

蓝宝石表面纳米结构随杂质靶距离的演化

毕 倩, 陈智利, 刘雨昭, 唐 黎, 惠迎雪, 刘卫国

(西安工业大学 光电工程学院 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘 要: 使用微波回旋共振离子源刻蚀蓝宝石 (C 向) 表面, 引入金属不锈钢杂质, 研究了不同靶距处蓝宝石表面自组织纳米结构的演化规律及光学性能。采用原子力显微镜来观察样品表面的形貌变化, Taylor Surf CCI 2000 白光干涉表面测量仪测量蓝宝石样片表面的粗糙度; 选择 X 射线光电子能谱对样品表面的化学成分进行了表征。实验结果表明: 当离子束能量为 1 000 eV, 束流密度为 487 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 入射角度为 65°, 刻蚀时间为 60 min, 蓝宝石样片与杂质靶距离从 1 cm 增加到 4 cm 时, 样片表面出现岛状结构并逐渐演变为连续的条纹结构。同时, 自组织纳米结构随靶距增加, 有序性增加, 纵向高度逐渐减小, 空间频率基本不变。刻蚀后样品表面的金属杂质残留很少, 微结构的形成对蓝宝石具有增透作用。在离子束溅射过程中, 岛状结构的出现促进了样品表面条纹纳米结构的生长, 破坏了纳米结构的有序性。

关键词: 自组织纳米结构; 表面形貌; 表面粗糙度 (RMS); 蓝宝石; 离子束; 原子力显微镜
中图分类号: O484.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200302

Evolution of sapphire surface nanostructure with distance of impurity target

Bi Qian, Chen Zhili, Liu Yuzhao, Tang Li, Xi Yingxue, Liu Weiguo

(Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Film Technology and Optical Test, School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Electron cyclotron resonance ion source has been employed to etch the surface of sapphire (C-cut), introducing metallic stainless steel impurities to investigate the evolution law and optical properties of the self-organized nanostructure on the sapphire surface at different target distances. The atomic force microscope was used to observe the morphological changes of the sample surface, the Taylor Surf CCI 2000 white light interference surface measuring instrument was used to measure the surface roughness; X-ray photoelectron spectroscopy was selected to characterize the chemical composition. The experimental results indicate that, with the ion beam energy of 1 000 eV, the beam current density of 487 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, the oblique incident angle of 65°, and the erosion duration of 60 min, the distance between the sapphire sample and the impurity target increases from 1 cm to 4 cm, island-like structures appear on the sample surface and gradually evolve into continuous ripple structures. At the same time, as the target distance increases, the orderliness of the self-organized nanostructures enhances, the longitudinal height gradually decreases, while the spatial frequency is unchanged. There are very few metal impurities on the etched sample surface. The appearance of microstructures has antireflection effect on sapphire. During the ion beam sputtering process, island-like structures promotes the growth of ripple nanostructures but destroys orderliness.

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-10-26

基金项目: 科技部政府间国际科技创新合作重点专项项目 (2018YFE0199200); 陕西省自然科学基金研究计划 (2018JM6082)

Key words: self-organized nanostructure; surface morphology; surface roughness (RMS); sapphire; ion beam; atomic force microscope (AFM)

0 引言

蓝宝石因具有优良的机械、光学、化学、电学以及抗辐射性能,被广泛应用于光学系统、特种窗口、红外制导等军事、民用、科研高科技领域。而对于光学窗口和移动终端的应用,高透过率是不可缺少的条件。

抗反射薄膜是减少基底材料反射率的重要方法,但薄膜与基底材料存在热失配与结合性差的问题,将会影响器件的稳定性和寿命。而微纳加工技术,如压印、光刻、低能离子束刻蚀技术等^[1-5],通过在材料表面制备的微结构,克服了薄膜材料热膨胀不稳定,粘附性差等问题,受到了极大地关注。

低能离子轰击方法在纳米制作领域极具潜力,在太阳能电池和特殊功能膜的制备等领域已展示出广泛的应用前景^[6]。研究人员已利用低能离子束在蓝宝石表面制备出点状、条纹状、岛状纳米结构^[7-9],但所获得的纳米结构的纵横比有限。

在离子轰击中引入金属杂质,即金属杂质辅助离子束技术,可以在一定程度上提高图形的纵横比^[10-11]。金属杂质辅助离子束作为控制自组织纳米结构生长的有效手段,对自组织纳米结构的演化产生重要的调制作用,如杂质参与会促进纳米结构在小于临界角时生成,提高纳米结构的有序性,调制纳米结构的对称性等^[12-13]。这一技术在调控纳米结构的形状和特征尺寸方面拥有巨大潜力,可应用在微电子器件制造、催化、纳米磁性、等离子体电子等领域。通过对引入金属杂质原子进行控制,使其诱导的表面结构人为可控制,因此,对于金属杂质辅助离子束诱导自组织纳米结构方面的研究与探索至关重要。

近年来,研究人员已经用 Ar^+ 、 Kr^+ 等气体离子在掺杂 Fe、Mo、SS(不锈钢)、Al 等金属离子对 Si、石英表面进行刻蚀^[14-15],进而获得不同纳米结构。国内外科研院所及高校在关于金属辅助离子束诱导纳米结构方面的研究不是很多,并且主要集中于导体材料,对于光学材料上的研究少。另一方面,前人对于金属杂质辅助离子束诱导自组织纳米结构相关研究主要集中在实验规律总结和定性解释上,但该技术诱导自

组织纳米结构内部物理机制尚未明确,因而限制了此技术在纳米制作领域的应用与发展。

当前国内外还未见关于不锈钢共沉积蓝宝石的离子束的报道。将有序结构引入到蓝宝石晶体表面,可有效发挥蓝宝石晶体的自身特性,获得高透射率、高强度且成像质量高等综合特性好的蓝宝石晶体。文中通过金属辅助离子束刻蚀,在蓝宝石基底上制备出具有高纵横比且高度有序的纳米微结构。通过控制斜入射下蓝宝石样片与杂质靶之间的距离,研究了刻蚀后蓝宝石样品表面纳米结构随杂质靶距离演变规律及光学性能。

1 实验条件

1.1 实验设备

为了研究杂质辅助离子束对与杂质靶不同距离处蓝宝石的刻蚀作用,采用自制的离子束刻蚀系统进行了实验。采用微波回旋共振离子源产生等离子体。微波回旋共振离子源工作示意图如图 1 所示。在放电室内,当电子回旋频率和沿磁场传播的右旋圆极化微波频率相等时产生共振,此时电子在微波电场中被不断同步加速而获得的足够大能量,碰撞作气体电子使其分离,实现等离子体放电,形成高密度的 ECR 低温等离子体。 Ar^+ 等离子束用加速栅平行引出,实现对基底的溅射刻蚀。该离子源口径为 $\Phi 120$ mm,离子源微波功率 0~400 W 可调,离子束能量为 200~2 000 eV,束流密度为 0~3 000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

不锈钢是杂质辅助离子束诱导纳米结构研究中常用的杂质之一,因此实验也选择不锈钢作为杂质靶材料。图 2 为此次实验中所用的杂质靶的示意图。该杂质靶是一个垂直高度为 8.66 mm、边长为 10 mm、厚度为 1 mm、长度为 30 mm 的屋脊结构,样片在杂质靶中的放置位置如图中 A、B、C、D 所示,离子束入射方向如图中黑色箭头所示。

采用布鲁克生产的 Innva 型多模式原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 来观察样品表面的形貌变化, Taylor Surf CCI 2000 白光干涉表面测量仪测量蓝宝石样片表面的粗糙度;利用功率谱密度

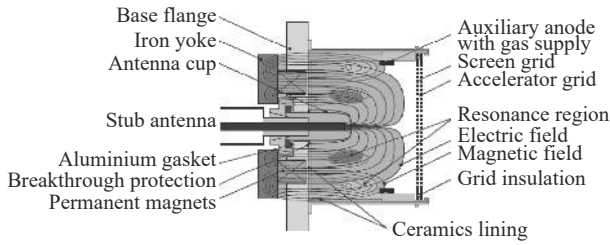


图 1 微波回旋共振离子源工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of microwave cyclotron resonance ion source

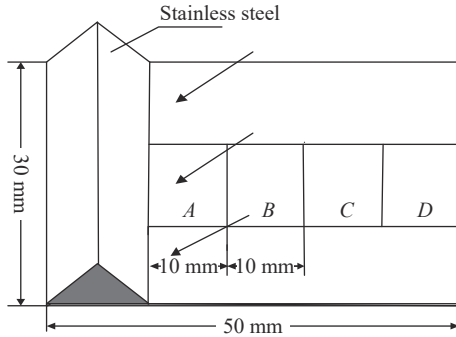


图 2 杂质靶结构: 屋脊结构

Fig.2 Impurity target structure: roof structure

(Power Spectral Density, PSD) 来观察纳米结构有序性; 选择 X 射线光电子能谱 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 对样品表面的化学成分进行了表征, 利用傅里叶红外光谱仪对距杂质靶不同距离处, 刻蚀后的蓝宝石样品进行透射率测量。

1.2 实验参数

实验在室温下进行, 本底真空 2×10^{-3} Pa, 工作真空 2.5×10^{-2} Pa, 加速电压 350 eV, 离子源微波功率为 345 W, 刻蚀气体选用纯度为 99.999% 的 Ar 气, 充气流量由气体流量计控制为 7.0 sccm, 设置的离子束参数如表 1 所示。

在实验中, 基片选用双面抛光 C 向蓝宝石, 样品如图 3 所示。样品安装在具有水冷装置的工件台上, 该工件台可绕自身轴旋转, 离子束入射角度相对于样品表面法线可实现 0~90° 可调。

表 1 离子束参数

Tab.1 Ion beam parameters

Parameters	Value
Angle of incidence/(°)	65
Ion beam current density/ $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	487
Energy of incident ion beam/eV	1000
Erosion duration/min	60

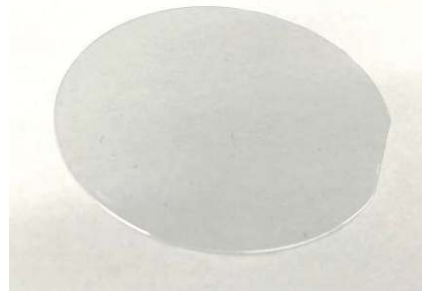


图 3 蓝宝石样品

Fig.3 Sapphire samples

2 理论模型

2.1 Bradley-Harper 模型

Bradley-Harper (BH) 理论模型^[6] 是建立在 Sigmund 溅射理论的基础上提出来的, 描述离子束刻蚀非晶固体表面自组织纳米结构形成的物理机制。由于固体表面局部曲率原子溅射产额的不同, 从而导致溅射速率不同, 因此固体表面形成了调制性的自组织纳米结构。

Bradley 和 Harper 推导了表面形貌演化的线性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -v_0 + v_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K \nabla^4 h + \eta(x, y, t) \quad (1)$$

式中: v_0 为无其他影响时的刻蚀速率; K 为表面扩散导致的弛豫率; $\eta(x, y, t)$ 为高斯随机噪音; v_x, v_y 为刻蚀过程中产生的有效表面张力, 与离子入射角有关。

BH 模型认为由于表面热扩散是在温度较高的条件下才能引起表面平滑, 在高温条件下, BH 模型却可以解释条纹的形成机制, 但是无法解释在低温条件下形成的光滑条纹。

2.2 BH 模型的修正

经过大量实验研究和模型定量分析后发现, 在离子束溅射过程中, 不仅仅只存在表面热扩散这一种平滑机制, 表面粘滞流也是平滑机制很重要的影响因素, 对于表面纳米结构的形成也起到了重要作用。

表面粘滞流是指固体表面的原子因为存在压差而发生的流体性运动, 出现在非晶体材料的表面^[17]。其数学表达式为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -J \Omega \frac{\gamma \Delta^3}{\eta_r} \nabla^4 h \quad (2)$$

式中: Δ 表示存在粘滞流的表面薄层厚度; η_r 表示粘

滞系数; γ 表示表面能; Ω 表示原子体积。

加入了表面粘滞流因素, 修正的 BH 模型可表示为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -v_0 + v_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \left(J\Omega \frac{\gamma \Delta^3}{\eta_r} + K \right) \nabla^4 h + \eta(x, y, t) \quad (3)$$

3 实验结果与讨论

3.1 样片距杂质靶距离与表面形貌的关系

设置离子束参数为: 入射角度 65° , 入射能量 1000 eV、束流密度 $487 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 刻蚀时间 60 min, 改变样片与杂质靶之间的距离, 样片不旋转。

3.1.1 表面形貌

距不锈钢杂质靶不同距离 x 处, 刻蚀后的蓝宝石 (C 向) 晶体表面形貌如图 4 所示, 图中右下角小图给出了 AFM 测量结果的傅里叶频谱, 图像的扫描范围为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, Z 为纳米结构的纵向高度, 其中样片与杂质靶的距离分别为 $x=1, 2, 3, 4 \text{ cm}$ 。

从实验结果中可以看出, 自组织纳米结构的形貌随着离杂质靶距离的变化有一个明显的演化过程, 该过程按照纳米结构的不同大致可以分为三个区域:

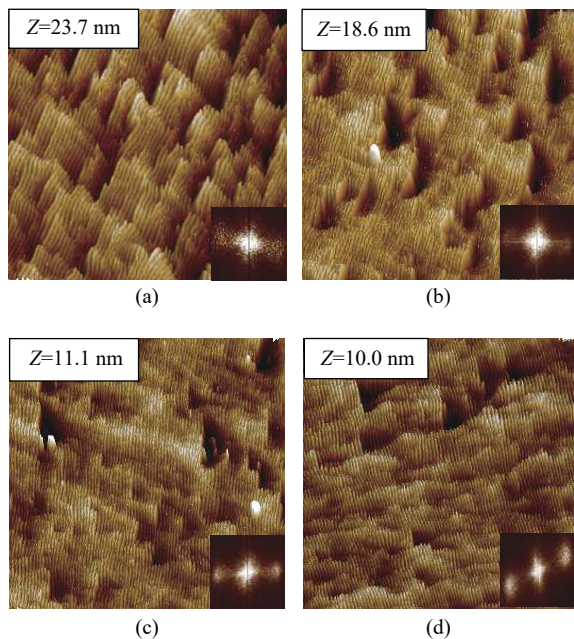


图 4 距杂质靶不同距离处样品表面 AFM 图。(a) $x=1 \text{ cm}$; (b) $x=2 \text{ cm}$; (c) $x=3 \text{ cm}$; (d) $x=4 \text{ cm}$

Fig.4 AFM images of samples at different distances from the impurity target. (a) $x=1 \text{ cm}$; (b) $x=2 \text{ cm}$; (c) $x=3 \text{ cm}$; (d) $x=4 \text{ cm}$

近靶区 (1 cm): 样品表面形成了纵向高度为 23.7 nm 的岛状与条纹状结合的自组织纳米结构, 从傅里叶频谱图观察到了不明显的特征峰。

中间区 (2 cm): 岛状结构密度减小, 纵向纳米高度降低到 18.6 nm, 在傅里叶频谱图中出现了对称点。

远靶区 (3~4 cm): 样品表面的纳米结构的纵向高度继续变小, 样品表面形成了条纹状纳米结构。

3.1.2 有序性和表面粗糙度

离杂质靶不同距离下样品表面的粗糙度和 PSD 曲线如图 5 所示, 从实验结果中可以看出:

近靶区 (1 cm): 样品表面粗糙度为 3.38 nm, 从 PSD 曲线图中观察到了不明显的特征峰, 所以形成的自组织纳米结构有序性较差。

中间区 (2 cm): 从 PSD 曲线中也观察到出现了较为明显的特征峰, 样品表面形成了较为有序的自组织

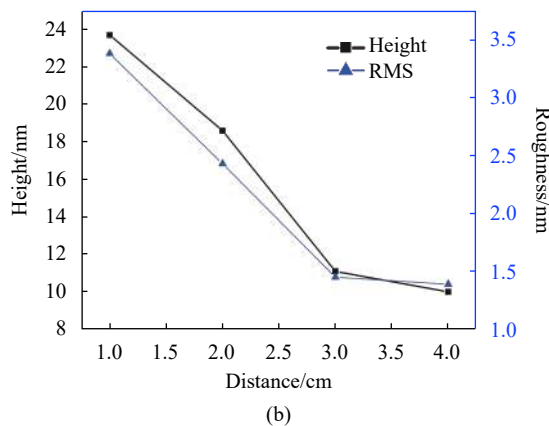
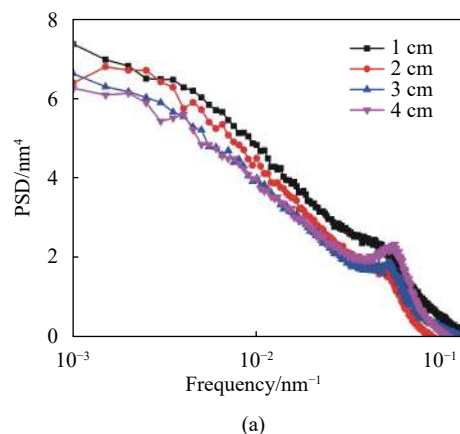


图 5 样品表面 PSD、RMS 和 Height 随杂质靶距离变化的曲线图。

(a) PSD 曲线图; (b) RMS、Height 曲线图

Fig.5 Curves of PSD, RMS and Height of the sample surface with the distance of impurity target. (a) PSD curve graph; (b) RMS, Height curve graph

纳米结构, 纳米结构的空间频率变大, 表面粗糙度也随之减小为 2.43 nm。

远靶区 (3~4 cm): 表面粗糙度一直减小, 从 PSD 曲线中观察到非常明显的特征峰, 样品表面形成了高度有序的条纹状纳米结构。

3.1.3 表面化学成分表征

为了分辨样片表面纳米结构的化学组成, 利用 X 射线光电子能谱 (XPS) 对不锈钢共沉积溅射后的蓝宝石样品表面进行表征, 通过总谱扫描, 分别得到了近靶区 ($x=1$ cm) 和远靶区 ($x=4$ cm) 的 XPS 全谱分析图, 结果如图 6 所示。结果表明, 不锈钢中含有 Fe、Cr 和 Mn 等元素, 从图 6 中无法观察到明显的 Fe、Cr、Mn 的峰, 说明样片表面的金属杂质残留很少。XPS 测量揭示了近靶区和远靶区之间的差异: 在近靶区金属杂质含量相对较高, 而在远靶区较低。通过对 XPS 峰的积分, 估算了样品中主要元素的原子

浓度, 近靶区 Fe 原子浓度为 0.05%, 而远靶区 Fe 原子浓度为 0.01%, 即 XPS 证实了近靶区比远靶区含有更多的金属杂质原子。总体上可以看出, 金属杂质含量随距杂质靶的距离的增加而逐渐减少, 而样片表面残留的金属杂质特别少, 对蓝宝石抗激光损伤能力的负面影响较小。

因此, 结合图 4 刻蚀后蓝宝石样片表面纳米结构形貌, 近靶区的自组织纳米结构的纵向高度远高于远靶区的高度, 且金属杂质残留随距杂质靶距离的增加而减少, 可以得出: 在离子束刻蚀下形成的表面结构差异是金属杂质浓度的差异造成的, 金属杂质浓度差异推动了纳米结构图形的演变。

3.1.4 透射率测量

利用傅里叶红外光谱仪对距杂质靶不同距离溅射后的蓝宝石样片进行透射率测量, 波长范围选择为 1 600~2 500 nm。

如图 7 所示为当入射角度为 65° 、入射能量为 1000 eV、束流密度为 $487 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、刻蚀时间为 60 min 时, 距杂质靶不同距离处蓝宝石样片的透射率。

从图 7 中可以看出, 表面有纳米结构形成的蓝宝石样片的透射率比原始样片的透射率高, 说明表面形成的纳米结构对蓝宝石样片具有增透效果。结合前文中图 4 结果, 样片距离杂质靶越近, 纳米结构的纵向高度越高, 有序性越低, 蓝宝石样片的透射率越低。样品表面的金属杂质残留对光有吸收作用, 对蓝宝石样片的透射率也产生影响, 导致近靶区透射率降低。当纳米结构的纵向高度接近时, 纳米结构有序性

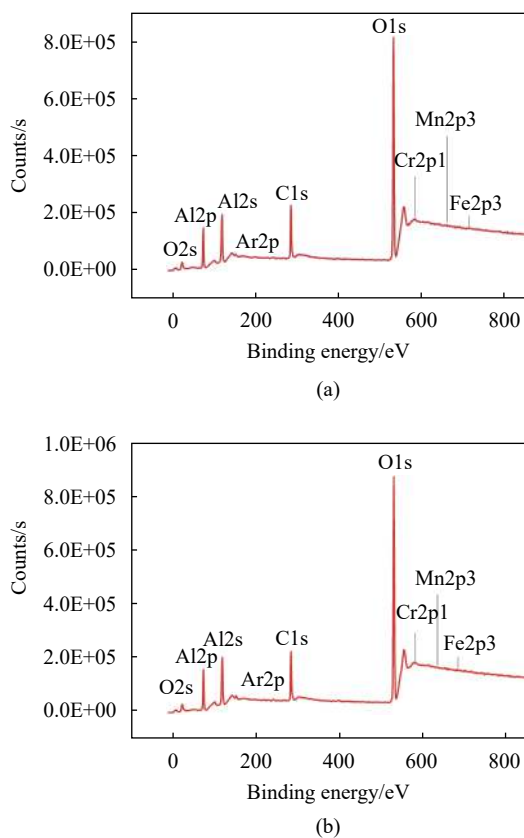


图 6 不锈钢辅助沉积溅射样片表面的 XPS 谱。(a) 近靶区的 XPS 谱; (b) 远靶区的 XPS 谱

Fig.6 XPS spectrum of the surface of stainless steel assisted deposition sputtering samples. (a) XPS spectrum of the near target area; (b) XPS spectrum of the far target area

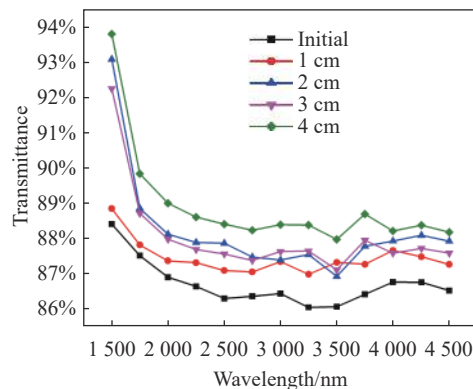


图 7 样品距不锈钢杂质靶不同距离处的透射率
Fig.7 Transmittance of samples at different distances from the stainless steel impurity target

越好,透射率越高。

3.2 讨论

3.2.1 岛状结构促进条纹生长

从上述实验结果分析得出,距离金属杂质靶越近,表面形成的岛状结构密度越大,随着距离越来越远,岛状结构逐渐消失,表面形成了有序的条纹状纳米结构。根据表面活化溅射理论,当杂质沉积到蓝宝石表面时,其表面会形成一层稳定、均匀的覆盖层。该覆盖层是不锈钢与蓝宝石的混合结构。金属杂质原子改变了表面覆盖层中原子的溅射产额(生长作用)和表面扩散(平滑作用)等性质,影响了离子束刻蚀过程中表面生长机制和表面平滑机制的作用强度。在金属杂质辅助离子束溅射过程中,掺入固体表面的金属杂质原子活化了固体表面的溅射性质,同时由于样品与金属靶距离的增加,导致金属杂质在样品表面不均匀沉积,产生了岛状结构逐渐演变为连续条纹状纳米结构的演化现象。

3.2.2 不同距离对特征波长的影响

如图 5(a) 中 PSD 曲线中出现特征峰的位置,所形成的条纹结构的特征波长基本不变。BH 模型理论认为表面平滑机制是由热扩散引起的,无法说明低温时样品表面形成的条纹结构。但在高温情况下,BH 模型能够很好地预测条纹的形成,可解释为入射角度的变化将引起条纹特征波长的变化。在离子束溅射过程中,离子束刻蚀机制和平滑机制相互作用会形成周期性的结构。结合实验中的离子束参数,所设置的离子束入射角度为 65°,因此在离子束刻蚀过程中对条纹结构的特征波长基本无影响,导致特征波长

基本不变。

3.2.3 岛状结构对有序性的影响

从图 4 中可以看出,随着样品距金属杂质靶距离不同,样品表面形成的纳米结构不同:近靶区的样品表面形成了岛状与条纹状结合的纳米结构,且纳米结构的纵向尺寸较高,PSD 曲线图中特征峰不明显,表示纳米结构的有序性较差;远靶区的样品表面形成了单纯的条纹纳米结构,且纳米结构的纵向尺寸较低,PSD 曲线中出现了非常明显的特征峰,表示纳米结构的有序性很好。但是,当纯离子束溅射时,相同的离子束参数下,不同距离处样品表面形成的纳米结构应该是一致的,因为在真空腔室中离子束溅射是均匀的。所以,不同距离处样品表面形成不同的纳米结构与引入的金属杂质密切相关。

当样品距离金属杂质靶非常近时,由于溅射沉积在样品表面的金属杂质浓度较高,金属杂质沉积在岛状结构上的几率会增大,从而在岛状结构顶部形成一层保护层。根据择优溅射理论可知,形成的这层金属保护层会降低此处基底的溅射产额,结合 BH 模型理论,在本身已经产生差距的刻蚀过程中又降低了岛状结构的刻蚀速率,这种差距被继续加大,从而导致纳米结构高度增加。而在溅射过程中,岛状结构会不断产生,表面岛状结构密度变大,进而会产生新的细小的结构,如图 8 所示,从而破坏了表面纳米结构的有序性,但是新产生的纳米结构与初始形成的条纹纳米结构相比,纵向高度和横向尺寸很小,因此只会影响表面纳米结构的有序性而对纳米结构的特征波长无影响。当距离金属杂质靶越来越远时,溅射沉积到

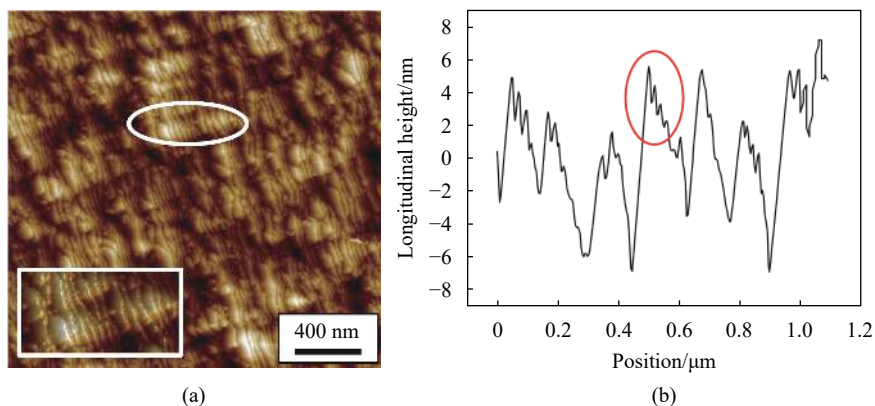


图 8 近靶区样品表面形貌图。(a) 表面形成的岛状结构;(b) 岛状结构的剖面图

Fig.8 Surface topography of the sample near the target area. (a) Island-like structures of the surface; (b) Sectional view of the island-like structures

样品表面的金属杂质浓度变低,从而沉积在岛状结构上的几率变小,因此形成的纳米结构高度下降,由于表面岛状结构密度变小,表面纳米结构有序性逐渐增强。

因此,样品与金属杂质靶之间的距离不同时,金属杂质会不均匀沉积到样品表面的岛状结构上,形成了一层厚度不均匀的保护层,保护层会降低岛状结构的溅射产额,其不均匀性会导致不同处的刻蚀速率差距变大,最终由于表面生长机制的作用促进了纳米结构的生长。岛状结构密度随着金属杂质浓度的降低而减小,所以距杂质靶距离越远,纳米结构的有序性越好。

4 结 论

使用微波回旋共振离子源 (ECR) 的等离子抛光与离子束刻蚀系统,引入金属杂质辅助 Ar^+ 离子束对与杂质靶不同距离处蓝宝石 (C 向) 晶体表面进行了刻蚀,采用原子力显微镜 (AFM) 观察刻蚀后蓝宝石样片的表面形貌, Taylor Surf CCI2000 白光干涉表面测量仪测定蓝宝石样片表面的粗糙度;利用功率谱密度 (PSD) 观察了纳米结构的有序性,选择 X 射线光电子能谱 (XPS) 对蓝宝石晶体表面的化学成分进行了表征,并利用傅里叶红外光谱仪对刻蚀后的基底进行透射率测量,研究了蓝宝石表面所形成的自组织纳米结构随杂质靶不同距离的演化规律及光学性能。

实验结果表明:经过刻蚀后蓝宝石晶体表面的金属杂质残留很少,样片与杂质靶的距离不会影响自组织表面纳米结构的特征波长,有序性和纵向高度随蓝宝石样片距杂质靶距离有一个明显的演化过程,纳米结构的差异是金属杂质浓度作用的结果。利用金属杂质辅助 Ar^+ 离子束溅射蓝宝石表面制备自组织纳米结构,通过调控样品与杂质靶之间的距离可以实现对微纳米结构的特征控制,快速获得高纵横比、高度有序的纳米结构。且此技术刻蚀样品表面后,金属杂质残留很少,纳米结构的形成对蓝宝石样片具有良好的增透效果。这些结果为蓝宝石纳米结构的制造提供了有效依据和参考。

参考文献:

[1] Ban Xuefeng, Zhao Yihao, Wang Cuiquan, et al. Design and

preparation of grating for 808 nm semiconductor distributed feedback laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1105003. (in Chinese)

班雪峰, 赵懿昊, 王翠鸾, 等. 808 nm 半导体分布反馈激光器的光栅设计与制作[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 1105003.

[2] Lan Hongbo, Liu Mingyang, Guo Liangle, et al. Composite imprint lithography for mass producing large-area microstructures [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1516-1527. (in Chinese)

兰红波, 刘明杨, 郭良乐, 等. 面向大面积微结构批量化制造的复合压印光刻[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1516-1527.

[3] Yang Gaoyuan, Cai Maoqi, Li Jinyu, et al. Preparation of subwavelength nanostructures based on low-energy ion bombardment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1736001. (in Chinese)

杨高元, 蔡茂琦, 李金昱, 等. 基于低能离子轰击的亚波长纳米结构制备[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1736001.

[4] Chen Zhili, Liu Weiguo. Surface topography and optical properties of monocrystalline silicon induced by low energy different ion beam parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2490-2495. (in Chinese)

陈智利, 刘卫国. 不同离子束参数诱导单晶硅纳米微结构与光学性能[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2490-2495.

[5] Hu Yueqiang, Li Xin, Wang Xudong, et al. Progress of micro-nano fabrication technologies for optical metasurfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201035. (in Chinese)

胡跃强, 李鑫, 王旭东, 等. 光学超构表面的微纳加工技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9): 20201035.

[6] Huang Q, Jia Q, Feng J, et al. Realization of wafer-scale nano-gratings with sub-50 nm period through vacancy epitaxy [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2437.

[7] Chen Zhili, Liu Weiguo, Yang Lihong. Self-Organizing nano-structure and optical properties of sapphire induced by low energy ion beam [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0306003. (in Chinese)

陈智利, 刘卫国, 杨利红. 低能离子束诱导蓝宝石自组织纳米结构与光学性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0306003.

[8] Liu Yuzhao, Chen Zhili, Fei Mangmang, et al. Irradiation of sapphire under different Kr^+ ion beam parameters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121601. (in Chinese)

刘雨昭, 陈智利, 费芒芒, 等. 不同氪离子束参数下的蓝宝石辐照实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121601.

[9] Fei Mangmang, Chen Zhili, Liu Weiguo, et al. Experimental research on sapphire crystal induced by low energy Kr^+ ion

- beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 48(6): 143-148. (in Chinese)
 费芒芒, 陈智利, 刘卫国, 等. 低能 Kr^+ 离子束诱导蓝宝石晶体实验研究[J]. *光子学报*, 2019, 48(6): 143-148.
- [10] Chen D, Yang G, Li J, et al. Terrace morphology on fused silica surfaces by Ar^+ ion bombardment with Mo co-deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(3): 033102.
- [11] Dipak B, Manabendra M, Prasanta K. Presence of reactive impurities in Ar^+ ion beam plays a key role for Si ripple formation [J]. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, 2019, 444: 54-61.
- [12] Lloyd K S, Bolotin I L, Schmeling M, et al. Metal impurity-assisted formation of nanocone arrays on Si by low energy ion-beam irradiation [J]. *Surface Science*, 2016, 652(11): 334-343.
- [13] Koyiloth V S, Gupta A, Roth S V. Study of pattern transition in nanopatterned Si(100) produced by impurity-assisted low-energy ion-beam erosion [J]. *Applied Physics*, 2017, A123(4): 225.1-225.8.
- [14] Chen Dekang. Self-organized nanostructures on SiO_2 surface induced by low-energy ion bombardment at oblique incidence with impurity co-deposition[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
 陈德康. 包含杂质共沉积的斜入射低能氩离子束诱导石英自组织纳米结构[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [15] Liu Ying, Hirsch D, Fechner R, et al. Nanostructures on fused silica surfaces produced by ion beam sputtering with Al co-deposition[J]. *Applied Physics*, 2018, 124: 73.
- [16] Bradley R M, Harper J M. Theory of ripple topography induced by ion bombardment [J]. *J Vac Sci Technol A Vac Surf Films*, 1988, 6: 2390-2395.
- [17] Harrison M P, Pearson D A, Bradley R M. Emergence and detailed structure of terraced surfaces produced by oblique-incidence ion sputtering [J]. *Phys Rev E*, 2017, 96: 032804.



第一作者简介： 毕倩 (1994-), 女, 硕士生, 主要研究方向为现代光学制造。Email: stubiq@163.com



导师简介： 陈智利 (1973-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士。主要从事磁流变抛光、离子束沉积修正技术等现代光学加工和检测、纳米自组织制备等方面的研究。主持、参与国家级项目 9 项, 省部级项目 5 项, 发表论文 60 余篇, 其中 SCI、EI 收录 20 余篇。授权专利 16 件。Email: medichen@163.com