

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170407005

# Ar<sup>12+</sup>离子辐照对金属玻璃和金属钨表面微观结构和性能的影响

张琪, 梅显秀, 张小楠, 马雪, 王友年

(大连理工大学 三束材料改性教育部重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 为研究金属玻璃作为航空航天领域材料的可能性。采用能量为 3 MeV, 不同剂量的 Ar<sup>12+</sup>离子辐照金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub>, 研究金属玻璃的耐高电荷态离子的辐照行为, 并与金属钨做比较。经 SRIM 模拟计算得出, 3 MeV Ar<sup>12+</sup>离子在金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 和金属钨中的射程分别为 1.19 μm 和 0.77 μm; 金属玻璃和金属钨的原子平均离位 (DPA) 峰值均出现在离子射程附近。不同剂量 Ar<sup>12+</sup>离子辐照后, 金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 均保持非晶特性, 均方根粗糙度随着辐照剂量的增加而增大。剂量 1×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> 时, 金属玻璃表面没有明显的辐照损伤; 剂量为 1×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> 时, 波长 1 400 nm 对应的金属玻璃的反射率降低了约 28%。而剂量 1×10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup> 时, 金属钨的反射率就降低了 30%, 剂量为 1×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> 时, 金属钨表面有大面积孔洞产生。

**关键词:** 金属玻璃; 高电荷态离子; 辐照; 金属钨

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0036-08

## Effects of Ar<sup>12+</sup> Ion Irradiation on the Surface Micro Structure and Properties of Metallic Glass and Tungsten

ZHANG Qi, MEI Xian-xiu, ZHANG Xiao-nan, MA Xue, WANG You-nian

(Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning)

**Abstract:** To study the possibility of metallic glass as a material in the aerospace field. Damage induced by highly charged ion irradiation in metallic glass was studied and compared with that in tungsten. Bulk metallic glass Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> was irradiated with 3 MeV Ar<sup>12+</sup> at different fluences. SRIM results show that the ion range of Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> and tungsten are 1.19 μm and 0.77 μm, respectively. The displacements per atom (DPA) peaks of Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> and tungsten are located close to the ion ranges. The metallic glass maintained amorphous at different fluences without obvious irradiation damage on the surface. The root-mean-square roughness of the surface in metallic glass increases with the increase of fluences. The reflectivity of metallic glass decreases by 28% at the fluence of 1×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup>; While the reflectivity of tungsten decreases by 30% at the fluence of 1×10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup>. As the fluence increased to 1×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup>, some holes are found on the surface of tungsten.

**Keywords:** metallic glass; highly charged ion; irradiation; tungsten

收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-09-06

网络出版日期: 2017-09-11 16:44; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1644.014.html>

通讯作者: 梅显秀 (1968—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 离子束辐照损伤; **E-mail:** xxmei@dlut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (11675035, 11375037)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (11675035, 11375037)

引文格式: 张琪, 梅显秀, 张小楠, 等. Ar<sup>12+</sup>离子辐照对金属玻璃和金属钨表面微观结构和性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 36-43.

ZHANG Q, MEI X X, ZHANG X N, et al. Effects of Ar<sup>12+</sup> ion irradiation on the surface micro structure and properties of metallic glass and tungsten[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 36-43.

## 0 引言

高电荷态离子作为带电载能离子, 广泛存在于宇宙中, 会对航天飞行器造成一定的辐照损伤; 同时, 核聚变反应堆中也含有大量的高电荷态离子辐照, 因此高电荷态离子对材料的辐照损伤研究得到广泛关注<sup>[1-2]</sup>。高电荷态离子具有高正电荷、离子半径小、电场强度高特点, 其轰击固体材料表面时会产生强烈的溅射现象<sup>[3-4]</sup>, 在短时间内对材料造成严重的辐照损伤。Ar<sup>12+</sup>离子, 具有高损伤速率, 在材料中产生的辐照损伤会更严重; 而且 Ar 是惰性气体, 不容易与其他物质发生化学反应, 有利于观察单纯的高电荷态离子辐照效应。

金属玻璃即非晶态金属合金, 在原子排列上具有长程无序、短程有序的非晶结构特征<sup>[5]</sup>, 没有传统晶体材料中的晶界、位错等缺陷, 是一种新型的功能和结构材料。金属玻璃不仅具有很高的强度、硬度、弹性<sup>[6]</sup>, 良好的导热率、耐磨和耐腐蚀性能, 而且由于其具有大量自由体积的特性<sup>[6]</sup>, 在低于其晶化开始温度时具有较好的耐辐照性能。MAYR S.G. 等<sup>[7]</sup>采用分子动力学模拟计算表明, 大块金属玻璃可以作为理想的工程材料应用于辐照环境。Zhang 等<sup>[8]</sup>利用 H<sup>+</sup>离子辐照 Fe 基、Ni 基金属玻璃, Fe 基和 Ni 基金属玻璃均表现出良好的抗 H<sup>+</sup>辐照能力; Mei 等<sup>[9]</sup>采用 He<sup>2+</sup>辐照 Cu 基金属玻璃, 表明 Cu 基金属玻璃在低于其晶化转变温度时有良好的耐辐照性能; Liu 等<sup>[10]</sup>采用强流脉冲离子束辐照 Zr 基金属玻璃和金属钨, Zr 基金属玻璃的抗辐照性能优于金属钨; 文静等<sup>[11]</sup>采用 H 等离子体辐照 Zr 基、Co 基金属玻璃和多晶 Mo, 研究表明: 在相同的辐照条件下, 金属玻璃的抗 H 离子的辐照能力优于多晶 Mo, 其中 Co 基金属玻璃表面基本不吸收 H, 抗 H 等离子体溅射能力强, 辐照后金属玻璃表面仍然保持较高的反射率, 符合国际热核聚变实验堆 (International thermonuclear experimental reactor, ITER) 光学诊断系统对第一镜材料的要求, 可作为第一镜候选材料。在众多金属玻璃中, Co 基金属玻璃因其强度高, 较高的玻璃化转变温度<sup>[11]</sup>等特点, 在非晶研究领域得到广泛的关注和研究。

因此采用高电荷态离子模拟太空和聚变堆中的辐照环境, 研究高电荷态离子对金属玻璃的

辐照损伤具有重要意义。文中利用不同剂量的 3 MeV Ar<sup>12+</sup>离子对金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 和目前最具有前景的面向等离子体材料的金属钨<sup>[12-13]</sup>进行辐照, 研究 Ar<sup>12+</sup>离子辐照对 Co 基金属玻璃和金属钨的微观结构、表面形貌和反射率的影响, 比较 Co 基金属玻璃和金属钨的抗 Ar<sup>12+</sup>离子辐照能力。

## 1 试验与方法

试验采用真空电弧熔炼吸铸法, 选用纯度高达 99.99% 的金属 Co, B, Si, Ta 制备金属合金 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub>, 制备成的金属玻璃棒材直径为 3 mm, 切成厚度为 2 mm 的圆片。金属钨的纯度达到 99.5%, 尺寸为 5 mm×3 mm×2 mm。Co 基金属玻璃和金属钨分别经机械抛磨, 丙酮, 酒精超声清洗后进行 Ar<sup>12+</sup>离子辐照试验。金属玻璃和金属钨的辐照试验在中国科学院兰州近代物理研究所的 320 kV 高电荷态离子综合研究平台上完成。Ar<sup>12+</sup>离子辐照能量为 3 MeV, 束流强度 1.12 μA, 辐照剂量为 1×10<sup>14</sup>、1×10<sup>15</sup> 和 1×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup>。

利用薄膜 X 射线衍射仪 (D8 Discover XRD) 测量 Co 基金属玻璃的相结构变化, 分析模式为掠入射 X 射线衍射 (Grazing Incident X-ray Diffraction, GIXRD), 入射角为 1°, 射线源为 Cu-Kα, λ=0.154 06 nm; 采用扫描电子显微镜 (JSM-5600LV SEM) 分析金属玻璃和金属钨的表面损伤情况; 利用原子力显微镜 (Agilent Olympus Ix7 AFM) 计算金属玻璃均方根粗糙度的变化; 选用椭偏仪 (M2000, λ=370~1 700 nm) 分析金属玻璃和金属钨辐照前后表面反射率的变化。

## 2 结果和讨论

### 2.1 SRIM 模拟

使用 SRIM2013 程序模拟计算 Ar<sup>12+</sup>离子注入后金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 和金属钨的表面损伤和离子浓度。表 1 是 SRIM 模拟 10 000 个 3 MeV 的 Ar<sup>12+</sup>离子正入射到金属玻璃和金属钨表面的计算结果。从表中可以看出, Ar<sup>12+</sup>离子辐照引起的金属玻璃表面的核能损和电子能损均比金属钨小, 金属玻璃的溅射产额比金属钨低; Ar<sup>12+</sup>离子在金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 和金属钨中的射程分别为 1.19 μm 和 0.77 μm。

表1 SRIM2013 模拟 Ar<sup>12+</sup>离子辐照金属玻璃和金属钨得到的射程、核能损、电子能损、密度及溅射产额Table 1 SRIM2013 simulation of ion range, electronic (Se) and nuclear (Sn) stopping powers, density and sputtering yield for Ar<sup>12+</sup> ions irradiated in metallic glass and tungsten

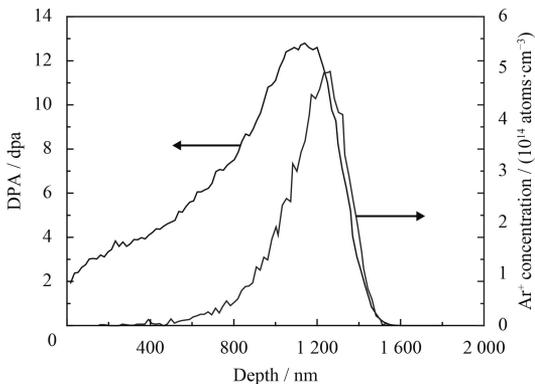
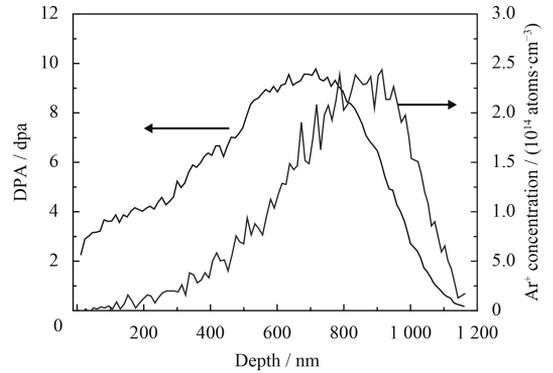
Material	Range / $\mu\text{m}$	Electronic stopping power / ( $10^2\text{eV}\cdot\text{\AA}^{-1}$ )	Nuclear stopping power / ( $\text{ev}\cdot\text{\AA}^{-1}$ )	Density / ( $10^{22}\text{atoms}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Sputtering yield / ( $\text{atoms}\cdot\text{ion}^{-1}$ )
Co <sub>61.2</sub> B <sub>26.2</sub> Si <sub>7.8</sub> Ta <sub>4.8</sub>	1.19	2.960	16.37	8.517 7	0.337
W	0.77	3.635	27.73	6.338 1	0.424

原子平均离位 (Displacements per atom, DPA) 用来表示离子注入所造成的损伤程度<sup>[4]</sup>, 它与辐照剂量, 原子密度和离位阈值有关。DPA 的计算公式为:

$$\text{DPA} = \frac{0.8}{2E_d} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{nuclear}} \frac{\Phi_t}{\rho} \quad (1)$$

式中  $E_d$  是材料的离位域能;  $\Phi_t$  是入射离子剂量;  $\rho$  是靶材料密度;  $(dE/dx)_{\text{nuclear}}$  是离子注入过程中每个离子转移到靶材料上的能量, 可以由 SRIM 程序输出的空位分布、空位结合能和声子能损分布计算得出。

图1为剂量  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 的 Ar<sup>12+</sup>离子辐照后在 Co 基金属玻璃中产生的 DPA 和 Ar<sup>12+</sup>离子浓度随入射深度的分布曲线。在图1中, Ar<sup>12+</sup>离子浓度峰在入射深度 1 300 nm 处; DPA 峰值为 13, 出现在入射深度 1 100 nm 处。图2是  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 的 Ar<sup>12+</sup>离子辐照在金属钨中产生的 DPA 和 Ar<sup>12+</sup>离子浓度随入射深度的分布曲线。从图中可以看到, Ar<sup>12+</sup>离子辐照后, 在金属钨中的 DPA 峰值接近于 10, 出现在入射深度 700 nm 处, Ar<sup>12+</sup>离子浓度峰在入射深度 800~1 000 nm 之间。可见在金属钨中 Ar<sup>12+</sup>离子浓度分布在较窄的深度范围, 在金属玻璃中的 Ar<sup>12+</sup>离子分布较分散。金属玻璃

图1 Ar<sup>12+</sup>辐照金属玻璃的 DPA 和 Ar<sup>12+</sup>离子浓度分布曲线Fig.1 Depth profiles of DPA and Ar<sup>12+</sup> concentration for metallic glass by Ar<sup>12+</sup> ion irradiation图2 Ar<sup>12+</sup>辐照金属钨的 DPA 和 Ar<sup>12+</sup>离子浓度分布曲线Fig.2 Depth profiles of DPA and Ar<sup>12+</sup> concentration for tungsten by Ar<sup>12+</sup> ion irradiation

Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 为典型的非晶结构, 含有大量的自由体积, 不存在晶界, 注入到金属玻璃中的 Ar<sup>12+</sup>离子更容易扩散; 而金属钨为各向异性的晶体结构, 在晶界处容易捕获 Ar<sup>12+</sup>离子, 使得 Ar<sup>12+</sup>离子积聚, 所以在金属钨中的 Ar<sup>12+</sup>离子浓度分布比较集中。

金属钨的离位域能  $E_d$  为 90 eV, 远大于金属玻璃的离位域能 (36 eV), 根据 DPA 计算公式, Ar<sup>12+</sup>离子辐照后在金属玻璃中的 DPA 峰值大于在金属钨中的。Ar<sup>12+</sup>辐照在金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 和金属钨中产生的 DPA 峰值和 Ar<sup>12+</sup>离子浓度峰值均出现在各自的 Ar<sup>12+</sup>离子射程附近。辐照使靶材料的离子射程末端存在大量空位, 因而 DPA 的峰值出现在离子射程附近, Ar<sup>12+</sup>在空位处滞留, Ar<sup>12+</sup>浓度峰值也就出现在离子射程附近; 而由于 Ar<sup>12+</sup>离子在材料中的扩散, 从图1和图2中看到 Ar<sup>12+</sup>浓度峰值相对于 DPA 峰值均有一定程度的滞后现象。A. Garcia-Carrasco 等<sup>[15]</sup>在 He 离子辐照金属 Mo 的试验中采用重离子弹性反冲测量技术 (HIERDA) 测量 He 离子的浓度分布, 结果 He 离子的浓度分布也出现与文中一致的滞后现象。

## 2.2 Ar<sup>12+</sup>辐照对金属玻璃结构和性能的影响

图3所示为金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 辐照

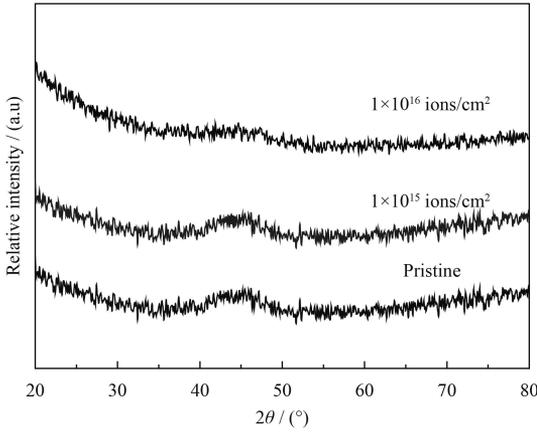


图3 Ar<sup>12+</sup>离子辐照前后 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 金属玻璃的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of metallic glass Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> before and after Ar<sup>12+</sup> ion irradiation

前后的 XRD 衍射图谱。从图中可以看出, 原始金属玻璃的 XRD 谱线为典型的非晶漫散衍射包, 表明原始金属玻璃的微观结构状态为非晶态。经不同剂量的 Ar<sup>12+</sup>离子辐照后, 衍射曲线只有一个宽的漫散射峰, 表明辐照后金属玻璃仍以非晶为主要结构。根据大块金属玻璃的结晶动力学, 离子

辐照将导致金属玻璃的结构弛豫或是发生晶化<sup>[16]</sup>。Co 基金属玻璃的 XRD 衍射图表明, 在辐照剂量为  $1 \times 10^{15}$  (DPA 值约 1.3),  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 的条件下, Ar<sup>12+</sup>离子辐照不会导致 Co 基金属玻璃结晶, 表明 Co 基金属玻璃的热力学稳定性相对较好, 不会通过离子辐照改变其固有的非晶结构从而由非平衡状态向亚稳平衡态转变<sup>[17]</sup>。另一方面, Ar<sup>12+</sup>离子辐照试验过程中, 温度没有达到其玻璃化转变温度 ( $T_g=926$  K), 不足以发生结构弛豫或是晶化现象, 金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 仍保持其固有的非晶态结构。

图4为金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 辐照前后的 SEM 表面形貌。从图中可以看出: 辐照前, 金属玻璃经过打磨抛光后的表面平整光滑; 剂量为  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 的 Ar<sup>12+</sup>离子辐照后, 金属玻璃的表面没有出现明显的辐照损伤, 表面相对平整; 当辐照剂量增加到  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 时, 金属玻璃表面依然没有出现严重的辐照损伤现象。

图5是辐照前后 Co 基金属玻璃的 AFM 三维立体形貌。辐照前金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 的

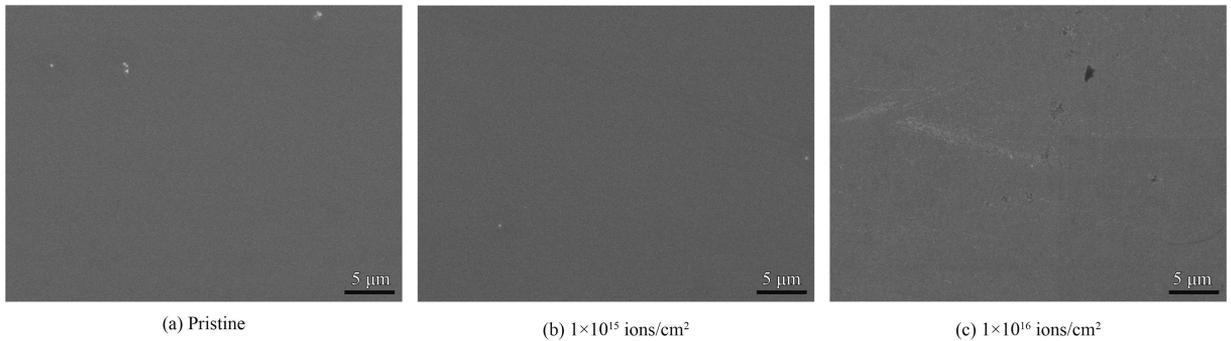


图4 Ar<sup>12+</sup>辐照前后 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 金属玻璃的 SEM 表面形貌

Fig.4 SEM images of metallic glass Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> before and after Ar<sup>12+</sup> ion irradiation

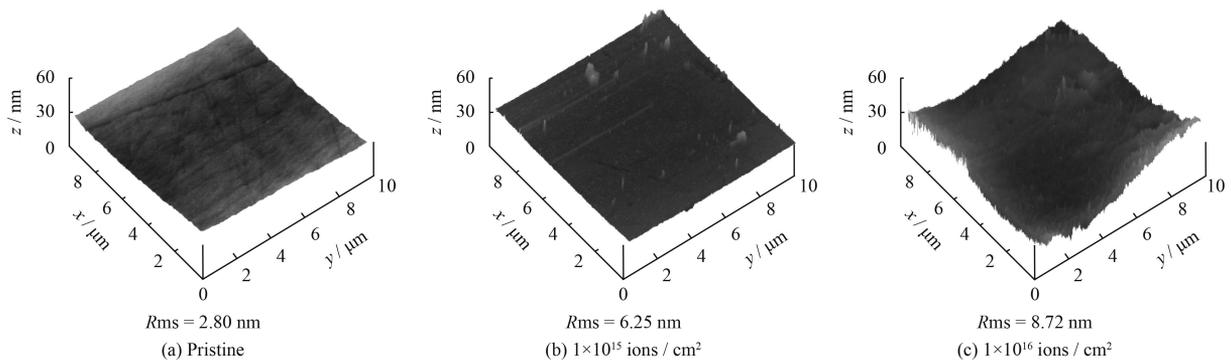


图5 Ar<sup>12+</sup>离子辐照 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 金属玻璃的 AFM 图像

Fig.5 AFM images of metallic glass Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> before and after Ar<sup>12+</sup> ion irradiation

表面光滑平整,没有山峰状的凸起,其均方根粗糙度为 2.80 nm;剂量为  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 的 Ar<sup>12+</sup> 离子辐照后金属玻璃表面出现少量的山峰状的凸起,表面均方根粗糙度为 6.25 nm,较原始材料粗糙度增加;当增大剂量到  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 时,金属玻璃表面出现“波浪形”起伏,均方根粗糙度为 8.72 nm,金属玻璃表面粗糙度进一步增加。金属玻璃表面的均方根粗糙度随着辐照剂量的增加而增加。

图 6 为 Co 基金属玻璃辐照前后的反射率变化曲线。从图中可以看到,金属玻璃在辐照之前波长 1 000~1 500 nm 范围内的反射率为 0.65, Ar<sup>12+</sup> 离子辐照后的反射率均比辐照之前低。其中,剂量为  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 时,波长 1 100 nm 对应的反射率下降约 21%,剂量为  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 辐照后的反射率降低约 23%;当波长大于 1 300 nm 时,

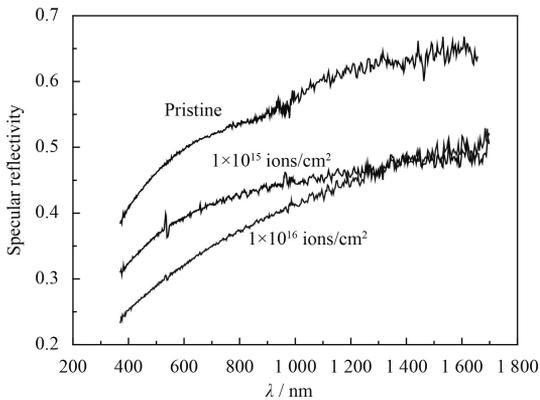


图 6 Ar<sup>12+</sup>离子辐照前后金属玻璃 Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> 的反射率  
Fig.6 Reflectivity of metallic glass Co<sub>61.2</sub>B<sub>26.2</sub>Si<sub>7.8</sub>Ta<sub>4.8</sub> before and after Ar<sup>12+</sup> ion irradiation

反射率下降约 28%,反射率随剂量的增加不再降低。根据表面粗糙度与反射率的关系公式<sup>[18]</sup>:

$$R = R_0 \exp[-(4\pi Ra)^2 / \lambda^2] \quad (2)$$

$R_0$  是理想的光滑平面的反射率;  $Ra$  是材料的表面粗糙度;  $\lambda$  是波长。由公式得材料的表面粗糙度越大反射率越小,辐照后金属玻璃表面的粗糙度增加导致反射率降低。

### 2.3 Ar<sup>12+</sup>辐照对金属钨结构和性能的影响

图 7 为辐照前后金属钨的 XRD 衍射图谱。从图中可以看出:辐照前后金属钨均为体心立方结构。图 7(b) 为放大图,图中可以看出剂量为  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> (DPA 约为 1) 辐照后金属钨的衍射峰相对于原始样品向高角度偏移,偏移量约 0.19°,根据布拉格方程:  $2d \sin \theta = n\lambda$ ,可知剂量  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 辐照后金属钨的晶面间距 ( $d$ ) 变小,表明辐照后金属钨表面存在残余的压应力;当剂量为  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 时,衍射峰相对原始样品几乎没有偏移,表明金属钨内部残余的压应力得到释放,晶面间距恢复。

金属钨在 Ar<sup>12+</sup>辐照前后的 SEM 表面形貌如图 8 所示。从图中看到:辐照前金属钨的表面平整,在图中看到有少量划痕;辐照剂量为  $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> (DPA 约 0.1) 时,金属钨表面开始出现不规则的孔洞;继续增大辐照剂量,金属钨表面不规则的孔洞数量增多,且孔洞的面积增大;辐照剂量增加到  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 时,金属钨表面出现大面积的孔洞,金属钨内部残余压应力得以

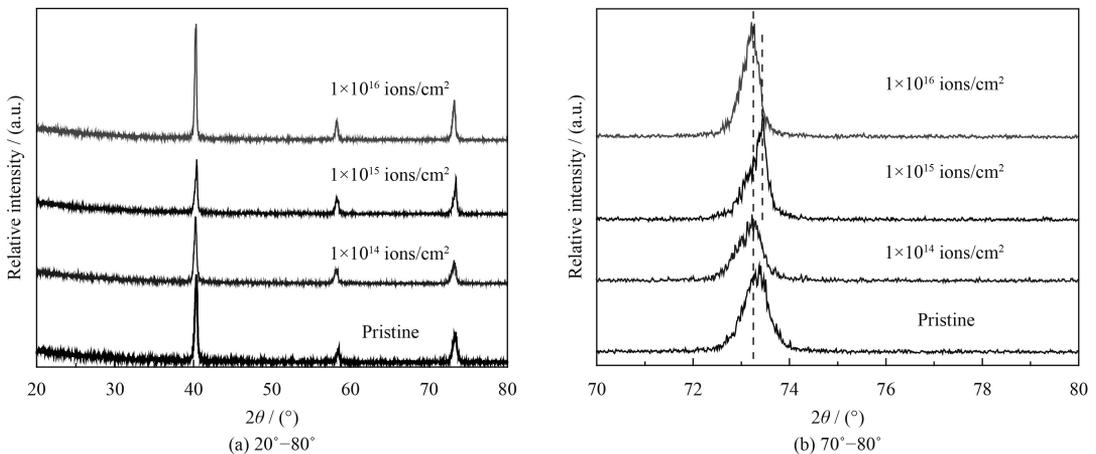


图 7 Ar<sup>12+</sup>离子辐照前后金属钨的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of tungsten before and after Ar<sup>12+</sup> ion irradiation

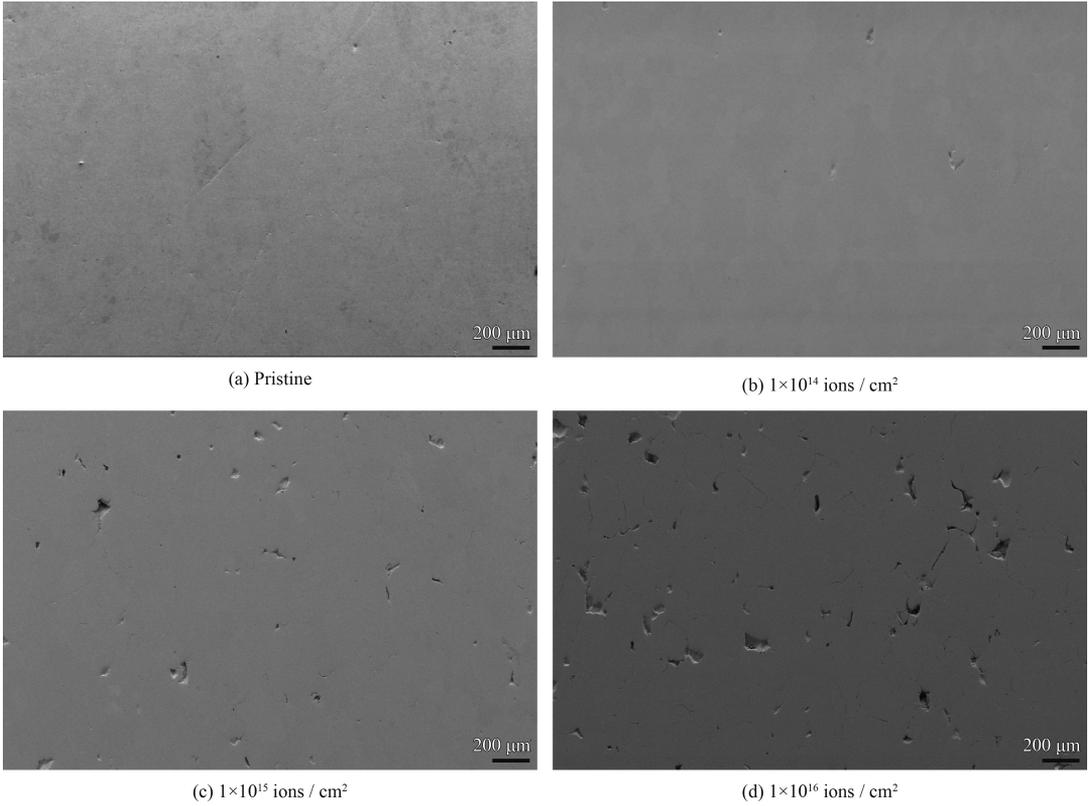


图 8  $\text{Ar}^{12+}$  辐照前后金属 W 的 SEM 形貌

Fig.8 SEM images of tungsten before and after  $\text{Ar}^{12+}$  ion irradiation

释放, 对应的 XRD 衍射峰没有发生偏移。

图 9 为  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照前后金属钨的反射率变化曲线。从图中可以看出, 辐照前金属钨的反射率约为 0.14~0.18(波长在 900~1 500 nm 范围内)。当用剂量为  $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 的  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照后, 反射率(波长 1 100 nm)下降了约 30%, 而此时的金属钨表面已经出现大量孔洞, 不能准确测量。

比较辐照后两种材料的表面形貌发现, Co 基金属玻璃在剂量为  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 辐照后表面的

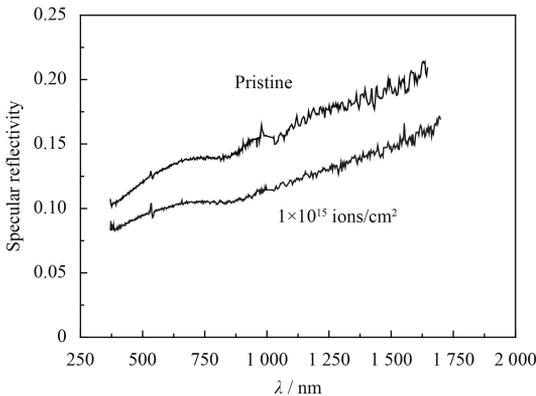


图 9  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照前后金属钨的反射率

Fig.9 Reflectivity of tungsten before and after  $\text{Ar}^{12+}$  ion irradiation

损伤远远小于金属钨。金属钨为各向异性的晶体结构, 在晶界处容易产生辐照损伤; 高能  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照过程中在金属钨表面产生大量溅射, 使得金属钨原子溅射出材料表面, 在表面产生大面积孔洞; 而 Co 基金属玻璃为各向同性的非晶结构, 没有晶界等缺陷, 且含有大量的自由体积, 能够容纳  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照所带来的损伤, 所以金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  的表面损伤不明显, 仍然保持光滑表面。SRIM 程序计算结果中, 金属钨的 DPA 峰值(约为 10) 小于金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  的 DPA 峰值(13), 但从表面形貌看, 金属玻璃比金属钨有更好的抗  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照损伤能力。

从图 6 和图 9 可以看出: 金属玻璃反射率比金属钨的反射率下降的少, 辐照后金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  仍能保持相对较高的反射率, 表明金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  在高电荷态  $\text{Ar}^{12+}$  离子的辐照环境下可以作为第一镜候选材料<sup>[19]</sup>。

Zhang 等<sup>[20]</sup>采用低电荷态的  $\text{H}^+$  离子辐照金属钨, 当辐照剂量为  $1 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> 时, 在金属钨表面只产生了不均匀分布的起泡损伤, 没有出现凹坑和脱落现象。文中采用高电荷态的  $\text{Ar}^{12+}$  离子

辐照金属钨, 在很小的剂量下 ( $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>) 就出现了大面积的孔洞。高电荷态离子轰击材料表面时会引起一系列比单电荷态离子入射时更强的溅射现象, 使材料表面在极短时间内产生较严重的辐照损伤, 而在同一条件进行辐照的金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  表面并没有发现明显的辐照损伤, 表明金属玻璃具有良好的抗  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照性能。

高电荷态离子是一种库仑势能很大、电荷态很高的载能粒子, 通过释放动能和势能, 在辐照材料的表面产生溅射, 快速地对材料表面造成辐照损伤。高电荷态离子注入到材料表面过程中会在离子路径范围内产生高的电离区, 区域内离子相互作用在短时间内产生库仑爆炸<sup>[21-22]</sup>, 诱导材料内部产生应变<sup>[23]</sup>, 同时在材料表面产生强烈的溅射现象。SRIM 模拟计算  $\text{Ar}^{12+}$  离子在金属钨表面的溅射产额高于在金属玻璃中的, 由于金属钨为各向异性的晶体结构, 存在晶界等缺陷, 高能量的  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照使得金属钨晶界处的原子处于非平衡状态, 容易引起晶格原子的离位, 导致钨原子溅射出金属表面, 造成比较严重的辐照损伤。

离子的能量沉积在材料表面, 通过离子与晶格原子的相互作用将能量传递给晶格原子, 并伴随大量的热产生, 从而诱导晶格畸变<sup>[23-24]</sup>。金属钨在晶界处容易捕获  $\text{Ar}^{12+}$  离子, 使得  $\text{Ar}^{12+}$  离子积聚, 附近应力场增强, 加剧晶格畸变; 高剂量的  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照后, 金属钨表面出现大面积的孔洞, 残余压应力得到释放, 晶面间距恢复。不同剂量的  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照后 Co 基金属玻璃保持非晶态结构不变, 表明金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  辐照后结构相对稳定。金属玻璃为长程无序、短程有序的各向同性结构, 含有大量的自由体积, 能够容纳  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照所带来的损伤, 尽管  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照在金属玻璃表面的 DPA 峰值比金属钨大, 金属玻璃表面依然没有出现严重的辐照损伤。

### 3 结论

(1) 不同剂量的 3 MeV  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  和金属钨,  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照在金属玻璃表面的核能损和电子能损均比金属钨小。

(2) 不同剂量辐照后金属玻璃均保持非晶结构, 且表面没有明显的辐照损伤。金属玻璃的均方根粗糙度随着  $\text{Ar}^{12+}$  辐照剂量的增加而增大。金属玻璃的反射率随着剂量增加而降低; 金属玻璃

没有金属钨的反射率降低明显。

(3) 剂量为  $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 时, 金属钨表面有大面积的孔洞产生。在相同的辐照条件下, 金属玻璃  $\text{Co}_{61.2}\text{B}_{26.2}\text{Si}_{7.8}\text{Ta}_{4.8}$  的抗  $\text{Ar}^{12+}$  离子辐照性能优于金属钨。

### 参考文献

- [1] IQBAL M, QAYYUM A, AKHTER J I. Surface modification of Zr-based bulk amorphous alloys by using ion irradiation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(6): 2780-2783.
- [2] 王志光. 利用高能离子模拟研究反应堆结构材料中的辐照效应[J]. *原子核物理评论*, 2006, 23(2): 155-160.  
WANG Z H. Simulation of radiation effects in structural materials of reactors using high-energy heavy-ion irradiations[J]. *Nuclear Physics Review*, 2006, 23(2): 155-160 (in Chinese).
- [3] ZHANG X N, MEI X X, MA X, et al.  $\text{Ar}^{12+}$  induced irradiation damage in bulk metallic glass  $(\text{Cu}_{47}\text{Zr}_{45}\text{Al}_{18})_{98.5}\text{Y}_{1.5}$ [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(2): 110-114.
- [4] BRIERE M, SCHNEIDER D, MCDONALD J, et al. Studies of the interaction of slow very highly charged ions with solid surfaces using the LLNL EBIT facility[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 1994, 90(1-4): 231-236.
- [5] CAO J, CHEN H Y, SONG X G, et al. Effects of Ar ion irradiation on the diffusion bonding joints of  $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$  bulk metallic glass to aluminum alloy[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 364(4): 53-56.
- [6] CHEN H C, YAN L, LIU R D, et al. Anisotropic nanocrystallization of a Zr-based metallic glass induced by Xe ion irradiation[J]. *Intermetallics*, 2014, 52(52): 15-19.
- [7] MAYR S G. Impact of ion irradiation on the thermal, structural, and mechanical properties of metallic glasses[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(14): 4109.
- [8] ZHANG H G, MEI X X, ZHANG X N, et al.  $\text{H}^+$ -induced irradiation damage resistance in Fe- and Ni-based metallic glass[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2016, 375: 79-86.
- [9] MEI X X, WANG B, DONG C, et al. Anti-irradiation performance against helium bombardment in bulk metallic glass  $(\text{Cu}_{47}\text{Zr}_{45}\text{Al}_{18})_{98.5}\text{Y}_{1.5}$ [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2013, 307(307): 11-15.
- [10] LIU X F, MEI X X, QIANG J B, et al. Effects on structure and properties of  $\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5$  metallic glass irradiated by high intensity pulsed ion beam[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 313: 911-917.

- [11] 文静, 董闯, 公发全, 等. 聚变堆第一镜材料块体金属玻璃表面特性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 36-37.  
WEN J, DONG C, GONG F Q, et al. Surface characteristics of bulk metallic glass as first mirror materials for fusion reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 36-37 (in Chinese).
- [12] ZHU C L, WANG Q, WANG Y M, et al. Co-B-Si-Ta bulk metallic glasses designed using cluster line and alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504(504): S34-S37.
- [13] KIKUCHI Y, SAKUMA I, KITAGAWA Y, et al. Surface modifications on toughened, fine-grained, recrystallized tungsten with repetitive ELM-like pulsed plasma irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 463: 206-209.
- [14] HOU W J, MEI X X, WANG Z G, et al. Resistance to He<sup>2+</sup> irradiation damage in metallic glass Fe<sub>80</sub>Si<sub>7.43</sub>B<sub>12.57</sub>[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2015, 342: 221-227.
- [15] GARCIA-CARRASCO A, PETERSSON P, HALLÉN A, et al. Impact of helium implantation and ion-induced damage on reflectivity of molybdenum mirrors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2016, 382: 91-95.
- [16] PEREZ-BERGQUIST G A, BEI H B, LEONARD J K, et al. Effects of ion irradiation on Zr<sub>52.5</sub>Cu<sub>17.9</sub>Ni<sub>14.6</sub>Al<sub>10</sub>Ti<sub>5</sub> (BAM-11) bulk metallic glass[J]. Intermetallics, 2014, 53: 62-66.
- [17] JIA H L, MUNTELE I C, HUANG L, et al. A study on the surface structures and properties of Ni-free Zr-based bulk metallic glasses after Ar and Ca ion implantation[J]. Intermetallics, 2013, 41(10): 35-43.
- [18] BENNETT E H. Specular reflectance of aluminized ground glass and the height distribution of surface irregularities[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(12): 1389-1393.
- [19] GONG F Q, WEN J, ZHAO Y J, et al. Stable reflectivity of bulk metallic glass mirrors for ITER optical diagnostic through an irradiation-induced self-recovery mechanism[J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, 429(1-3): 221-225.
- [20] ZHANG H R, MEI X X, WANG Y M, et al. Resistance to H<sup>+</sup> induced irradiation damage in metallic glass Fe<sub>80</sub>Si<sub>7.43</sub>B<sub>12.57</sub>[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 456: 344-350.
- [21] BRINGA M E, JOHNSON E R. Coulomb explosion and thermal spikes[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(16): 165501.
- [22] TOULEMONDE M, DUFOUR C, PAUMIER E. Transient thermal process after a high-energy heavy-ion irradiation of amorphous metals and semiconductors[J]. Physical Review B, 1992, 46(22): 14362.
- [23] THOMAS H, THOMAS S, RAMANUJAN V R, et al. Swift heavy ion induced surface and microstructural evolution in metallic glass thin films[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2012, 287(3): 85-90.
- [24] WANG Z G, DUFOUR C, PAUMIER E, et al. The Se sensitivity of metals under swift-heavy-ion irradiation: a transient thermal process[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, 6(34): 6733.

(责任编辑: 黄艳斐)