

文章编号 1004-924X(2018)01-0001-07

〈111〉晶向标定方法及其 在湿法刻蚀硅光栅中的应用

梁榉曦¹, 郑衍畅², 邱克强^{1*}, 刘正坤¹, 徐向东¹, 洪义麟¹

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;

2. 安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 在利用单晶硅的各向异性腐蚀制作光栅的过程中, 掩模与硅晶向的精密对准是获取大尺寸光栅结构的前提条件, 高对准精度将显著降低光栅槽型侧壁粗糙度。设计并制作了一种扇形图案, 通过以该图案为掩模的预刻蚀, 可快速准确地发现硅基底内晶格取向。通过此方法进行晶向标定, 并利用紫外光刻与湿法刻蚀, 成功研制了尺寸为 15 mm×15 mm、高度为 48.3 μm、周期为 5 μm、高宽比为 20 的矩形光栅结构, 线条侧壁粗糙度 RMS 值为 0.404 nm; 利用全息光刻与湿法刻蚀成功研制了大高宽比深槽矩形光栅及三角形槽光栅。矩形槽光栅尺寸为 50 mm×60 mm, 高度为 4.8 μm, 周期为 333 nm, 高宽比为 100, 侧壁粗糙度 RMS 值为 0.267 nm。三角形槽光栅周期为 2.5 μm, 侧壁粗糙度 RMS 值为 0.406 nm。

关键词: 湿法刻蚀; 硅光栅; 晶向标定; 各向异性

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0001

Calibration method of silicon 〈111〉 orientation and its application in fabrication of silicon grating by anisotropic wet etching

LIANG Ju-xi¹, ZHENG Yan-chang², QIU Ke-qiang^{1*},
LIU Zheng-kun¹, XU Xiang-dong¹, HONG Yi-lin¹

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory,
University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering,
Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

* Corresponding author, E-mail: blueleaf@ustc.edu.cn

Abstract: Gratings with many types of groove profiles such as rectangles and triangles can be fabricated by wet etching silicon, during which a key step is to accurately align the grating line of the mask with the 〈111〉 orientation of silicon. Sidewall roughness can be visibly reduced by high-precision alignment, which is necessary for the fabrication of large grating structures. A fanned alignment pattern was designed and fabricated, which was then etched to accurately determine the 〈111〉 orientation of silicon. After determining the 〈111〉 orientation, a grating with a height of 48.3 μm, period of 5 μm, and area of 15 mm×15 mm was fabricated successfully by ultraviolet

收稿日期: 2017-08-23; 修订日期: 2017-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11005111, No. 11275201, No. 11705001)

lithography and wet etching. The aspect ratio of the grating was approximately 20, and the roughness of the lines' sidewalls was 0.404 nm. A rectangular grating with a large aspect ratio and a triangular-grooved grating were fabricated successfully with holographic lithography and wet etching. The rectangular grating was 4.8 μm tall with a period of 333 nm and an area of 50 mm \times 60 mm. Its aspect ratio was approximately 100 with a sidewall roughness of 0.267 nm. The period of the V-groove grating was 2.5 μm , and its sidewall roughness was 0.406 nm.

Key words: wet etching; silicon grating; calibration of crystal direction; anisotropy

1 引言

单晶硅在碱溶液中的腐蚀速率具有各向异性的性质。在不同晶格取向的硅基底上,首先通过光刻技术产生光刻胶光栅掩模图形,然后采用碱溶液对单晶硅的各向异性进行刻蚀,可以制造出矩形^[1]、三角形^[2](包括 V 字形^[3])等槽型的光栅结构。

为产生表面浮雕光栅结构,人们通常采用离子束刻蚀技术将光刻胶光栅掩模图形转移到基底(如熔石英玻璃、硅等)表层,离子束正入射到基底表面会产生矩形槽光栅,倾斜入射则产生三角形槽光栅^[4-5]。基于单晶硅的各向异性刻蚀是另一种图形转移技术,其产生的光栅槽型决定于基底内的晶格取向,光栅线条侧壁由刻蚀速率较慢的(111)晶面构成,光滑而均匀,一致性非常高。湿法刻蚀技术无需昂贵的设备,成本低、操作简单、效率高,近年来已经成为一种重要的光栅制作技术,并应用于多个领域的光栅制造。如 X 射线相衬成像系统中的相位光栅和分析光栅^[6],临界角透射光栅谱仪中的闪耀透射光栅^[7],天文望远镜内高分辨光栅谱仪中的阶梯光栅^[8],同步辐射光束线的真空紫外闪耀光栅^[9]等。

湿法刻蚀技术能获得侧壁非常光滑的光栅线条,其前提条件是掩模光栅线条与单晶硅基底的 $\langle 111 \rangle$ 晶向精密对准。如(110)硅片,掩模光栅线条与(111)晶面之间夹角越小,线条侧壁就越接近 $\{111\}$ 晶格面,其缺陷就越少,粗糙度越低。未进行对准会导致光栅侧壁与慢腐蚀晶面之间的夹角过大,腐蚀面上出现若干个相互之间具有位错的腐蚀面,甚至造成线条断裂^[10]。光刻工艺过程中,为使掩模光栅线条与硅基底内晶面平行,首先需要发现硅基底内肉眼看不见的晶向取向,即晶向标定。MIT 空间纳米实验室使用扫描光束干涉系统使干涉条纹与(111)晶面平行,晶面标定步

骤存在较大误差,总误差在 $\pm 0.11^\circ$ 左右^[11]。2012年,陈勇^[12]使用圆形掩模图形在硅片上标定(111)晶面,然而标定线长度的限制使对准过程产生较大误差,总误差约为 $\pm 0.24^\circ$ 。2017年,王宇^[13]在全息曝光中利用平行矩形条纹和劳埃镜光路分别进行晶面标定和对准,总误差仅有 $\pm 0.013^\circ$,但标定线条侧壁与(111)晶面完全重合的过程会耗费较长的时间。

本文采用一种扇形分布的矩形图案进行预刻蚀^[14],可快速准确地标定(111)晶面。在硅基片上通过湿法刻蚀制作扇形对准图案,利用图案中各线条两端腐蚀宽度的差异找出与(111)晶面所成夹角最小的条纹,将其视为(111)晶面的平行线。通过此方法标定出的晶向与硅基片内实际(111)晶面所成夹角不超过 0.025° 。晶向标定之后,在(110)硅片表面,通过紫外光刻与湿法刻蚀,制作了周期为 5 μm ,高度为 50 μm 左右的光栅结构,栅线侧壁粗糙度为 0.404 nm;使用全息光刻与湿法腐蚀制作了周期为 333 nm,高度为 5 μm 左右的光栅结构,侧壁粗糙度为 0.267 nm^[15]。此标定方法也适用于(100)硅基片,通过全息光刻及湿法刻蚀,获得了三角形光栅,光栅周期为 2.5 μm ,面积为 80 mm \times 120 mm,栅线侧壁粗糙度为 0.406 nm。

2 湿法刻蚀硅光栅的原理

湿法刻蚀硅光栅的制作工艺流程如图 1 所示。首先通过预刻蚀精密标定构成光栅线条两个侧面的(111)晶面方向,作为后续掩模光栅对准线;在硅片上涂布均匀光刻胶层;经曝光与显影等光刻工艺制备光刻胶掩模,并使其与标定晶向的对准线对准(平行);等离子体刻蚀将光刻胶掩模转移成抗化学腐蚀的氮化硅掩模图形;最后去掉残余光刻胶,并进行湿法刻蚀。

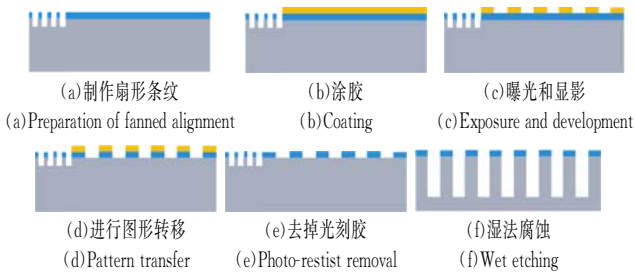


图 1 湿法刻蚀硅光栅制作工艺

Fig. 1 Fabrication process of silicon grating by wet etching

关于硅的各向异性刻蚀原理, Seidel^[16]提出的电学模型是目前最被认可的理论。硅表面的悬挂键和背键结构、能级被认为是引起各向异性刻蚀的原因。以单晶硅与碱性腐蚀剂 KOH 溶液的反应为例, Si 原子上与 OH⁻ 结合的键称为悬挂键, 与 Si 原子连接的键称为背键, 刻蚀中悬挂键与 OH⁻ 相结合, 背键则断裂。(111) 晶面和 (110) 晶面上的硅原子有一个悬挂键和三个背键, (100) 晶面上的硅原子有两个悬挂键和两个背键。(111) 晶面上硅原子的背键数量多且能级低, 使其腐蚀速率远小于另外两个晶面。<110> 晶向的腐蚀速率要低于 <100> 晶向^[17], 前两者且均比 <111> 晶向的腐蚀速率大两个数量级左右。硅晶面的腐蚀情况与腐蚀剂类型、浓度、反应温度、添加剂等因素相关。利用腐蚀速率依赖于腐蚀剂参数的特点, 可以通过调整这些参数实现对腐蚀速率的调控, 在硅基片上加工出光栅结构。

3 晶向精确标定方法

3.1 用于标定晶向的扇形掩模设计

硅基底内的晶向方向肉眼看不见, 通常依靠定位边的取向判断, 然而定位边的取向精度通常大于 ±0.5°。为了获得精密光栅结构, 需要精密标定硅片内晶面方向, 在光刻过程中将掩模线条与标定晶向精密对准, 通过湿法刻蚀获得光栅结构。本文使用一种扇形掩模进行预刻蚀, 能准确地而快速地确定晶面方向。

用于晶向标定的掩模图案是由相互之间具有微小夹角的矩形条纹构成的阵列。如图 2 所示, 扇形图案总发散角为 3.5°, 共有 69 条条纹。单根条纹所占发散角为 0.05°, 高度为 23 mm, 宽度为 26 μm。因对准的具体操作不同, 全息光刻使用的扇形条纹与紫外光刻有所差异^[15]。

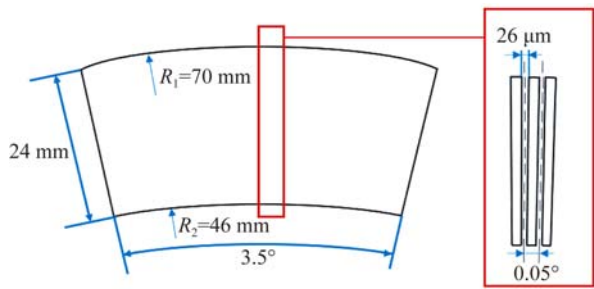


图 2 预刻蚀掩模图案示意图

Fig. 2 Pattern of pre-etching mask

3.2 目标晶向的确定

以 (110) 单晶硅片为例, 基片表面平行于 (110) 晶面, 其定位边与一组 (111) 面大致平行。以图 1 所示图案为掩模, 以定位边为中心, 经过紫外光刻、反应离子刻蚀, 获得相应氮化硅掩模用于预刻蚀。由于扇形分布的掩模中, 相邻矩形条纹具有微小夹角 0.05°, 从一端到另一端发散角为 3.5°, 总有一根矩形掩模与实际 (111) 晶面平行, 这一根条纹就是光刻中需要对准的目标方向, 它代表硅基片内特定晶面的走向。

除去与实际 (111) 晶面平行的那根矩形掩模之外, 其它矩形条纹的氮化硅掩模与 (111) 晶面不平行, 预刻蚀过程中其边缘与硅条纹侧壁之间会产生夹角 θ , 条纹两端的横向钻蚀深度出现差异, 如图 3 所示。在显微镜下有无硅支撑的氮化硅呈现不同颜色, 所以容易观察钻蚀深度的差异, θ 越大, Δx_1 与 Δx_2 的差异就越大; 当 θ 为 0 时, $\Delta x_1 = \Delta x_2$ 。

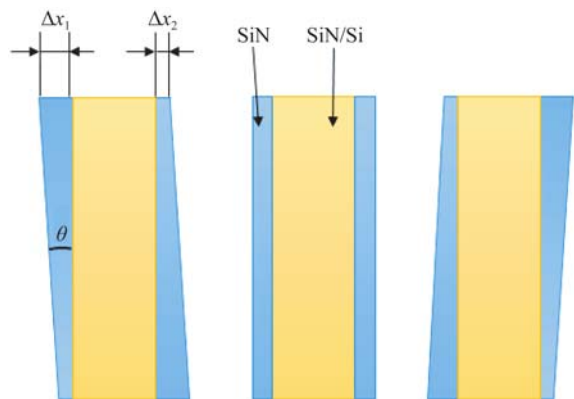
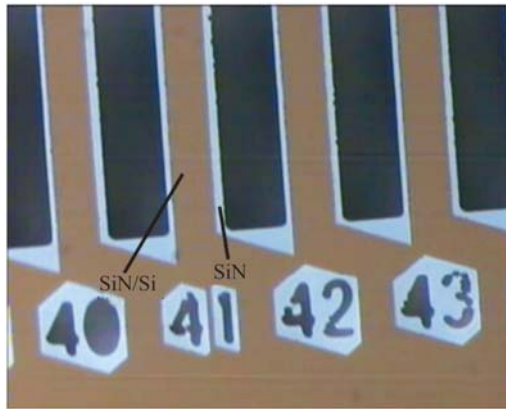


图 3 预刻蚀条纹腐蚀示意图

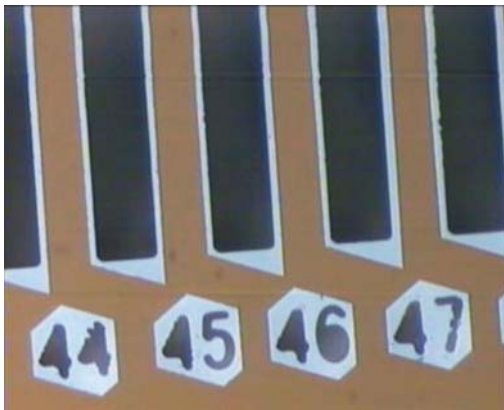
Fig. 3 Sketch of streak after pre-etching

图 4 为预刻蚀后第 40~47 根条纹的局部显微图, 可以看见每根氮化硅掩模由于与 (111) 面不平行, 横向钻蚀的宽度不一致。图 4 (a) 中第

40~43 线,横向钻蚀宽度左边显著小于右边,且差距逐渐变小;图 4(b)中 44~47 线变化截然相反,第 44~45 线两边横向钻蚀宽度不相上下,而 46、47 线横向钻蚀宽度左边显著大于右边。第 40~47 线,横向钻蚀宽度从左边小于右边,到两边相等,再到左边大于右边,对应于预刻蚀的标定掩模线条与(111)晶面的夹角,从大到小再逐条变大,因此,钻蚀宽度两边相等时的线条(第 44 线或 45 线),将作为后续光刻掩模的对准线。



- (a) 第 40~43 线:线条两边横向钻蚀宽度左边小于右边,其差距越来越小
 (a) The 40th—43th streaks: the width of transverse drilling on the left is smaller than that of the right, and the gap gets smaller and smaller



- (b) 第 44~45 线:线条两边横向钻蚀宽度左边等于右边,第 46~47 线条两边横向钻蚀宽度左边大于右边,其差距越来越大
 (b) The 44th—45th streaks: the width of transverse drilling on the both sides are equal, The 46th—47th streaks: the width of transverse drilling on the right side is larger than that of the right, and the gap gets bigger and bigger

图 4 预刻蚀后的第 40~47 根条纹

Fig. 4 The 40th—47th streaks after pre-etching

4 实验结果与讨论

4.1 晶向标定误差

湿法刻蚀硅光栅需要首先标定(111)晶面的方向,并在光刻过程中使掩模线条与标定的晶向平行。第一部分的误差 δ_1 称为标定误差,是由选定的光栅对准线与(111)晶面之间的夹角引起的;第二部分的误差 δ_2 称为平行误差,是由光刻对准掩模光栅条纹与选定的对准线之间的夹角引起的。

在晶向标定过程中,理想的刻蚀图案中存在一根线条两侧横向钻蚀宽度明显相等,而与它毗邻的两根线条两侧钻蚀深度明显不相等。如图 5 所示, A 和 B 是相邻的两根条纹; C 是 A 和 B 的角平分线;假设 D 是实际(111)晶面的平行线。在预刻蚀后的条纹中 A 是与 D 夹角最小的条纹,两边的钻蚀深度差异最小,因此被选为光栅对准线。A 与 D 之间的夹角是 $0 \sim 0.025^\circ$, 而最差的情况如图 4(b)所示,存在两根(第 44, 45 线)两侧钻蚀宽度差异不明显的条纹,此时选择第 44 或第 45 线作为后续光刻的对准线,标定误差 δ_1 最大,为 0.025° 。

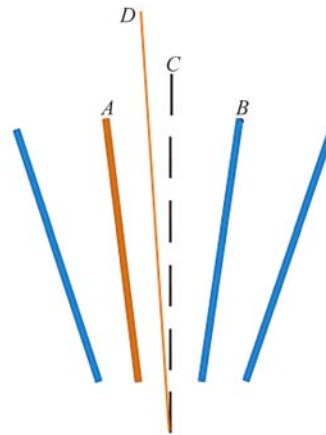


图 5 标定晶面方向与预刻蚀条纹的关系示意图

Fig. 5 Relationship between real (111) and pre-etching streak

紫外光刻中对准的具体操作是将涂覆有光刻胶的硅片与掩模板贴合,其中掩模板上与扇形条纹贴合的部分是与光栅条纹平行的矩形条纹,如图 6 所示。在显微镜下通过对准线与矩形条纹的位置情况对硅片进行调整,使两者平行。矩形条

纹是掩模板上平行于光栅线条的矩形图案阵列, 单个矩形长 100 nm, 宽 3 μm, 相邻矩形间隔 30 μm。对准线长度远大于其宽度, 实验中仅能使对准线在两矩形长条纹间隔之间, 无法使长条纹与对准线完全平行。对准线与长条纹所成角度为 0~0.009 5°, 产生 ±0.009 5° 的平行误差 δ₂。光栅线条与 (111) 晶面之间总的对准误差 δ = $\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = \pm 0.027^\circ$ 。

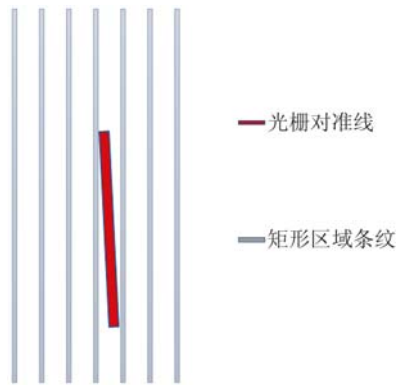


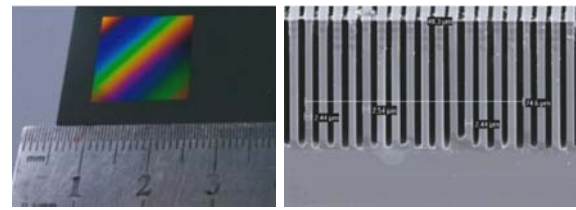
图 6 光栅对准线与矩形条纹的对准示意图

Fig. 6 Alignment between alignment line and rectangular stripe

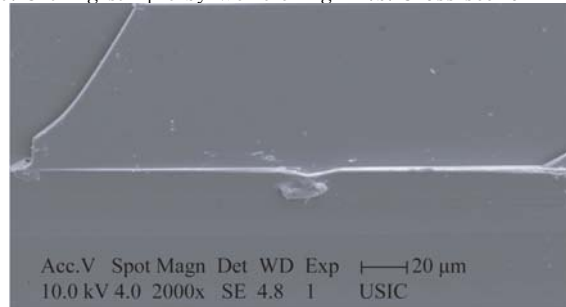
4.2 湿法刻蚀硅光栅

通过精密晶向标定, 确定光刻掩模的对准线, 根据图 1 所示的工艺流程, 接下来在光刻过程中将掩模光栅(掩模版或全息干涉条纹)与光栅对准线精密对准, 并通过反应离子刻蚀制备氮化硅掩模, 最后放入 50% 氢氧化钾溶液, 加热到 80 °C 进行湿法刻蚀。对栅线线宽的控制可通过优化湿法刻蚀的条件实现。增大 (110) 晶面与 (111) 晶面的腐蚀速率比, 能够减小横向钻蚀深度, 使得线条宽度的损失减小。同温度下, (110) 晶面与 (111) 晶面的腐蚀速率比随着腐蚀液浓度的升高而增大^[18]; 同浓度下, 腐蚀速率比随温度的变化规律会因浓度的不同而不同^[19]。

图 7 是通过紫外光刻及湿法刻蚀在 (110) 硅片表面制备的深槽矩形光栅, 光栅的尺寸为 15 mm × 15 mm, 周期为 5 μm, 线条宽度为 2.5 μm, 线条高度为 48.3 μm。使用原子力对光栅侧壁的粗糙度进行测试, 在 400 nm × 400 nm 区域内, 粗糙度 R_q 是 0.404 nm, 如图 7(d) 所示。



(a) 紫外光刻与湿法刻蚀光栅样品 (b) 槽型截面
(a) Grating sample by wet etching (b) Cross section



(c) 侧壁

(c) Grating sidewall

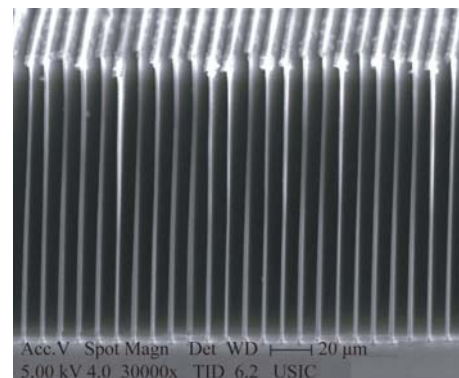
Projected surface area	0.161 μm ²
Surface area difference	0.031 4%
R _q	0.404 nm
R _a	0.334 nm
Roughness rmax	0.002 13 μm

(d) 侧壁粗糙度

(d) Roughness of sidewall

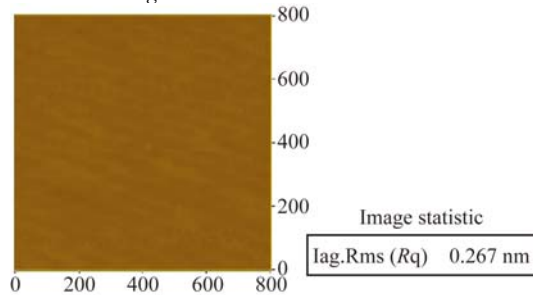
图 7 深槽矩形光栅

Fig. 7 Rectangular grating with deep groove



(a) 333 nm 矩形光栅结构截面

(a) 333 nm fabricated by holography lithography and wet etching



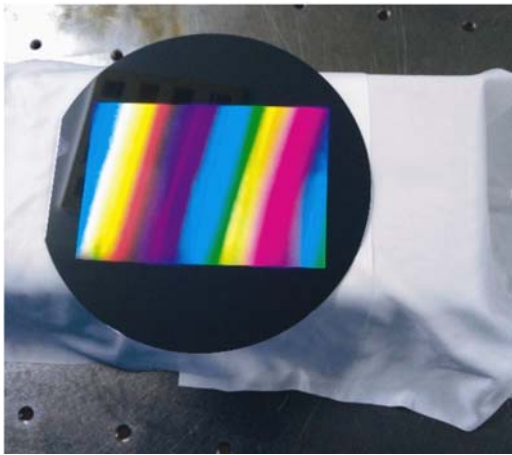
(b) 侧壁粗糙度测试结果

(b) Test result of roughness of sidewall

图 8 高线密度矩形光栅

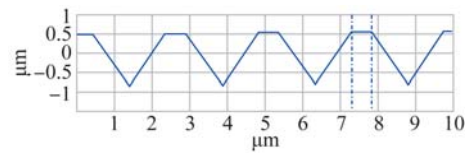
Fig. 8 Rectangular grating with high line-density

图 8 是通过全息光刻与湿法刻蚀在(110)硅基片表面制备的高线密度矩形光栅结构。晶向标定后,需要通过紫外光刻在硅基片表面制作参考光栅,使全息干涉条纹与参考光栅平行,详细对准方法见文献[15],最后使用氢氧化钾溶液进行湿法刻蚀。光栅的尺寸为 50 mm×60 mm,周期为 333 nm,高宽比为 100,侧壁粗糙度为 0.267 nm。图 9 是通过全息光刻与湿法腐蚀在(100)硅基片表面制备的三角形光栅,光栅尺寸为 80 mm×120 mm,侧壁粗糙度为 0.406 nm,测量区域为 400 nm×400 nm。



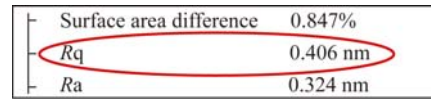
(a)三角形光栅结构样品

(a)V-groove grating fabricated by holographic lithography and wet etching



(b)截面槽型

(b)Cross section



(c)侧壁粗糙度

(c)Roughness of sidewall

图 9 周期为 2.5 μm 的三角形光栅

Fig. 9 V-groove grating sample with period of 2.5 μm

当对准精度较低时,湿法刻蚀后获得的光栅线条侧壁将出现台阶形状,严重时线条会断裂,见文献[10]。由于无法精确测量和控制对准偏差,目前不能给出多种不同对准精度下光栅侧壁的粗糙度对应情况,实验中总是尽可能提高对准精度以提高光栅质量。

5 结 论

本文详细介绍了一种对单晶硅片内(111)晶面方向的标定方法,并结合紫外光刻与全息光刻以及湿法刻蚀,在两种常见单晶硅基片(110)与(100)表面成功制备了多种槽型光栅,光栅侧壁粗糙度最小达到 0.267 nm。实验结果表明,该方法可以快速而准确地标定硅片内用于光刻对准的晶面方向。

参考文献:

- [1] AHN M, HEILMANN R K, SCHATTENBURG M L. Fabrication of ultrahigh aspect ratio free-standing gratings on silicon-on-insulator wafers [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2007, 25(6): 2593-2597.
- [2] FUJII Y, AOYAMA K, MINOWA J. Optical demultiplexer using a silicon echelette grating [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(2): 165-169.
- [3] TSANG W T, WANG S. Preferentially etched diffraction gratings in silicon [J]. *Journal of Applied*

Physics, 1975, 46(5): 2163-2166.

- [4] 邱克强,周小为,刘颖,等. 大尺寸衍射光学元件的扫描离子束刻蚀 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1676-1683.
QIU K Q, ZHOU X W, LIU Y, et al.. Ion beam etching of large aperture diffractive optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1676-1683. (in Chinese)
- [5] 谭鑫,李文昊,巴音贺希格,等. 紫外全息闪耀光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1536-1542.
TAN X, LI W H, BAYANHESHIG, et al.. Fabrication of ultraviolet holographic blazed grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1536-1542. (in Chinese)

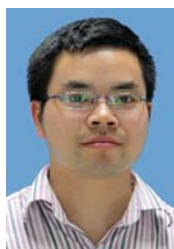
- [6] DAVID C, BRUDER J, ROHBECK T, *et al.*. Fabrication of diffraction gratings for hard X-ray phase contrast imaging [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(5-8): 1172-1177.
- [7] HEILMANN R K, DAVIS J E, DEWEY D, *et al.*. Critical-angle transmission grating spectrometer for high-resolution soft x-ray spectroscopy on the international X-ray observatory [J]. *SPIE*, 2010, 7732: 77321J.
- [8] GE J, BERNECKER J L, MCDAVITT D L, *et al.*. Silicon anamorphic immersion gratings for IR high-resolution spectroscopy with future giant telescopes [J]. *SPIE*, 2003, 4840: 624-633.
- [9] 盛斌, 徐向东, 刘颖, 等. 真空紫外硅闪耀光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 94-99.
SHENG B, XU X D, LIU Y, *et al.*. Vacuum-ultraviolet blazed silicon grating anisotropically etched in KOH solution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 94-99. (in Chinese)
- [10] 郑衍畅. 高线密度 X 射线自支撑闪耀透射光栅的制作 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
ZHENG Y CH. *Fabrication of High Groove Density Freestanding X-ray Blazed Transmission Gratings* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [11] AHN M, HEILMANN R K, SCHATTENBURG M L. Fabrication of 200 nm period blazed transmission gratings on silicon-on-insulator wafers [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2008, 26(6): 2179-2182.
- [12] LI X J, CHEN Y, QIU K Q, *et al.*. Multiple centimetre-long fluidic-channels with smooth and vertical sidewall fabricated by novel NIL mould and thermal bonding [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 98: 720-724.
- [13] WANG Y, LIU ZH K, ZHENG Y CH, *et al.*. High-accuracy alignment of the grating pattern along silicon〈112〉 directions using a short rectangular array [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(6): 065008.
- [14] JAMES T D, PARISH G, WINCHESTER K J, *et al.*. A crystallographic alignment method in silicon for deep, long microchannel fabrication [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(10): 2177-2182.
- [15] ZHENG Y CH, QIU K Q, CHEN H Y, *et al.*. Alignment method combining interference lithography with anisotropic wet etch technique for fabrication of high aspect ratio silicon gratings [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23592-23604.
- [16] SEIDEL H, CSEPREGI L. Design optimization for cantilever-type accelerometers [J]. *Sensors and Actuators*, 1984, 6(2): 81-92.
- [17] 王涓, 孙岳明, 黄庆安, 等. 单晶硅各向异性湿法腐蚀机理的研究进展 [J]. *化工时刊*, 2004, 18(6): 1-4, 24.
WANG J, SUN Y M, HUANG Q A, *et al.*. Research development on wet anisotropic etching mechanism of crystal silicon [J]. *Chemical Industry Times*, 2004, 18(6): 1-4, 24. (in Chinese)
- [18] UENISHI Y, TSUGAI M, MEHREGANY M. Micro-opto-mechanical devices fabricated by anisotropic etching of [110] silicon [C]. *IEEE, Proceedings of 1994 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1995: 319-324.
- [19] AHN M. *Fabrication of Critical-angle Transmission Gratings for High Efficiency X-ray Spectroscopy* [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009.

作者简介:



梁榉曦(1992—),男,四川绵竹人,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事微细加工技术的研究。
E-mail: timljx00@163.com

通讯作者:



邱克强(1980—),男,四川仪陇人,副研究员,2008年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事衍射光学元件制作和短波光学的研究。E-mail: blueleaf@ustc.edu.cn