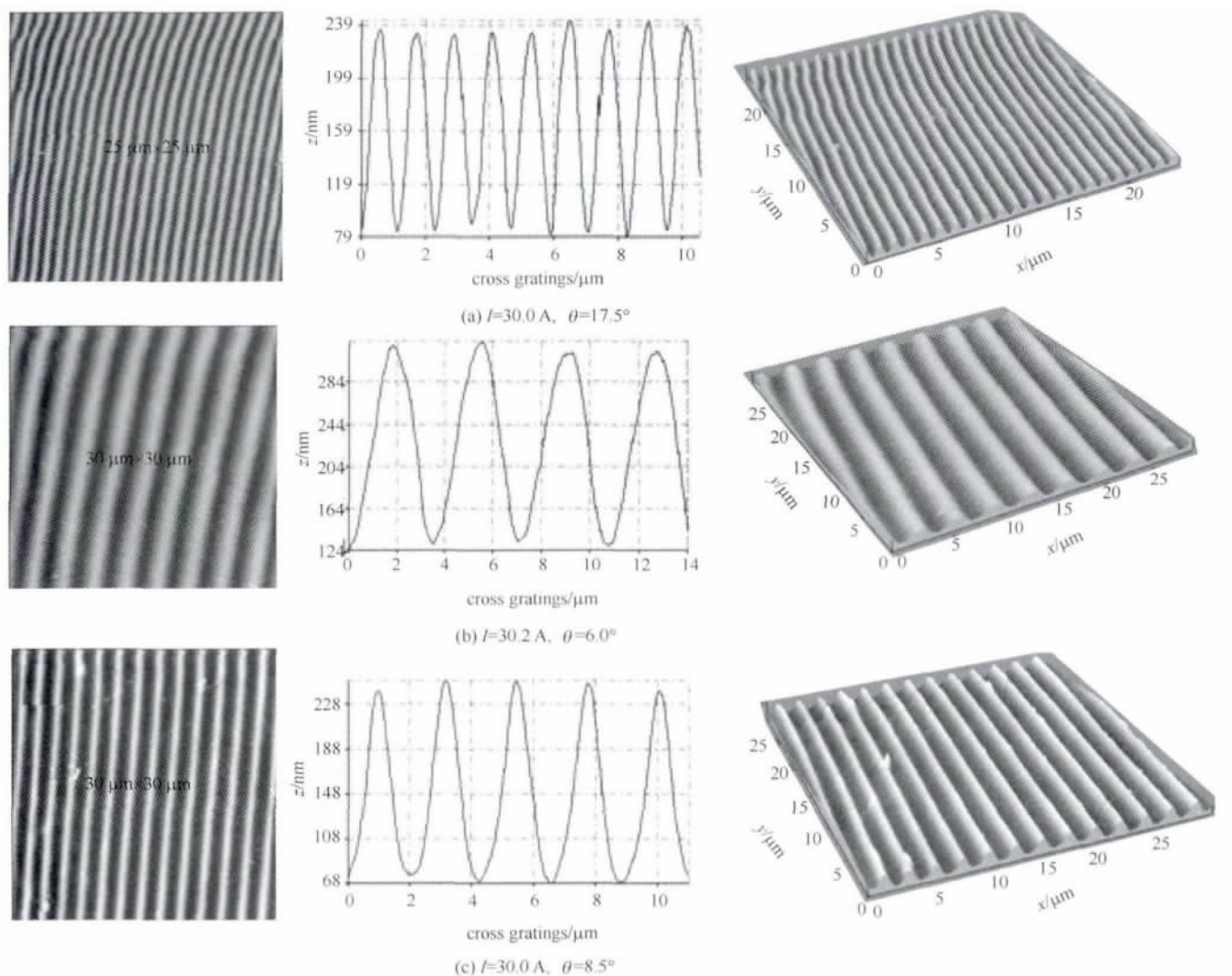


Fig. 2 2D line section and 3D AFM images of gratings with different pitch, depth and width

图 2 不同周期、深度和线宽光栅织构表面的二维、截面轮廓和三维 AFM 图

表 1 光栅的几何参数

Table 1 Geometrical parameter of gratings

sample	$I/A$	$t/s$	pitch/nm	depth/nm	width at half peak/nm
1	30.0	3	1172	151	610
2	30.0	5	1172	214	580
3	30.0	7	1172	293	560
4	30.0	3	3540	189	1909
5	30.2	3	3540	394	1468
6	30.4	3	3540	712	1233
7	30.0	3	2250	171	998

## 2.2 双尺度复合织构

提出了两种双尺度复合织构的制备方法:一种是在图 1 中的①,②光路系统中先后曝光;另一种是在②光路系统中干涉曝光 2 次,通过调整两束光的夹角,使得每次曝光所得的光栅周期不同。

### 2.2.1 激光快速扫描光刻和双光束干涉光刻

激光快速扫描器能够实现对区域的扫描加工,其中填充线条间距和扫描速度均可调整,扫描过程中激光会被聚焦,加工点的能量很大,曝光系统为图 1 中的①光路系统。在扫描过程中,加工点是运动的,曝光时间由扫描速度来控制。实验过程中首先对激光电流、扫描速度  $v$  和填充线条间距进行了优化。设定线条间距为 0.2 mm,在激光器电流为 29.9,29.7,29.5,29.3 A 时,分别以 1.0,0.5,0.3,0.1 mm/s 的扫描速度进行了快速扫



描光刻。结果发现,当电流为 29.9 A,扫描速度为 1 mm/s 时,光刻胶直接被打穿;电流为 29.3 A,扫描速度为 1 mm/s 时,虽然实现了光刻,但深度很浅,说明曝光量不足;参数为  $I=29.5\text{ A}, v=0.5\text{ mm/s}$  和  $I=29.3\text{ A}, v=0.1\text{ mm/s}$  两种情况下得到的图形效果基本相同,但扫描速度为 0.1 mm/s 的加工时间很长。因此,选择激光电流为 29.5 A,扫描速度为 0.5 mm/s。

分别以线条间距为 0.17,0.15,0.13,0.1,0.07 mm 进行了实验。结果发现,线条间距为 0.1 mm 时图形效果最好,当线条间距为 0.17,0.15 mm 和 0.13 mm 时,矩形的尺寸较大,而线条间距为 0.7 mm 时,矩形块分布不均匀,而且部分已脱落。经过优化,最后将快速扫描系统参数设定为:激光电流为 29.5 A,扫描速度为 0.5 mm/s,线条间距为 0.13 mm。

按照以上设定的参数,将样品在①光路系统分别在  $x, y$  方向进行了扫描光刻,然后将②光路系统中三维移动平台的  $z$  轴调至中间,以激光器电流为 30.0 A,曝光时间分别为 3,5,7 s 进行干涉曝光,在大尺度矩形织构上制备出不同深度、不同线宽的小尺度光栅织构。图 3 为曝光时间为 3 s 时的双尺度复合织构表面形貌。可以看出,矩形块分布均匀、排列规整,但边缘不是很平整,分析原因可能是由于激光打标机本身的误差、加工过程中的振动、涂胶不均匀等因素造成的,加工工艺将在以后的工作中进一步改善。

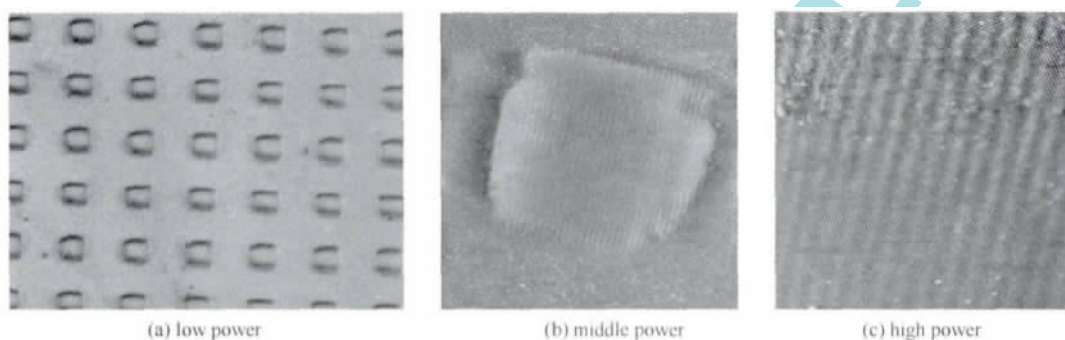


Fig. 3 Two-scale texture fabricated by scanning lithography and interference lithography

图 3 扫描光刻和干涉光刻制备双尺度复合织构

### 2.2.2 不同周期的双光束干涉光刻

首先将  $z$  轴移动到零位,设定激光电流为 30.0 A,曝光时间为 7 s,进行干涉曝光,然后将  $z$  轴移动到最大位移处,调节反射镜角度,保持激光电流不变,将曝光时间设定为 3 s 进行第二次干涉曝光,得到的双尺度织构如图 4(a)所示,其中小尺度结构不明显。因此,对加工工艺进行了调整:在第一次干涉曝光后,利用三维移动平台将样品在  $x$  方向上进行了微调,然后进行第二次曝光,图 4(b)为得到的双尺度织构。从图 4(b)中的截面轮廓图可以看出,在第二次曝光前将样品在  $x$  方向上进行微调,可以有效改善双尺度复合织构的质量。

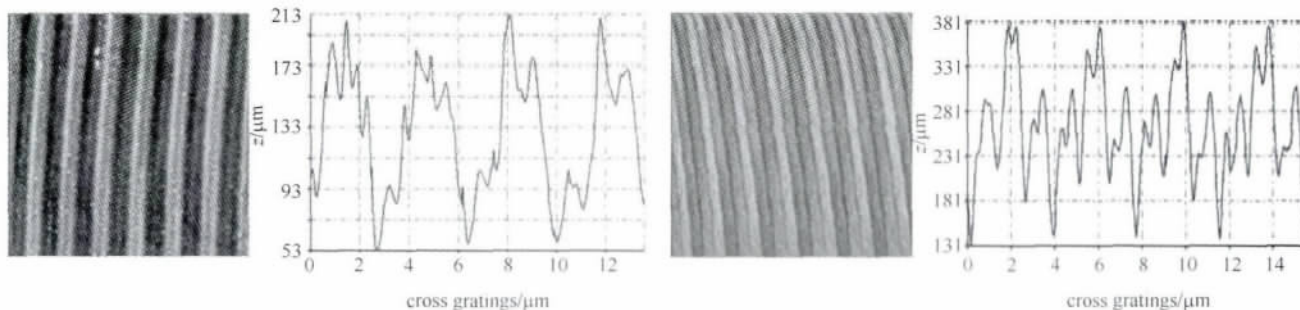


Fig. 4 2D and line section AFM images of two-scale texture fabricated by interference lithography with twice exposure

图 4 干涉光刻双曝光制备双尺度复合织构的二维和截面轮廓 AFM 图

## 3 结 论

本文通过搭建激光干涉光刻系统和激光快速扫描系统,以 355 nm 的紫外激光为光源,成功制备出不同几何参数的光栅织构、网格织构和双尺度复合织构。利用扫描光刻和激光干涉光刻制备双尺度复合织构过程中,大尺度网格织构加工效率高,容易控制,但受到聚焦点大小的限制,其尺寸很难进一步减小;双光束干涉双曝光

法可以制备出结构更小的双尺度复合织构,但加工大周期的结构,需要移动平台的行程很长,将增加实验所需的空空间。因此,这两种方法分别适用于不同尺寸的双尺度复合织构的制备。所述的两种双尺度复合结构的制备方法具有快速、廉价、操作简单等优点,但加工工艺目前还尚不成熟,除了实验仪器本身及实验过程中一些外在因素影响外,激光的光强呈高斯分布,光斑中光强分布不均匀,导致利用激光快速扫描系统制备出的矩形结构边缘质量较差且不垂直。为了解决上述问题,将在实验系统中加入均匀镜,使得激光光强均匀化,可以有效改善结构的边缘质量。

#### 参考文献:

- [1] Qian B T, Shen Z Q. Fabrication of superhydrophobic surfaces by dislocation-selective chemical etching on aluminum, copper, and zinc substrates[J]. *Langmuir*, 2005, **21**(20): 9007-9009.
- [2] 连峰,张会臣,庞连云. Ti6Al4V 表面纹理制备及其润湿性[J]. 功能材料, 2011, **42**(s3): 464-467. (Lian Feng, Zhang Huichen, Pang Lianyun. Fabrication of surface texture on Ti6Al4V alloy and its wettability. *Journal of Functional Materials*, 2011, **42**(s3): 464-467)
- [3] Oh S H, Kim J G, Kim C S, et al. The fabrication of 3-D nanostructures by a low-voltage EBL[J]. *Applied Surface Science*, 2011, **257**(9): 3817-3823.
- [4] 赵文杰, 曾志翔, 王立平, 等. 规则织构化硅片表面的制备及其润湿行为[J]. 中国表面工程, 2011, **24**(3): 4-10. (Zhao Wenjie, Zeng Zhixiang, Wang Liping, et al. Fabrication and wetting behaviors of regular textured silicon surfaces. *China Surface Engineering*, 2011, **24**(3): 4-10)
- [5] Zhao Wenjie, Wang Liping, Xue Qunji. Fabrication of low and high adhesion hydrophobic Au surfaces with micro/nano-biomimetic structures[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2010, **114**(26): 11509-11514.
- [6] Guo Zhiguang, Liu Weimin, Su Baolian. Superhydrophobic surfaces: from natural to biomimetic to functional[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, **353**(2): 335-355.
- [7] 江雷, 冯琳. 仿生智能纳米界面材料[M]. 北京: 化工工业出版社, 2007. (Jiang Lei, Feng Lin. Intelligent bionic nano interface material. Beijing: Chemical Industry Press, 2007)
- [8] 陈欣, 赵青, 方亮, 等. 激光干涉光刻法制作 100 nm 掩模[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(3): 806-810. (Chen Xin, Zhao Qing, Fang Liang, et al. Fabrication of 100 nm mask by laser interference lithography. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 806-810)
- [9] 施瑶, 胡海豹, 黄苏和, 等. 条纹沟槽表面润湿性的试验研究[J]. 测控技术, 2011, **30**(11): 119-126. (Shi Yao, Hu Haibao, Huang Suhe, et al. Experimental research on wettability of riblet structure surface. *Measurement and Control Technology*, 2011, **30**(11): 119-126)
- [10] 姜亮, 马国亮, 王晓雷. PDMS 表面织构润滑特性的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, **30**(3): 262-267. (Jiang Liang, Ma Guoliang, Wang Xiaolei. Lubrication properties of surface texture on PDMS. *Tribology*, 2010, **30**(3): 262-267)
- [11] 刘国强, 张锦, 周崇喜. 三光束激光干涉光刻的实现方法[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(12): 3250-3254. (Liu Guoqiang, Zhang Jin, Zhou Chongxi. Implementation method for three-beam laser interference lithography. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(12): 3250-3254)
- [12] Xu Di, Chen K P, Oblinger K, et al. Nanoimprinting lithography of a two-layer phase mask for three-dimensional photonic structure holographic fabrications via single exposure[J]. *Nanotechnology*, 2011, **22**(3): 5303-5308.
- [13] Liu C H, Hong M H, Lum M C, et al. Large-area micro/nanostructures fabrication in quartz by laser interference lithography and dry etching[J]. *Applied Physics A*, 2010, **101**(2): 237-241.

## Fabrication of two-scale texture by laser lithography

He Haidong, Hao Jingbin, Zhao Enlan, Yang Haifeng, Tang Wei, Zhu Hua, Qian Jiguo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The systems of two-beam interference lithography and laser rapid scanning lithography were constructed. Gratings with different period and depth were fabricated over large areas by laser interference lithography. Utilizing the two-dimensional scan function of laser rapid scanner, exposure and distance between stuffers were optimized by controlling laser power and scanning speed. Two methods for two-scale texture fabrication were presented. The first one was that the photoresist which had been scanned in  $x$  and  $y$  directions by scanning lithography was exposed in interference lithography system. The second one was that photoresist was exposed twice with different incidence angle in interference lithography system. The results show that the two methods were fast, cheap and controllable for two-scale texture fabrication.

**Key words:** two-beams interference; two-scale texture; surface texture; laser lithography