

不同氪离子束参数下的蓝宝石辐照实验

刘雨昭, 陈智利*, 费芒芒, 惠迎雪, 刘卫国

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032

摘要 在不同氪(Kr)离子束参数下,研究了微波回旋共振离子源对旋转蓝宝石样片表面的刻蚀效果。采用四因素三水平正交实验,分析了 Kr^+ 离子束的入射角度、离子束能量、束流密度、作用时间对辐照后蓝宝石表面结构的影响规律,研究了离子束参数与蓝宝石表面粗糙度、刻蚀速率的关系。实验结果表明:当离子束入射角度为 60° 、能量为 600 eV、束流密度为 $239 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、作用时间为 90 min 时,样品表面的粗糙度最大,且形成的表面形貌具有明显的点状结构;在同样的离子束入射角度、能量和束流密度下,作用时间为 30 min 时,刻蚀速率最大,表面形貌点状结构密集。利用最优参数组合可得到良好的点状纳米结构、最优的粗糙度和刻蚀速率。

关键词 材料; 低能离子束刻蚀; 自组织纳米结构; 粗糙度; 刻蚀速率; 表面形貌

中图分类号 O484.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121601

Irradiation of Sapphire Under Different Kr^+ -Ion Beam Parameters

Liu Yuzhao, Chen Zhili*, Fei Mangmang, Xi Yingxue, Liu Weiguo

College of Information Science and Engineering, Xi'an Technological University,
Xi'an, Shaanxi 710032, China

Abstract We used a microwave gyro resonance ion source to study the etching effects on the surfaces of rotating sapphire samples under different Kr^+ -ion beam parameters. We used the four-factor and three-level orthogonal experiments to analyze the influences of the incident angle, energy, ion flux density, and action time of a Kr^+ -ion beam on the sapphire surface structures after irradiation. We also studied the relationship between ion beam parameters and sapphire surface roughness and etching rates. The experimental results demonstrate that when an ion beam has an incident angle of 60° , an energy of 600 eV, an ion flux density of $239 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, and action time of 90 min, the sample surface roughness after etching is the greatest and the dot-like structures are formed on the sample surface. In contrast, under the same incident angle, energy, and ion flux density of the ion beam, but a shorter etching time of 30 min, the etching rate reaches its maximum value and the dot-like structures on the surface are dense. Therefore, one can obtain good dot-like nanostructures, optimal roughness and etching rate using the optimal combination of parameters.

Key words materials; low-energy ion beam etching; self-organized nanostructure; roughness; etching rate; surface morphology

OCIS codes 160.4236; 350.5400; 310.1210; 160.4760

1 引言

通过低能离子束在固体表面刻蚀形成纳米自组织微结构的方法是一种高效、简便、低成本地制造大面积有序纳米结构的方法。该方法具有加工精度高、对样品表面损伤小、可实现纳米微结构的尺寸控

制、易于实现自动化等特点,是光学微纳米结构制造方法的最新进展和一种不可或缺的新途径。

低能离子束在固体表面进行刻蚀的过程中,固体样品表面的原子因获得能量而失去平衡,原子进行推移,结构变得活跃。低能离子束溅射产生的弯曲使固体样品表面变粗糙,扩散、原子流动又会使固

收稿日期: 2018-12-03; 修回日期: 2019-01-11; 录用日期: 2019-01-18

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM6082)、陕西省科技厅重点基金(2016JZ025)

* E-mail: medichen@163.com

体样品表面变得光滑,粗糙化和光滑化相互作用,导致固体样品表面自发地形成一定的形貌特征,如凸点、条纹、孔洞和光滑等^[1-3]。

欧、美等发达国家对离子束刻蚀形成的自组织纳米结构进行了大量的研究。他们利用 Ar^+ 、 Kr^+ 、 Xe^+ 等稀有气体的离子束在金属、III-V 晶体材料(如 GaSb、InP、InAs、InSb 等)、II-VI 晶体材料(如 MgO、ZnS、ZnSe 等)、IV-IV 材料 Si、Ge 及不定型材料熔石英、聚苯乙烯薄膜等多种材料表面形成了多种多样的自组织纳米微结构,如:点状、柱状、条纹状纳米结构,并研究了纳米结构的形状、周期、方向与离子束参数的关系^[4-11]。

国内研究人员在 2010 年以后开始关注离子束刻蚀形成的纳米结构。国内一些研究人员相继利用 Ar^+ 离子束对单晶硅进行了刻蚀,通过改变离子束入射角度获得了点状及条纹状纳米结构,并研究了自组织纳米结构和离子束参数之间的关系^[12-16]。2015 年,西安工业大学的研究人员使用大束流微波回旋共振离子源产生了 Ar^+ 离子束,并研究了低能 Ar^+ 离子束在不同参数下刻蚀蓝宝石(C 向:沿蓝宝石 C 平面的晶格方向进行切片)表面形成的自组织纳米条纹状结构的特性及其光学性能^[17]。

蓝宝石晶体化学性质稳定,耐高温,抗磨损,具有极高的硬度和机械强度,能承受新一代高速导弹产生的热冲击力,而且其透射波段范围从紫外、可见、红外到微波波段。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。这样的蓝宝石晶体可广泛应用于特种器件(耐高温、耐高压、耐磨损等)、光学系统、特种窗口、耐磨损器件、红外制导、导弹整流罩等高科技领域^[18]。

以往的研究大部分是针对氩气以及硅和 III/V 族化合物的,对于 Kr^+ 离子束刻蚀旋转蓝宝石样品表面所形成的点状纳米结构的研究比较少。本文主要研究低能 Kr^+ 离子束对旋转蓝宝石样片的刻蚀效果,在对蓝宝石样品进行刻蚀的过程中,通过改变 Kr^+ 离子束的入射参数研究离子能量、入射角度、离子束流密度、刻蚀时间对辐照后蓝宝石表面结构的影响规律,并给出离子束参数与蓝宝石刻蚀后表面粗糙度、刻蚀速率的关系。

2 实验条件及参数

2.1 实验条件

本实验采用微波回旋共振离子源(ECR),离子

源口径为 120 mm。离子束入射角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内可调,离子束能量的范围为 200~2000 eV,加速电压的范围为 200~2000 V,束流密度的范围为 $0 \sim 3000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,微波功率的范围为 $0 \sim 400 \text{ W}$ 。

采用双面抛光的蓝宝石(A 向:沿蓝宝石 A 平面的晶格方向进行切片)材料作为样片,其初始表面粗糙度的方均根(RMS)值为 1.78 nm。样片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片表面法线在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内可调。采用原子力显微镜(AFM)来观察表面的形貌变化,利用白光干涉仪测定样片表面的粗糙度 RMS 和刻蚀速率 V 。

实验气体为氪气,本底真空压强为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,工作真空压强为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,加速电压为 200 V,旋转速度为 6 rad/min。

2.2 实验设计

前期研究发现,在低能 Ar^+ 离子束辐照蓝宝石样品表面的过程中,当入射角度在 $45^\circ \sim 70^\circ$ 范围内时,样品表面在沿离子束入射的方向出现柱状结构,而在垂直于离子束入射的方向出现有序的条纹结构,旋转样品可获得点状纳米结构^[17]。为了能够在蓝宝石表面形成显著的点状纳米结构,采用正交实验,选用四因素三水平法^[19-20],即改变离子束的入射角度、束流密度、离子束能量和作用时间 4 个因素。本次实验设计的 Kr^+ 离子束的参数范围为:入射角度的范围为 $50^\circ \sim 70^\circ$ 、离子束流的范围为 $177 \sim 301 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、离子能量的范围为 400~600 eV、刻蚀时间的范围为 30~90 min。研究离子束参数对辐照后蓝宝石表面结构的影响规律,给出离子束参数与蓝宝石粗糙度、刻蚀速率的关系,确定最佳实验参数并进行实验验证。水平因素分布如表 1 所示。

表 1 水平因素分布

Table 1 Level-factor distribution

Level	Angle of incidence / ($^\circ$)	Ion beam flux density / ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Energy of incident ion / eV	Etching time / min
1	50	177	400	30
2	60	239	500	60
3	70	301	600	90

3 实验结果及分析

利用原子力显微镜和白光干涉仪对刻蚀后的 9 组样片进行测量分析,正交实验的结果如表 2 所示。表 2 中数值 1、2、3 代表取水平 1、2、3 中对应参数的值。

表2 正交实验表
Table 2 Orthogonal test

Number	Level				RMS of roughness /nm	Etching rate / (nm · min ⁻¹)
	Angle of incidence	Ion beam flux density	Energy of incident ion	Etching time		
a	1	1	1	1	1.07	0.41
b	1	2	2	2	1.28	0.36
c	1	3	3	3	2.21	0.33
d	2	1	2	3	1.71	0.40
e	2	2	3	1	3.21	1.80
f	2	3	1	2	1.74	0.64
g	3	1	3	2	0.97	0.45
h	3	2	1	3	1.16	0.26
i	3	3	2	1	0.79	0.40

3.1 表面粗糙度和刻蚀速率的极差与方差分析

蓝宝石样片表面粗糙度、刻蚀速率测量结果如表2所示,对测量得到的表面粗糙度和刻蚀速率结果分别进行极差和方差分析,结果分别如表3和

表4所示,其中 $\text{Mean}(i)$ 表示对应参数按照水平 i 取值的3组正交实验中所测表面粗糙度和刻蚀速率的平均差, R 表示极差。

表3 表面粗糙度和刻蚀速率的极差分析表

Table 3 Range analysis of surface roughness and etching rate

Parameter (level)	Angle of incidence		Ion beam flux density		Energy of incident ion		Etching time	
	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate
	Mean(1)	1.52	0.37	1.25	0.42	1.32	0.44	1.69
Mean(2)	2.22	0.95	1.88	0.81	1.26	0.39	1.33	0.48
Mean(3)	0.97	0.37	1.58	0.46	1.58	0.86	1.70	0.33
Range R	1.25	0.58	0.63	0.39	0.87	0.47	0.37	0.54

表4 表面粗糙度和刻蚀速率的方差分析表

Table 4 Variance analysis of surface roughness and etching rate

Factor	Deviation		Degree		Mean square deviation		F value		Significant level	
	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate	RMS of roughness	Etching rate
	Angle	2.343	0.669	2	2	1.172	0.334	3.251	3.210	0.089
Flux density	0.602	0.273	2	2	0.301	0.137	0.450	0.533	0.658	0.612
Energy	1.412	0.406	2	2	0.706	0.203	1.321	0.865	0.335	0.468
Time	0.262	0.465	2	2	0.131	0.232	0.180	1.034	0.839	0.411

根据极差分析,各因素对蓝宝石表面粗糙度影响的顺序(从大到小)为:入射角度,离子束能量,束流密度,作用时间;各因素对蓝宝石表面的刻蚀速率影响的顺序(从大到小)为:入射角度,作用时间,离子束能量,束流密度。

表4中 Degree表示自由度, F value表示显著性,其值越大,显著性越高。从表4中可以看出离子束的入射角度对蓝宝石表面粗糙度、刻蚀速率影响显著水平高,而其他3个因素的显著水平均大于0.1,故判定其他3个因素对粗糙度的影响显著

水平不高。

通过正交实验结果和极差分析,以 X 轴作为离子束的因素水平参数, Y 轴作为蓝宝石表面粗糙度和刻蚀速率的大小,绘制本次实验选取的4个因素和测量结果的关系图,如图1所示。

由图1可以直观得出以下结论:

- 1) 当入射角度为 60° ,其他因素不变时,蓝宝石表面粗糙度、刻蚀速率均最大。
- 2) 当束流密度为 $239 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,其他因素不变时,蓝宝石表面粗糙度、刻蚀速率均最大。

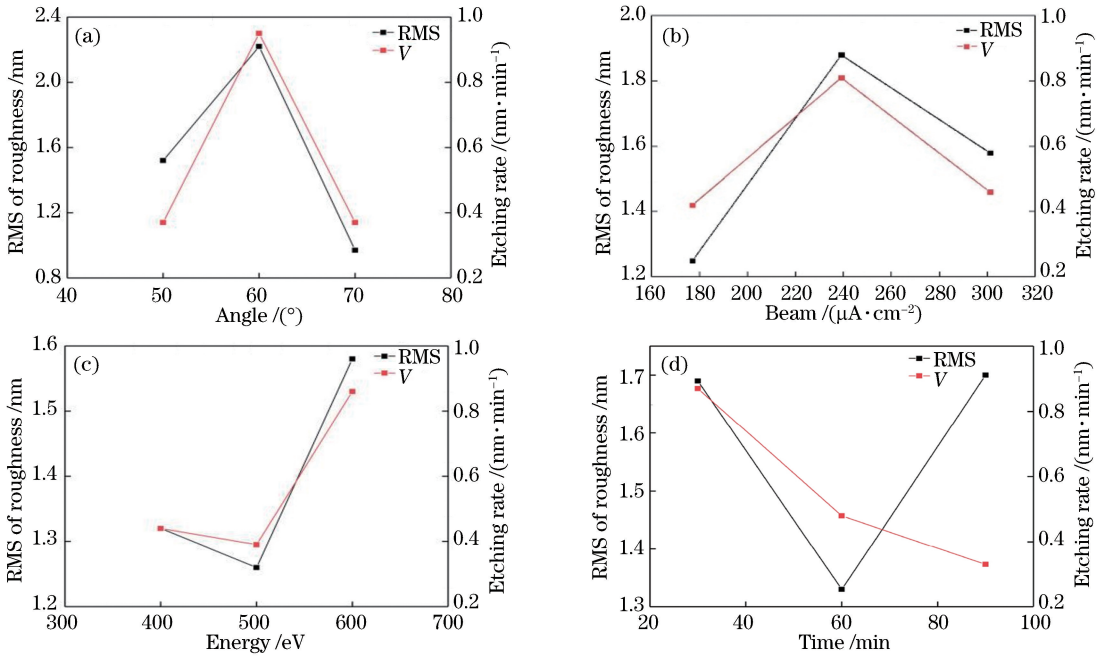


图 1 粗糙度和刻蚀速率与不同因素的关系。(a)入射角度;(b)离子束流;(c)离子能量;(d)刻蚀时间

Fig. 1 Roughness and etching rates under different factors. (a) Angle of incidence; (b) ion beam flux density; (c) ion energy; (d) etching time

3) 当能量为 600 eV,其他因素不变时,蓝宝石表面粗糙度、刻蚀速率均最大。

4) 当作用时间为 90 min,其他因素不变时,蓝宝石表面粗糙度最大;当作用时间为 30 min 时,蓝宝石刻蚀速率最大。

通过上述分析可知,使样片表面粗糙度最大的最优实验参数选择为 $A_2B_2C_3D_3$,即:离子束入射角度为 60° 、束流密度为 $239 \mu A \cdot cm^{-2}$ 、离子束能量为 600 eV、刻蚀时间为 90 min;使刻蚀速率最大的最优实验参数选择为 $A_2B_2C_3D_1$,即离子束入射角度为 60° 、束流密度为 $239 \mu A \cdot cm^{-2}$ 、离子束能量为 600 eV、刻蚀时间为 30 min(与 e 组实验参数相同)。

溅射粗糙化和表面弛豫机制相互作用,样品表

面会形成自组织纳米结构。随着纳米结构的出现,样品表面粗糙度也会不断增大。当入射角度为 60° 、束流密度为 $239 \mu A \cdot cm^{-2}$ 、能量为 600 eV,作用时间为 90 min 时,在样品表面形成的点状纳米结构最为明显,因此表面粗糙度最大。离子轰击表面的刻蚀速率是由溅射产额决定的,在入射角度为 60° 、束流密度为 $239 \mu A \cdot cm^{-2}$ 、能量为 600 eV,作用时间为 30 min 时,携带能量的离子溅射样品的溅射产额最大,所以刻蚀速率最大。

3.2 表面纳米结构的测量结果与分析

利用原子力显微镜对刻蚀后的蓝宝石样片进行测量,在对原始测量结果图片进行调平和滤波后可得到蓝宝石样片表面纳米结构的表面形貌图,如图 2 所示,图中 Z 表示自组织纳米结构的纵向高度。

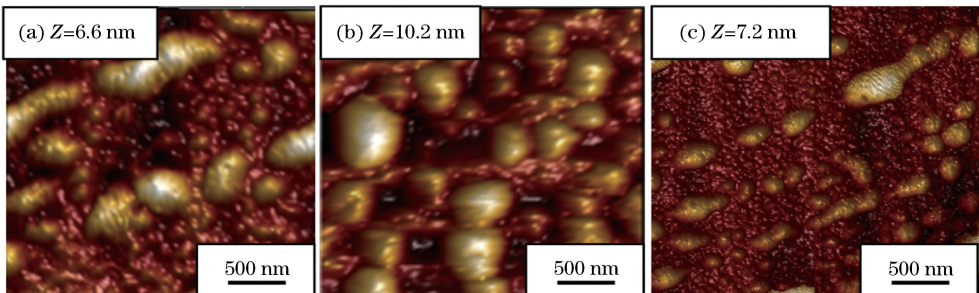


图 2 不同刻蚀参数下蓝宝石的 AFM 图

Fig. 2 AFM images of sapphire under different etching parameters

观察刻蚀后的蓝宝石 AFM 图可发现:当离子束入射角度为 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 时,样片表面粗糙度呈先增大后减小的趋势。样品表面形成的纳米自组织结构是离子束刻蚀粗糙化和分子扩散弛豫化相互作用的结果。当入射角度为 50° 时,粗糙度均值为 1.52 nm ,样片表面形貌如图 2(a) 所示,点状纳米结构开始出现,结构特征较为明显,此时粗糙化开始起作用。当入射角度为 60° 时,粗糙度均值为 2.22 nm ,样片表面形貌如图 2(b) 所示,点状结构密集,此时粗糙化起主要作用。当入射角度为 70° 时,粗糙度均值为 0.97 nm ,样片表面形貌如图 2(c) 所示,形成比较稀疏的纳米结构,此时分子扩散弛豫化起主要作用。

3.3 最佳实验参数的验证实验

根据上述分析,可得到每个因素都有最优参数,对每个因素的最优参数进行组合,即可得到最好的刻蚀参数。若要得到的样品表面粗糙度最大,入射角度应为 60° 、束流密度应为 $239\ \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、离子束能量应为 600 eV 、作用时间应为 90 min ;若要得到的样品刻蚀速率最大,入射角度应为 60° 、束流密度应为 $239\ \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、离子束能量应为 600 eV 、作用时间应为 30 min 。采用以上数据进行实验验证,对刻蚀后的样片表面进行测量,所得样品的表面形貌如图 3 所示。

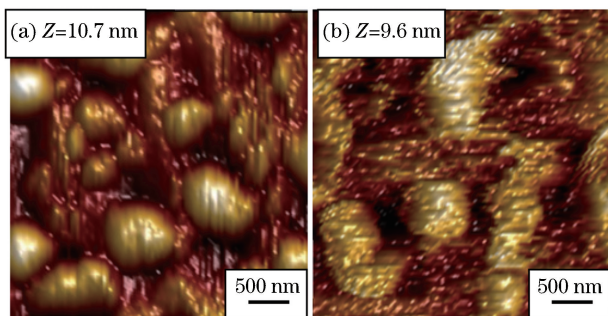


图 3 样品表面形貌。(a)表面粗糙度;(b)刻蚀速率
Fig. 3 Sample surface morphologies. (a) Surface roughness; (b) etching rate

用白光干涉仪测量最优参数下蓝宝石表面的粗糙度为 4.06 nm 。对照表 2,可以看出最佳参数实验结果的粗糙度最大,且形成的表面形貌具有明显的点状纳米结构。用白光干涉仪测量最优参数下蓝宝石的刻蚀速率为 $1.89\text{ nm}/\text{min}$ 。对照表 2,可以看出最佳参数实验的刻蚀速率与 e 组接近,为几组实验中的最大值,且表面形貌结构密集。

因此,在最佳参数下对样品表面进行刻蚀可使样品表面的粗糙度和刻蚀速率最大,即当样品表面

形成了明显的点状结构时粗糙度达到 4.06 nm ,当纳米结构的纵向高度最大时刻蚀速率达到 $1.89\text{ nm}/\text{min}$ 。粗糙度能反映晶体表面的微观不平整度,从侧面说明自组织纳米结构的形成情况,粗糙度大则样品纳米结构的纵向高度较大。原子力显微镜的测量结果也验证了这种观点。刻蚀速率能反映出离子束在刻蚀期间对样品表面的去除作用。

4 结 论

采用四因素三水平正交实验,通过改变 Kr^+ 离子束参数(入射角度、离子束能量、束流密度、作用时间)对旋转蓝宝石样片表面进行刻蚀。研究离子束参数对刻蚀后蓝宝石表面粗糙度及刻蚀速率的影响,确定最佳实验参数,并对最佳参数进行实验验证。

研究发现,4 个参数对刻蚀后的蓝宝石表面粗糙度及生成的纳米结构的影响顺序(从大到小)为:入射角度,离子束能量,束流密度,作用时间;对刻蚀期间蓝宝石的刻蚀速率及生成的纳米结构的影响顺序(从大到小)为:入射角度,作用时间,离子束能量,束流密度。当离子束入射角度为 60° 、离子束能量为 600 eV 、束流密度为 $239\ \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、离子束作用时间为 90 min 时,样品表面粗糙度最大,且样品表面具有明显的点状结构;当离子束入射角度为 60° 、离子束能量为 600 eV 、束流密度为 $239\ \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、离子束作用时间为 30 min 时,刻蚀速率最大,表面形貌结构密集。

综上所述,通过低能 Kr^+ 离子束刻蚀旋转蓝宝石晶体可在其表面后生成良好的点状纳米结构。在最优的离子束参数下,所得蓝宝石晶体表面的粗糙度和刻蚀速率能够达到最佳的效果。

参 考 文 献

- [1] Vishnyakov V, Carter G. Ne^+ , Ar^+ and Xe^+ ion bombardment induced and suppressed topography on Si[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1995, 106: 174-178.
- [2] Chan A C T, Wang G C. Roughness evolution of Si (111) by low-energy ion bombardment[J]. Surface Science, 1998, 414(1/2): 17-25.
- [3] de Rooij-Lohmann V I T A, Kozhevnikov I V, Peverini L, *et al.* Roughness evolution of Si surfaces upon Ar ion erosion[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(16): 5011-5014.
- [4] Frost F, Rauschenbach B. Nanostructuring of solid

- surfaces by ion-beam erosion[J]. Applied Physics A, 2003, 77(1): 1-9.
- [5] Ziberi B, Frost F, Tartz M, *et al.* Importance of ion beam parameters on self-organized pattern formation on semiconductor surfaces by ion beam erosion[J]. Thin Solid Films, 2004, 459(1/2): 106-110.
- [6] Ziberi B, Frost F, Höche T, *et al.* Ion-induced self-organized dot and ripple patterns on Si surfaces[J]. Vacuum, 2006, 81(2): 155-159.
- [7] Frost F, Ziberi B, Schindler A, *et al.* Surface engineering with ion beams: from self-organized nanostructures to ultra-smooth surfaces[J]. Applied Physics A, 2008, 91(4): 551-559.
- [8] El-Atwani O, Huynh C, Norris S. Utilizing neon ion microscope for GaSb nanopatterning studies: nanostructure formation and comparison with low energy nanopatterning[J]. Applied Surface Science, 2016, 370: 557-564.
- [9] Redondo-Cubero A, Galiana B, Lorenz K, *et al.* Self-organised silicide nanodot patterning by medium-energy ion beam sputtering of Si (100): local correlation between the morphology and metal content [J]. Nanotechnology, 2016, 27 (44): 444001.
- [10] Steeves Lloyd K, 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: 334-343.
- [11] Babonneau D, Vandenhecke E, Camelio S. Formation of nanoripples on amorphous alumina thin films during low-energy ion-beam sputtering: experiments and simulations[J]. Physical Review B, 2017, 95(8): 085412.
- [12] Liu W G, Xu X H, Chen Z L. The fabrication of self-organized nanostructures [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2010, 30(5): 409-415.
刘卫国, 许晓慧, 陈智利. 自组织纳米微结构的制备技术[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(5): 409-415.
- [13] Chen Z L, Li R, Liu W G. Morphology and roughness on silicon surface during low energy ion beam erosion [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2012, 32(6): 443-446, 450.
陈智利, 李瑞, 刘卫国. 低能离子束刻蚀单晶硅表面形貌与粗糙度的研究[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(6): 443-446, 450.
- [14] Chen Z L, Liu W G. Microstructures and optical properties of crystalline Si surfaces modified by low energy ion beam erosion [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(8): 826-831.
陈智利, 刘卫国. 低能斜入射离子束诱导单晶硅纳米结构与光学性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(8): 826-831.
- [15] Chen Z L, Liu W G. 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.
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.
- [16] Chen Z L, Liu W G. Nanodots pattern and optical properties of monocrystalline silicon induced by low energy ion beam [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922003.
陈智利, 刘卫国. 低能离子束诱导单晶硅点状纳米结构与光学性能研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922003.
- [17] Chen Z L, Liu W G, Yang L H. Self-organizing nano-structure and optical properties of sapphire induced by low energy ion beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0306003.
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.
- [18] Huang C Q, Xia Y, Chen B, *et al.* Study progress of the manufacturing process of patterned sapphire substrates[J]. Semiconductor Technology, 2012, 37(7): 497-503, 581.
黄成强, 夏洋, 陈波, 等. 图形化蓝宝石衬底工艺研究进展[J]. 半导体技术, 2012, 37(7): 497-503, 581.
- [19] Ren N F, Zhang L, Wang H X, *et al.* Orthogonal experiments and variance analysis in Nd : YAG pulsed laser trepanning drilling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061408.
任乃飞, 张丽, 王后孝, 等. Nd : YAG 脉冲激光环切打孔正交实验及方差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061408.
- [20] Wang H J, Li Y L, Li P. Orthogonal experiment on laser cutting of AZ31B magnesium aluminum alloys [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101405.
王洪建, 李永亮, 李平. 激光切割 AZ31B 镁铝合金正交实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101405.