

离子镀制备 Cr/W 混合过渡层的氘氚辐照效应研究

冯红丽 苟成玲 俞坚钢 韩文佳 陈哲 蔡亚南 朱开贵

Irradiation effect of deuterium or hydrogen on Cr/W mixed transitional layers prepared by double ion beam deposition

Feng Hong-Li Gou Cheng-Ling Yu Jian-Gang Han Wen-Jia Chen Zhe Cai Ya-Nan Zhu Kai-Gui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 026101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.026101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.026101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于蒙特卡洛和器件仿真的单粒子翻转计算方法

Calculation of single event upset based on Monte Carlo and device simulations

物理学报.2014, 63(19): 196102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.196102>

铌对钨中氦行为影响的第一性原理研究

Effects of niobium on helium behaviors in tungsten: a first-principles investigation

物理学报.2014, 63(4): 046103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.046103>

两相钛合金再结晶退火组织与织构演变的蒙特卡罗模拟

Monte Carlo simulations of microstructure and texture evolution during annealing of a two-phase titanium alloy

物理学报.2013, 62(18): 186103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.186103>

低剂量率 ^{60}Co γ 射线辐照下 SOI MOS 器件的退化机理

Degradation mechanism of SOI NMOS devices exposed to ^{60}Co γ -ray at low dose rate

物理学报.2012, 61(24): 246101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.246101>

采用 Al/TaN 叠层电极提高 Si 基 Ge PIN 光电探测器的性能

Improvement on performance of Si-based Ge PIN photodetector with Al/TaN electrode for n-type Ge contact

物理学报.2012, 61(18): 186105 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.186105>

离子镀制备Cr/W混合过渡层的氢氙辐照效应研究*

冯红丽 苟成玲[†] 俞坚钢 韩文佳 陈哲 蔡亚南 朱开贵

(北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

(2014年6月27日收到; 2014年7月22日收到修改稿)

用双离子束镀膜方法在W基底表面制备不同厚度的Cr薄膜. 用冷场扫描电镜能谱分析仪对镀膜样品成分深度分布进行分析, 使用重离子加速器对镀膜样品进行高能、低束流的氢或氙辐照, 用扫描电镜对样品表面形貌变化进行分析, 运用粒子注入射程模拟软件SRIM对氢粒子在Cr/W双层块体中的射程进行模拟分析. 实验结果表明, 运用双离子束镀膜法能够在膜与基底的接触面区域制得Cr/W混合过渡层; 在高能、低束流的氢或氙辐照下, Cr/W混合过渡层易于使气体滞留而起泡, 双离子束制备的Cr膜层不易聚集氢或氙气体成泡.

关键词: Cr/W混合过渡层, 氢氙辐照, 双离子束镀膜

PACS: 61.82.Bg, 61.80.Jh, 61.82.-d, 52.40.Hf

DOI: 10.7498/aps.64.026101

1 引言

可控核聚变反应堆的最大意义就在于它不仅安全、清洁, 而且反应原料氘资源在地球上的储量丰富, 可以从海水中提取, 海水中的氘含量可供人类使用一百亿年以上. 可控核聚变能否开发成功, 反应装置材料的选择是关键步骤之一. 托卡马克装置是较有前途的核聚变反应装置, 该装置中非常重要的一类材料是面对等离子体材料, 包括在核聚变反应装置中直接面对等离子体的第一壁和偏滤器(divertor)及限制器(limiter)的装甲材料. 这种材料是包括中国在内的世界各国争相研究的重点. 钨基壁材料具有高熔点(高达 $3410\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低溅射率、高热导、低滞留、低肿胀、无化学溅射、几乎不与H反应、具有原位等离子体修复的可能性及在高温下抗拉强度和抗蠕变强度超过任何其他金属的优良特性^[1-4], 但是经聚变等离子体辐照后, W中氢及其同位素的滞留起泡行为严重^[5-7], 由起泡

导致的W表层剥离会降低材料的导热性能, 导致材料局部温度过高而熔化蒸发^[8-13], 滞留起泡行为不仅改变材料的内部结构和表面形貌, 而且产生严重的壁损伤, 影响氙的循环再利用, 尤其是氙的大量滞留将严重地限制聚变堆实验设备中的等离子体的持续放电^[14], 进而影响等离子体材料的使用寿命和整个核聚变反应装置的长久持续运行.

国际热核聚变实验堆(ITER^[15,16])计划已经把W列为很有前途的等离子体偏滤器的候选材料. 对W掺杂合金化元素以改善其性能的研究也早已开展. 关于W中氢及其同位素滞留起泡的研究已经取得一定的成果. Shu等^[13,17,18]实验研究发现, 在低能大束流不同温度氘等离子体辐照下, W表面起泡形状各异, 并且氘滞留和起泡现象与等离子体的温度、束流大小、W表面形貌和内部结构等都有很大的关系. Causey等^[19]研究了低能大束流中等温度条件下氘在W中的滞留行为, 发现W中会有低于0.02%注入粒子量的氘滞留. Zhang等^[20]研究了磁控溅射制得的W膜经高能低束流的氢等离

* 国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项(批准号: 2011GB108008, 2013GB109003)和国家自然科学基金(批准号: 51171006)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: gouchengling@buaa.edu.cn

子体辐照后的起泡行为,发现以Cu作为衬底的W薄膜表面有起泡现象,得出氢等离子体易在膜与衬底的界面聚集成泡的结论等.

合金化元素对W的辐照方面的影响研究因起步晚研究还不是很成熟.王欣欣等^[4]计算研究得出,掺杂Nb元素将不利于抑制氢泡的形成.Anderl等^[21]指出,W中掺杂La制备出W-1 wt%La合金,经退火处理后,氘滞留量比退火后的纯W低.超精细加工的W-1.1 wt%TiC样品在氘等离子体中几乎不出现气泡现象,氘滞留量比纯W的滞留量小两个数量级^[22].但是对于W中掺杂C,不论是化学气相沉淀镀膜制备的W₂C合金(CVD-W₂C合金)膜,还是仅仅在W表面镀层C膜,只要有碳元素存在,W合金的氘滞留量都会增大,镀C层后滞留量甚至比未镀层W多出几个数量级^[14,21].而Be的加入对W中氘滞留量则没有明显影响^[23],He引起的辐照效应也不明显^[24].

就W掺杂Cr元素后的氢及其同位素的辐照效应研究而言,目前为止还没有得出比较全面的测试数据和比较权威的结论.因此,本文研究双离子束镀Cr膜获得的Cr/W混合层对W的氢或氘辐照效

应的影响.

2 实验方法

2.1 样品制备

样品制备是在双Ar离子束溅射沉积镀膜设备中进行的.整个装置如图1所示.靶材是直径为100 mm的纯Cr靶,基片材料是用粉末冶金法制备的纯度99.95%的W基片,大小为5 mm×5 mm×1 mm.其中三组W基片镀膜前先后进行了机械抛光和电解精抛光,两组W基片只进行机械抛光,未进行电解抛光,然后5组抛光后的基片依次放入丙酮、酒精和去离子水中各超声清洗15 min,最后用氮气吹干.基底温度通过红外测温仪进行测试,整个过程中测得的温度范围在40 °C—70 °C左右,具体镀膜参数如表1所示.样品编号a, b, c分别定义Cr膜厚度为100, 200和1000 nm, W基底经机械抛光和电解抛光的试样;样品编号d, e分别定义Cr膜厚度为200和400 nm, W基底只经过机械抛光的试样.

表1 镀膜参数

样品 编号	膜厚 /nm	靶材 /基底	本底气压 /Pa	工作气压 /Pa	工作气体 束流	主源 参数	辅源 参数	基底温度 /°C
a	100	Cr/W	5.0×10^{-4}	2.8×10^{-4}	Ar 2.0 sccm	800 eV 70 mA	90 eV 20 mA	40—70
b	200							
c	1000							
d	200							
e	400							

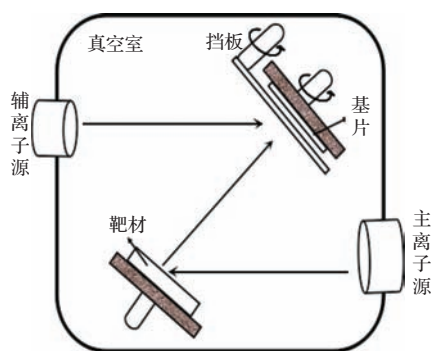


图1 双离子束镀膜装置示意

2.2 样品处理和表征

样品的氢(H)辐照实验是在北大重离子加速器国家重点实验室PKUPMECR装置中进行的,辐照粒子H⁺,能量是50 keV,辐照电流25 mA,束流强度 $1.9 \times 10^{18} \text{ H}^+ \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,剂量 $1.0 \times 10^{22} \text{ H}^+ \cdot \text{m}^{-2}$.样品的氘(D)辐照实验是在兰州重离子加速器国家实验室HIRFL装置中进行的,辐照粒子D⁺,能量30 keV,辐照电流约5.6 μA,束流强度 $1.2\text{—}1.5 \times 10^{17} \text{ D}^+ \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,剂量 $8.0\text{—}9.0 \times 10^{21} \text{ D}^+ \cdot \text{m}^{-2}$.详见表2所示.样品的表面形貌分析是在北京航空航天大学化学系的Quanta 250 FEG型

表2 氢、氘辐照参数

辐照样品	辐照粒子	能量/keV	粒子流	束流/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	剂量/ m^{-2}
a	D^+	30 keV	5.6 μA	$1.2\text{--}1.5 \times 10^{17} \text{ D}^+$	$8.0\text{--}9.0 \times 10^{21} \text{ D}^+$
b					
c					
d	H^+	50 keV	25 mA	$1.9 \times 10^{18} \text{ H}^+$	$1.0 \times 10^{22} \text{ H}^+$
e					

环境扫描电镜 (SEM) 下完成的. 用北京航空航天大学化学系冷场扫描电镜能谱分析仪 (EDS) 对样品做了成分深度分布分析, 用 SRIM (stopping and range of ions in matter) 软件模拟得到离子注入深度分布结果.

3 实验结果与讨论

3.1 膜层形貌及其与基底界面处元素分布

图2是在双离子束镀膜设备中镀膜后的样品表面形貌的 SEM 图, 其中图2(1), (3), (4) 中的白点是样品表面吸附的外界杂质颗粒. 图中左上角标号与样品编号是一致的.

图2(1), (2), (3) 显示, a, b, c 组样品因 W 基底电解抛光的缘故, 样品基底表面晶界较为明显,

表面镀 Cr 膜后仍可看出基底的晶界形状; 图2(4), (5) 显示, d, e 组样品因只有机械抛光, 镀膜后样品表面没有出现晶界轮廓, 但膜层疏松.

图3是用 EDS 进行测试的镀膜样品横截面同一区域元素 Cr 和 W 的深度分布, 两幅图对比, 各图中白点 (元素分布区域) 疏密分界明显的地方就是 Cr 膜层与 W 基底的界面, 可以看出 Cr 元素在 W 基底的内部分布有一定的深度. 根据双离子束镀膜的原理^[25], 我们可以了解到镀膜开始阶段, W 基片表面在主离子源和辅离子源的共同溅射作用下有两个动态过程: 一是从主离子源引出的具有一定能量的 Ar^+ 撞击靶材 Cr 原子使 Cr 沉积到 W 表面 (图3(2) 所示分界面以上部分); 二是从辅离子源引出的 Ar^+ 撞击基材, 使已沉积的 Cr 原子和基材表面 W 原子溅射 (图3(1) 所示分界面以上部分),

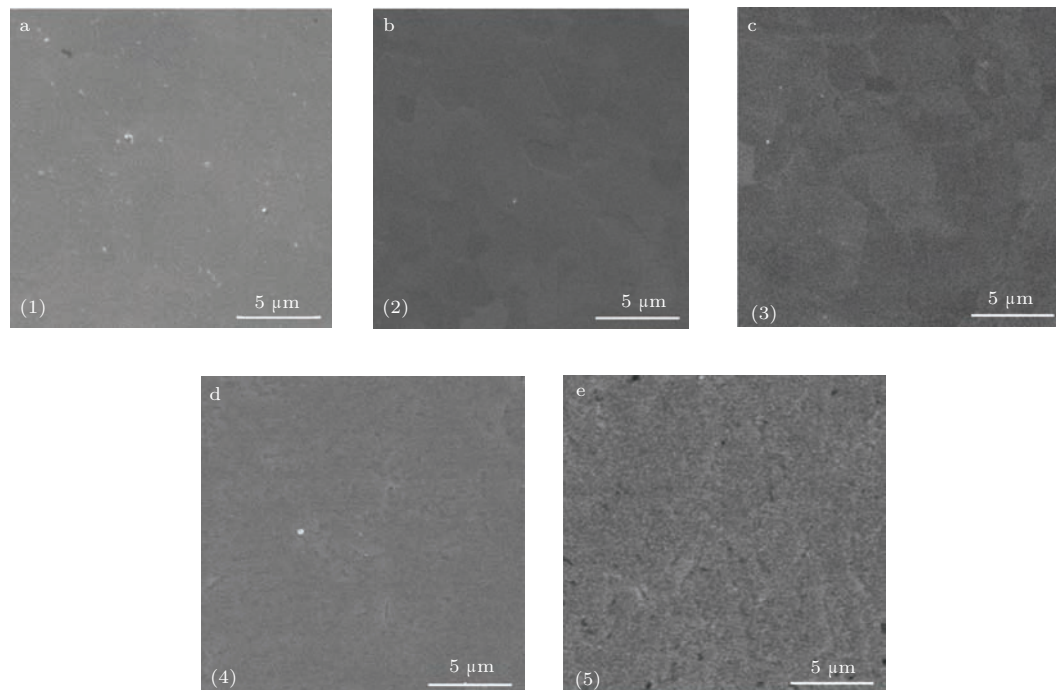


图2 镀膜后样品表面 SEM 图

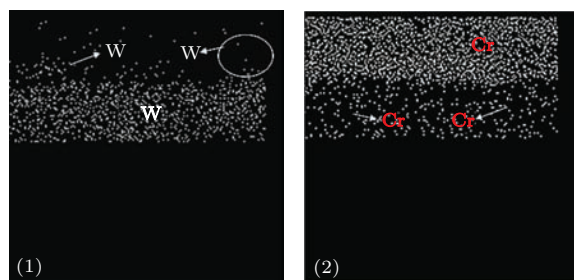


图3 样品横截面同一区域元素深度分布 (1) W 分布;
(2) Cr 分布

同时,也使部分Cr原子进入W基材内部(图3(2)所示分界面以下部分). 溅射与沉积同时进行的基礎上,随着沉积Cr粒子不断增厚,在膜基面就会形成一层“伪扩散层”. 该“伪扩散层”是膜材元素Cr与基底元素W的物理混合现象,使膜与基片在界面处形成的具有一定厚度的Cr/W混合的过渡层.

图3的测试结果与上述理论推测完全符合. 所以在镀膜过程中, W基底界面附近有Cr/W混合过渡层形成.

3.2 氦气辐照后样品形貌变化和 H^+ 模拟射程

图4是用扫描电镜表征的氦辐照后的样品表面形貌图. 图4(1), (2)和(5), (6)显示, 辐照后, a, c组样品表面被溅射, 原有的基底晶界轮廓消失, 说明在溅射过程中两组样品表面被高能粒子轰击后膜层表面Cr原子有进行重新排列. 与图2对比发现, a, c两组样品膜表面紧密度提高, 但没有泡出现. 图4(3), (4)显示, b组样品除了有上述变化外, 表面有明显的鼓泡, 泡呈圆形, 直径4—11 μm 不等.

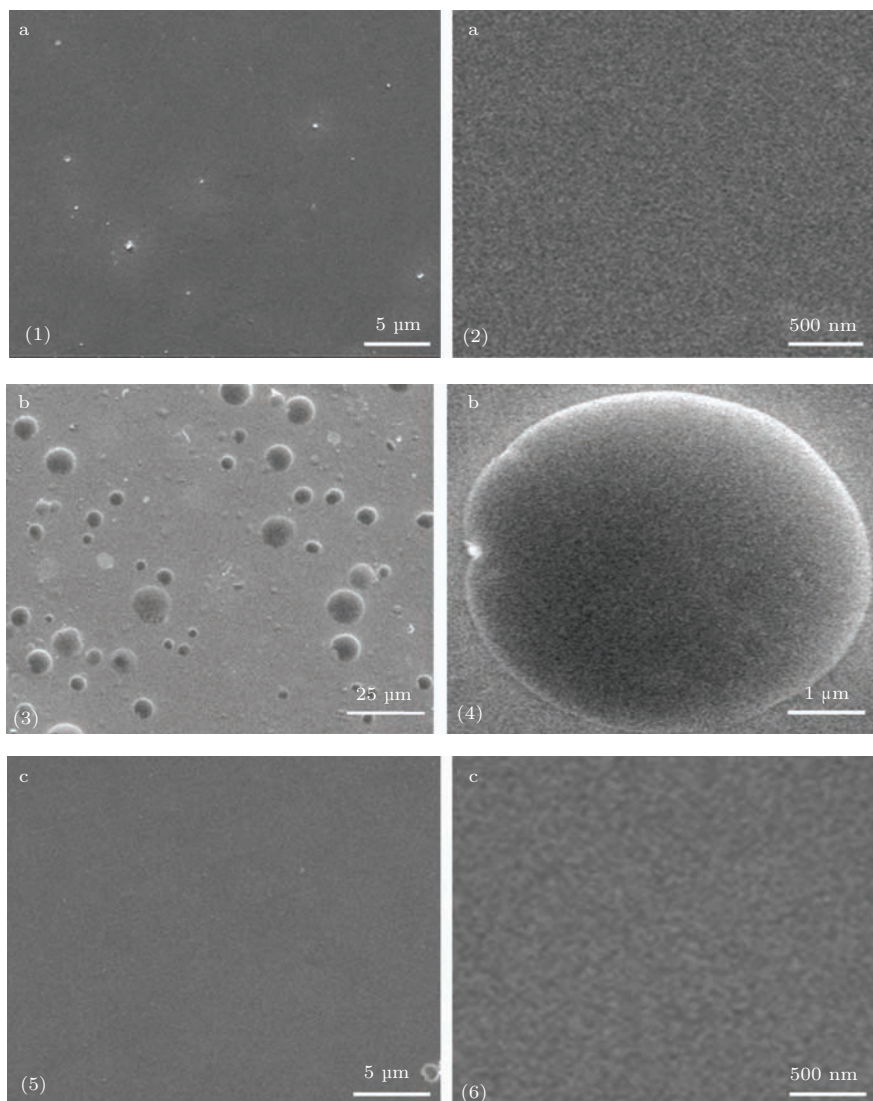


图4 a, b, c 组样品D辐照后的SEM图

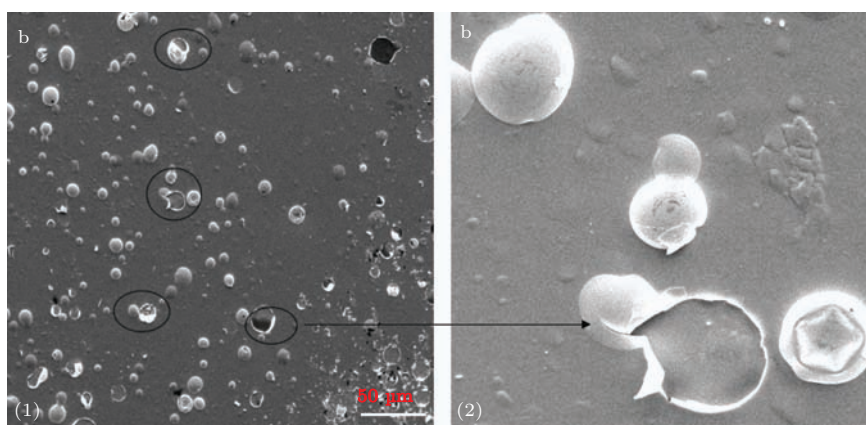


图5 D辐照后b组样品表面喷金后的SEM图

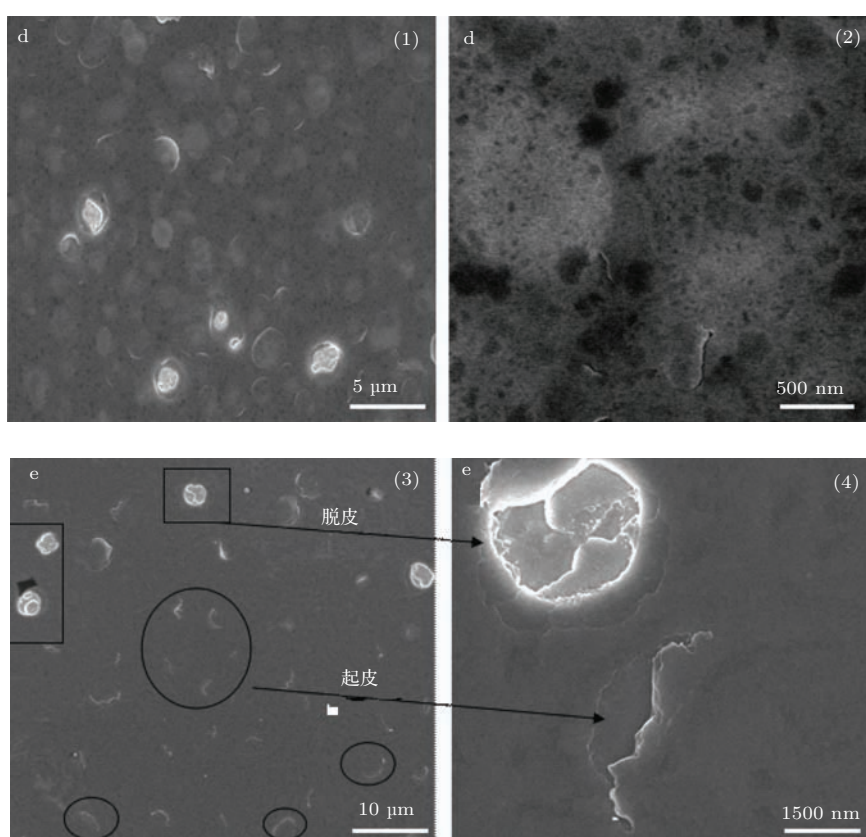


图6 d, e组样品H辐照后的SEM图

图5是氦辐照后的b组样品进行表面喷金处理后表面的泡部分破裂后的形貌图, 其中图5(2)是对图5(1)的局部放大. 图中可观察到, 大泡破裂后, 内部仍有小泡. 图6是氢辐照后的样品表面形貌SEM图, 其中每一排右图均是左图的局部放大图. 由图6(1)和(2)可看出, d组样品表面起泡严重, 泡呈扁圆形, 泡直径在2—4 μm , 不如图4(3)和(4)中b组鼓起明显, 比b组泡小但大小较为均匀. 图6(3)和(4)显示, e组样品表面被溅射明显,

样品表面多处出现起皮现象, 并且部分表皮在溅射粒子的强烈冲击下脱落, 形成坑, 但该坑与泡破裂后形成的空洞结构形貌(如图5所示)明显不同, 样品表面没有出现起泡现象.

图7是用SRIM软件模拟的 H^+ 射入第一层Cr层厚度为200 nm的Cr/W双层块体示意图. 因SRIM软件只能模拟氢元素的射程, 而氦与氢是同位素, 属于同种元素, 所以可用氢的模拟射程值模拟氦的射程. 表3是在试样膜厚和图7的基础上总

结的 30 keV 的 D^+ 和 50 keV 的 H^+ 在不同厚度 Cr 层的 Cr/W 双层块体中的模拟射程分布汇总, 表中的编号是按照样品编号对应的大写形式进行编写, 以便与样品编号保持一致. 设 $\Delta(X)$ 为模拟离子射

程与 Cr 层厚度的差 (其中 X 代表表格中的编号), 即有公式

$$\Delta(X) = \text{离子射程} - \text{Cr 层厚度}. \quad (1)$$

表 3 用 SRIM 软件模拟 D^+/H^+ 在 Cr/W 双层块体的模拟射程

试样编号 (Cr 层厚度 nm)	a(100)	b(200)	c(1000)	d(200)	e(400)
离子射程/nm 30 keV (D^+)	127 (107)	210 (330)	334 (143)	—	—
(射程偏差 nm) 50 keV (H^+)	—	—	—	235 (179)	390 (82)

注: D^+ 的模拟射程值是引用 H^+ 的模拟射程值.

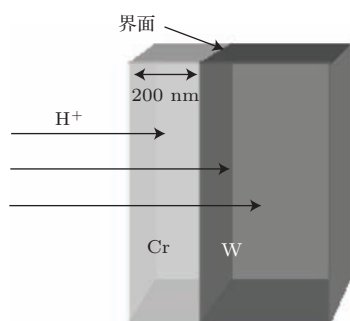


图 7 H^+ 射入 200 nm Cr/W 块体示意

因 a, b, c 三组样品是被 30 keV 的氢的同位素氘辐照, 所以用 $\Delta(a)_1$, $\Delta(b)_1$, $\Delta(c)_1$ 分别表示与之相对应的差值; d, e 两组样品是被 50 keV 的氢辐照, 所以用 $\Delta(d)_2$, $\Delta(e)_2$ 分别表示与之相对应的差值. 将 (1) 式运用于表 3, 有如下两个不等式成立:

$$\Delta(a)_1 > \Delta(b)_1 > 0 > \Delta(c)_1, \quad (2)$$

$$\Delta(d)_2 > 0 > \Delta(e)_2. \quad (3)$$

说明在上述两种能量条件下, 对 a, b, d 三组样品, 辐照粒子会穿过 Cr 层经过 Cr/W 混合层进入 W 基; 对 c, e 两组样品, 因辐照粒子射程深度不超过样品 Cr 层厚度, 所以多数辐照粒子只能停留在 Cr 层, 不能进入 W 基内部.

对照图 4 和图 6 实验结果, a, b, c 三组样品被能量为 30 keV、束流强度为 $1.2\text{--}1.5 \times 10^{17} D^+ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 剂量是 $8.0\text{--}9.0 \times 10^{21} D^+ \cdot m^{-2}$ 的氘辐照后, 氘进入 a, b 两组样品的深度均大于样品本身的 Cr 膜层厚度, 所以氘离子多数会与 Cr/W 混合过渡层接触, 然后进入 W 基内部, 结果是 b 组样品表面起泡明显, a 组样品没有起泡; 氘进入 c 组样品的深度小于样品本身的 Cr 膜层厚度, 所以氘

离子大多数只能停止于 Cr 层内, 不能接触到 Cr/W 混合过渡层, 实验结果是 c 组样品表面没有起泡. d, e 两组样品被能量为 50 keV、束流强度 $1.9 \times 10^{18} H^+ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 剂量 $1.0 \times 10^{22} H^+ \cdot m^{-2}$ 的氢辐照后, 氢进入 d 组样品的射程深度大于样品本身 Cr 层的厚度, 多数氢离子会与 Cr/W 混合过渡层接触, 然后进入 W 基内部, 结果是 d 组样品表面起泡明显, 且泡数目较多; 氢进入 e 组样品的深度小于样品本身的 Cr 膜层厚度, 所以氘离子大多数只能停止于 Cr 层内, 不能接触到 Cr/W 混合过渡层, 实验结果是 e 组样品表面没有起泡. 由 b, d 两组样品实验结果, 辐照后表面均有起泡现象, 说明在上述两种辐照实验条件下, Cr/W 过渡层利于形成氘、氢泡, 而 a 组样品表面之所以没有出现起泡现象, 主要原因在于膜层太薄, 不足以在 W 基表面形成一层完整的覆盖膜, 所以不能够使表面形成气泡; 由 c, e 两组样品实验结果, 辐照后表面没有起泡, 说明在上述两种辐照实验条件下, 氘、氢在 Cr 膜中没有大量聚集而达到起泡的剂量, Cr 膜层不易聚集氘、氢而成泡.

综上所述, 本文实验结果表明在 高能、低束流的氢或氘辐照下, Cr/W 混合过渡层有利于氢、氘的滞留, 说明 W 中掺杂入一定量的 Cr 元素后, 更易出现氢、氘的起泡现象. 推测其作用机理是由于半径小的 Cr 的掺入, 改变了 W 晶体的晶格形式, 使过渡层的晶格变形, 产生的位错、缺陷等^[25] 成为俘获氢、氘的陷阱^[26,27], 使气体滞留而起泡.

4 结 论

本文主要研究了采用双 Ar^+ 离子束镀膜法在 W 基底表面镀上不同厚度 Cr 膜样品后, 样品界面

处的元素分布状况和镀膜样品经高能、低束流的氢或氦辐照前后样品表面形貌变化, 结合射程模拟软件SRIM模拟不同能量的 H^+ 在Cr/W双层块体中的射程分布结果, 得出如下结论:

1) 能谱分析证实, 运用双离子束镀膜法制得的样品, 在Cr层与W基界面附近区域Cr, W两种元素都有分布, 说明在膜与基底的接触面区域有Cr/W混合过渡层形成;

2) 扫描电镜表面形貌分析和SRIM射程模拟结果显示, 在 高能、低束流的氢或氦辐照下, 辐照粒子射程不能超过膜层厚度, 样品表面没有起泡现象; 辐照粒子射程超过膜厚的两组样品, 粒子进入Cr/W过渡层的表面起泡明显. 这说明在 高能、低束流的氢或氦辐照条件下, Cr/W混合过渡层有利于形成氢泡或氦泡.

课题组的同事们在实验中给予了帮助, 北京航空航天大学王三胜老师提供双离子束镀膜仪器, 兰州重离子加速器国家重点实验室和北大重离子加速器国家重点实验室的老师们在氦、氢辐照实验中给予帮助, 在此一并致谢!

参考文献

- [1] Zhang Z J, Zhong Z H, Shen W P 2005 *Mater. Rev.* **19** 56 (in Chinese) [周张健, 钟志宏, 沈卫平 2005 材料导报 **19** 56]
- [2] Li Y K, Ji K J 1999 *Mater. Rev.* **13** 5 (in Chinese) [李云凯, 纪康俊 1999 材料导报 **13** 5]
- [3] Lü G H, Luo G N, Li J G 2010 *Mater. Chin.* **29** 42 (in Chinese) [吕广宏, 罗广南, 李建刚 2010 中国材料进展 **29** 42]
- [4] Wang X X, Zhang Y, Zhou H B, Wang J L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 046103 (in Chinese) [王欣欣, 张颖, 周洪波, 王金龙 2014 物理学报 **63** 046103]
- [5] Zou X Q, Xue J M, Wang Y G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036102
- [6] Yang X, Liu S, Zheng H, Zhao Y, Xiong L Y, Wang L B 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 756 (in Chinese) [杨勋, 刘实, 郑华, 赵越, 熊良钺, 王隆保 2003 物理学报 **52** 756]
- [7] Liu Y L, Jin S, Zhang Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 016105
- [8] Luo G N, Shu W M, Nishi M 2006 *Fusion Eng. Des.* **81** 957
- [9] Liu Y L 2010 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [刘悦林 2010 博士学位论文 (北京: 北京航空航天大学)]
- [10] Lee H, Haasz A, Davis J, MacAulaynewcombe R, Whyte D, Wright G 2007 *J. Nucl. Mater.* **360** 196
- [11] Tyburska B, Alimov V K, Ogorodnikova O V, Schmid K, Ertl K 2009 *J. Nucl. Mater.* **390–391** 651
- [12] Wang W M, Roth J, Lindig S, Wu C H 2003 *Nucl. Sci. Tech.* **26** 429 (in Chinese) [王玟珉, Roth J, Lindig S, Wu C H 2003 核技术 **26** 429]
- [13] Shu W M, Nakamichi M, Alimov V K, Luo G N, Isobe K, Yamanishi T 2009 *J. Nucl. Mater.* **390–391** 1017
- [14] Zhang W Z, Tang X H, Li J Q, Shi L Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 195202 (in Chinese) [张文钊, 唐兴华, 李嘉庆, 施立群 2013 物理学报 **62** 195202]
- [15] Loarte A, Becoulet M, Saibene I G, Sartori R, Campbell D J, Eich T, Herrmann A, Laux M, Suttrop W, Alper B, Lomas P J, Matthews G, Jachmich S, Ongena J, Innocente P 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 1815
- [16] Sugiyama K, Krieger K, Lungn C P, Roth J 2009 *J. Nucl. Mater.* **390–391** 659
- [17] Shu W M, Luo G N, Yamanishi T 2007 *J. Nucl. Mater.* **367–370** 1463
- [18] Luo G N, Umstadter K, Shu W M, Wampler W, Lu G H 2009 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **267** 3041
- [19] Causey R, Wilson K, Venhaus T, Wampler W R 1999 *J. Nucl. Mater.* **266–269** 467
- [20] Zhang Y, Wang W, Ren H T, Han W J, Liu F S, Yu J G, Peng S X, Zhu K G 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **307** 357
- [21] Anderl R A, Pawelko R J, Schuetz S T 2001 *J. Nucl. Mater.* **290–293** 38
- [22] Kurishita H, Matsuo S, Arakawa H, Sakamoto T, Kobayashi S, Nakai K, Takida T, Kato M, Kawai M, Yoshida N 2012 *J. Nucl. Mater.* **398** 87
- [23] Doerner R P, Baldwin M J, Nishijima D, Roth J, Schmid K 2011 *J. Nucl. Mater.* **415** 717
- [24] Baldwin M J, Doerner R P, Nishijima D, Tokunaga K, Ueda Y 2009 *J. Nucl. Mater.* **390–391** 886
- [25] Xiao D Q, Zhu J G, Zhu J L, Shen L 2011 *Thin Film Physics and Devices* (Beijing: National Defence Industry Press) pp66–68 (in Chinese) [肖定全, 朱建国, 朱基亮, 申林 2011 薄膜物理与器件 (北京: 国防工业出版社) 第66–68页]
- [26] Wang P X, Song J S 2002 *Permeation of Helium and Hydrogen in Materials* (Beijing: National Defence Industry Press) p69 (in Chinese) [王佩璇, 宋家树 2002 材料中的氦及氦渗透 (北京: 国防工业出版社) 第69页]
- [27] Wan F R 1993 *Irradiation Damage of Metal Materials* (Beijing: Science Press) pp87–92 (in Chinese) [万发荣 1993 金属材料的辐照损伤 (北京: 科学出版社) 第87–92页]

Irradiation effect of deuterium or hydrogen on Cr/W mixed transitional layers prepared by double ion beam deposition^{*}

Feng Hong-Li Gou Cheng-Ling[†] Yu Jian-Gang Han Wen-Jia Chen Zhe Cai Ya-Nan
Zhu Kai-Gui

(School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 27 June 2014; revised manuscript received 22 July 2014)

Abstract

Cr films with different thickness values on W substrates are prepared by double-ion-beam-deposition(DIBD) method. The deep distributions of Cr and W are analyzed by energy dispersive spectrometer. Hydrogen and deuterium irradiation of high energy and low flux are carried out in heavy ion accelerator. The changes of the sample surface morphology are analyzed by scanning electron microscopy. The injection range of hydrogen particles in double layers of Cr/W is simulated by simulation software SRIM. The experimental results demonstrate that a Cr/W mixture transitional layer is formed at the interface between Cr and W using DIBD method; hydrogen and deuterium of high energy and low flux tend to be retained in the Cr/W mixture transitional layer and form gas bubbles, while the Cr film is not easy to retain enough hydrogen or deuterium to form gas bubbles.

Keywords: Cr/W mixture transition layer, hydrogen or deuterium irradiation, double-ion-beam-deposition

PACS: 61.82.Bg, 61.80.Jh, 61.82.-d, 52.40.Hf

DOI: 10.7498/aps.64.026101

^{*} Project supported by the International Thermonuclear Experimental Reactor Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2011GB108008, 2013GB109003) and the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No.51171006).

[†] Corresponding author. E-mail: gouchengling@buaa.edu.cn