

Sputtering Behavior of Beryllium Materials Irradiated by Hydrogen-Helium Ions

Donghao Li, Jinyu Jiang, Jibing Wang, Yongxing Jian

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing
Email: lidonghao@ncepu.edu.cn

Received: June 16th, 2019; accepted: July 1st, 2019; published: July 8th, 2019

Abstract

Effects of incident energy and amount of hydrogen/helium ions on sputtering behavior of beryllium material were investigated by using the Monte Carlo code SRIM in this paper. The results show that the range of incident ion in beryllium increases with the energy of the incident ion, while the sputtering rate on the beryllium surface decreases with the increase of incident energy. Hydrogen ion has a longer range in beryllium than helium ion under the same incident energy, but the sputtering rate of beryllium surface caused by hydrogen ion irradiation is smaller than that by helium ion. Within the simulation scope of this paper, the number of the incident ions has no significant effect on the range of hydrogen and helium ions in beryllium.

Keywords

Hydrogen Ion, Helium Ion, The Sputtering, Beryllium Materials

氢氦离子辐照条件下铍材料的溅射行为

李东昊, 姜进宇, 王继冰, 简永星

华北电力大学, 核科学与工程学院, 北京
Email: lidonghao@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2019年6月16日; 录用日期: 2019年7月1日; 发布日期: 2019年7月8日

摘要

本文借助蒙特卡罗程序SRIM研究了氢氦离子的入射能量和离子数量对铍材料表面溅射行为的影响。分析结果表明, 同一种类入射离子在铍中的射程随入射离子的能量增加而增加, 铍材料表面的溅射率随入射能量的增加而减小。在相同入射能量下, 氢离子在铍中的射程比氦离子更长, 而氢离子辐照造成的铍表

面溅射率比氦离子更小。在本文的模拟范围内，入射离子的数目对氢氦离子在铍中的射程没有造成显著影响。

关键词

氢离子, 氦离子, 溅射, 铍材料

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国核电事业的发展，核电站的安全问题以及对环境的影响问题也越发受到人们关注，发掘并应用更好的材料是保障核电站安全、减小核电站对环境影响的重要环节。核技术的蓬勃发展，推动了对铍材料的研究。在核裂变反应堆中，铍材料可用作中子源材料和反应堆反射体材料。由于铍的密度与重水相似却不会像重水一样在 100℃ 蒸发，并且铍的原子质量和氦接近，因此铍也被认为是较好的核反应堆中子减速剂。在聚变堆中，铍材料[1]被考虑为一种新型面向等离子体的材料。核聚变主要依靠氘氚聚变反应，其反应式为 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + \Delta E (17.6\text{MeV})$ 。因此，铍在聚变堆服役过程中，不仅会遭受聚变中子的辐照影响，而且还会遭受背景等离子体氢氦离子的影响，研究铍在氢氦离子辐照条件下的溅射行为对于其在聚变堆服役有重要意义。

对于材料的溅射行为，国内外学者已经开展过一些相应的模拟研究。借助分子动力学模拟方法，李洋[2] [3]等人研究了碳化硅和石墨等潜在的面向等离子体材料在氢氦离子辐照条件下的溅射行为，化敏雪[4]，杨涛[5]研究了面向等离子体材料钨表面的溅射问题。借助蒙特卡罗模拟软件 SRIM [6]，雒哲廷[7]等人研究了永磁材料 NdFeB 的溅射行为，张德根[8]等人研究了合金靶的择优溅射问题，朱岳[9]等人模拟了半导体材料碲锌镉在质子辐照下的损伤行为。这些研究表明，SRIM 模拟在研究材料的辐照损伤和溅射行为时有重要作用。然而，当前关于面向等离子体材料铍在氢氦离子辐照下的溅射行为的研究还鲜有报道。

本文利用 SRIM 软件，建立了铍材料在不同入射能量和不同数目的氢氦离子辐照条件下的模拟模型，系统地研究了铍材料表面的溅射率和氢氦离子在铍材料中的射程与入射离子能量间的相互关系，同时也研究了氢氦离子在铍材料中的分布与离子入射数量间的相互关系。本文的相关研究可为将来实验研究和工程实践提供有益参考。

2. 研究模型与方法

2.1. SRIM 介绍

SRIM 是模拟粒子 10 eV 到 2 GeV 在固体中受到的阻止及射程分布的软件，它应用级联碰撞理论建立模型，把靶看作无序结构，离子和靶原子的碰撞采用两体碰撞近似，离子在两次碰撞之间进行随机跳跃，跳跃距离由其平均自由程决定，离子与原子之间的相互作用势能采用了屏蔽库仑势，离子在固体中的电荷态采用有效电荷近似。SRIM 包括几个部分，模拟溅射过程时，离子既可以是相同能量，以相同角度和位置入射，又可以是不同能量以不同角度和位置入射。

2.2. 模型的建立

关于铍材料在氢氦离子辐照条件下的溅射行为的模拟研究，本文中建立模型的具体情况如下：1) 铍材料靶厚度为 20,000 Å，密度为 1.85 g/cm³；2) 氢氦离子的入射角度设置为零度，垂直于铍材料表面入射；3) 氢氦离子的入射能量设置为 10 keV~200 keV；4) 氢氦离子的入射数量为 5 万~500 万。

3. 结果与讨论

3.1. 入射能量与溅射率

图 1 和图 2 分别展示了不同入射能量的氢离子和氦离子辐照条件下铍材料表面溅射率的模拟结果。横坐标表示离子入射能量，本文中氢离子和氦离子的入射能量设为 10 keV~200 keV，纵坐标表示铍材料表面的溅射率。对于每种离子在同一入射能量时，本文模拟了入射离子数量为 50 万时铍材料的溅射。结果显示，铍材料表面上的溅射率随着氢离子的入射能量增加逐渐降低，并且溅射率降低的速率也逐渐变慢。铍材料在氦离子辐照条件下也显示出了类似的结果，铍材料表面的溅射率也随氦离子入射能量的增加逐渐降低，溅射率下降速率逐渐变慢。这是因为随着离子入射能量的增加，离子的穿透能力也随之增加，高能离子入射后更容易进入到靶材料内部，而不易引发铍材料表面上的溅射。相同入射能量条件下，铍材料在氦离子辐照的溅射率比氢离子辐照时的溅射率更大，这是由于氦离子质量数更高，与铍原子的质量更加接近，所以铍材料在氦离子辐照条件下更容易发生溅射。

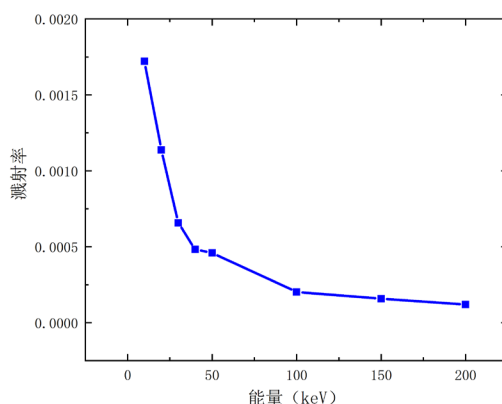


Figure 1. Relationship between sputtering rate and incident energy of hydrogen ion in beryllium
图 1. 铍材料表面溅射率与氢离子入射能量间相互关系

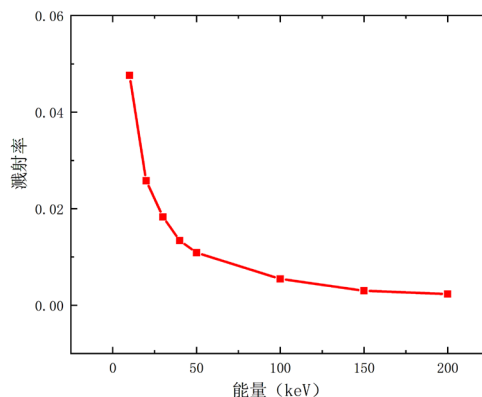


Figure 2. Relationship between sputtering rate and incident energy of helium ion in beryllium
图 2. 铍材料表面溅射率与氦离子入射能量间相互关系

3.2. 入射能量与射程

图 3 展示了氢离子和氦离子在铍材料中的射程随离子入射能量变化的模拟结果。横坐标表示离子入射能量，氢离子和氦离子的入射能量仍然设置为 10 keV~200 keV，纵坐标表示氢离子和氦离子在铍材料中的射程，对于同一种离子入射能量本文均模拟了 50 万个离子的辐照情况。结果显示，氢离子在铍材料中的射程随着的入射能量增加而逐渐增加。同样，氦离子在铍材料中的射程也显示了类似的结果，其射程随着离子入射能量的增加而逐渐增加。这是因为入射离子在靶材料铍中发生碰撞消耗能量，入射离子的入射能量越大，其在铍中的穿透能力也越强。相同入射能量条件下，氢离子比氦离子射程更长，二者射程之间的差距也随能量的增加而增加，这是因为氦离子半径更大且质量更与铍原子接近，所以氦离子的能量更加容易传递给铍原子。

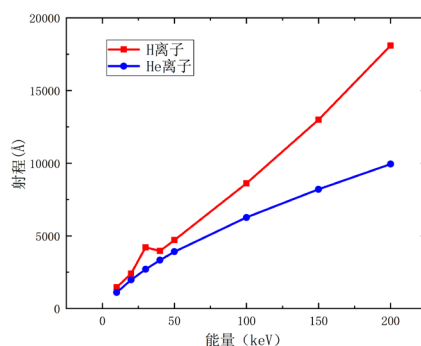


Figure 3. The relationship between the range of hydrogen/helium ions in beryllium and the incident energy of ions
图 3. 氢氦离子在铍中射程与离子入射能量间的关系

3.3. 入射离子数量与射程

由于铍材料在大量氢氦离子辐照下可能会被击穿，本文研究了铍材料在氢氦离子辐照下是否会出现类似于“滴水穿石”这种现象。本文研究了氢氦离子在铍材料中的射程与入射粒子数目间的相互关系，对于同一入射能量离子的入射数目设置为 5 万、10 万、50 万、100 万、200 万、500 万。图 4 和图 5 分别展示了氢离子和氦离子在铍材料中的入射射程随离子的入射数量的变化关系，横坐标为氢氦离子的入射数量，纵坐标为氢氦离子在铍材料中的射程。结果显示，在同一种能量下，氢氦离子在铍材料中的射程并没有随入射粒子的数量发生明显变化，说明在本文模拟的离子辐照条件下，铍材料没有显示出“滴水穿石”这种现象。出现这种结果有可能是文中模拟的离子入射数量太少，以致于没有出现“滴水穿石”这种现象。

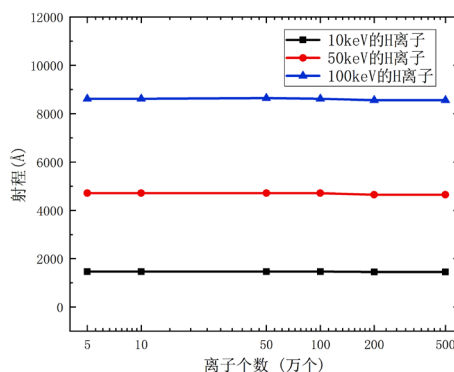


Figure 4. The relationship between the range of hydrogen ions in beryllium and the incident ions number
图 4. 氢离子在铍中的射程与离子入射数目的关系

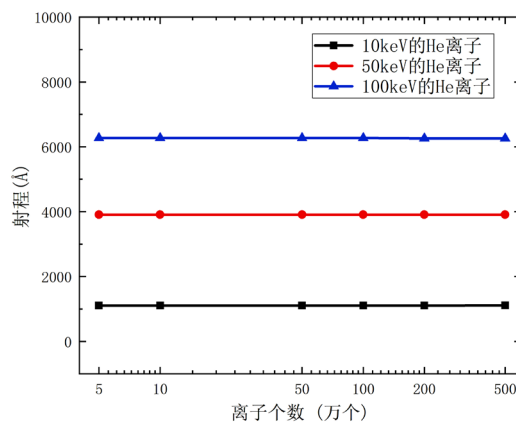


Figure 5. The relationship between the range of helium ions in beryllium and the incident ions number
图 5. 氦离子在铍中的射程与离子入射数目间的关系

4. 结论

为了研究面向等离子体材料铍在氦离子辐照条件下的溅射行为, 本文借助 SRIM 模拟程序研究了铍材料表面的溅射率以及氦离子在铍中的射程与离子入射能量间的相互关系, 同时本文也研究了离子入射数目与其在铍材料中的射程间的相互关系。本文得到的具体结果如下:

1) 铍材料表面的溅射率随氦离子入射能量的增加而降低。在相同入射能量下, 氦离子引起的铍材料表面的溅射率比氢离子更高。

2) 氦离子在铍材料中的射程随离子入射能量的增加而增加。相同入射能量条件下, 氦离子在铍中的射程比氢离子更长。

3) 入射粒子的数量没有对氦离子在铍材料中的射程产生明显影响, 在本文的模拟条件下铍材料没有出现“滴水穿石”现象。

基金项目

本文得到了华北电力大学大学生创新创业训练计划项目(No.18126)的资助。

参考文献

- [1] 张友寿, 秦有钧, 吴东周, 等. 铍和含铍材料的性能及应用[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 92-96.
- [2] 李洋, 赵强, 张峥, 等. 连续碳纤维增强碳化硅的辐照效应[J]. 原子核物理评论, 2017(3): 370-374.
- [3] 李洋. 面向等粒子材料的溅射率研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [4] 化雪敏. 钨表面辐照导致的溅射问题的理论研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [5] 杨涛. 托卡马克中偏滤器材料的溅射行为研究[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- [6] <http://www.srim.org>
- [7] 雒哲廷, 张敏刚, 伍静, 等. NdFeB 永磁靶材溅射模拟[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(6): 61-64.
- [8] 张德根, 胡训美. 合金靶材择优溅射的 SRIM 模拟研究[J]. 皖西学院学报, 2014, 30(5): 59-62.
- [9] 朱岳, 汪宏年, 赵广义. 质子对碲锌镉辐照损伤的 SRIM 模拟[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(4): 973-978.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nst@hanspub.org