

等离子体辐照对第一镜表面反射率的影响研究

陈聚, 鄢容, 陈俊凌

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

[摘要] 研究了多晶钼、钨第一镜样品经等离子体辐照前后的表面形貌及反射率变化。实验结果表明: 第一镜表面的各个部位在石墨限制器以下所处的区域不同, 经等离子体辐照后, 处于沉积区的镜面比处于腐蚀区的镜面相对平滑, 反射率也相对较高, 此外, 在保持表面反射率性能方面, 钨第一镜样品要优于钼第一镜样品。

[关键词] 第一镜; 反射率; 腐蚀; 沉积

[中图分类号] TG172.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2010)04-0030-03

Study on Influence of Plasma Irradiation on First Mirror Reflectivity

CHEN Ju, YAN Rong, CHEN Jun-ling

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

[Abstract] It mainly investigated the change of morphology and optical reflectivity of polycrystalline Mo and W first mirror before and after exposure. Due to each part of the mirror surface located in different region under graphite limiter, the morphology and reflectivity of some part on mirror surface which located in deposition-dominated region maintained better than that of other part which located in erosion-dominated region after plasma exposure. In the same experiment, it was found that the reflectivity of W first mirror maintained better than Mo first mirror after exposure.

[Key words] first mirror; reflectivity; erosion; deposition

随着热核聚变实验装置规模的不断扩大, 第一镜将被作为重要的光学元件应用于等离子体光学诊断系统, 如汤姆逊散射系统、远红外测量系统等。在聚变装置中, 如正在建造中的国际热核聚变反应堆(ITER), 由于第一镜直接面对高温等离子体, 强电磁辐射、高能粒子轰击和中子辐射等会对其造成诸多不利的影响^[1], 使得其表面反射率等一系列光学特性遭到破坏, 使用寿命降低。其中 2 个重要的物理化学过程: 来自等离子体的高能粒子对第一镜表面的腐蚀以及杂质在第一镜表面的沉积, 前者将增加镜子表面的粗糙度, 后者将在镜子表面形成一层杂质膜, 覆盖原先平整的镜面, 这两方面都将明显降低镜子表面的反射率, 从而降低第一镜的工作效率, 缩短其工作寿命。因此, 在聚变装置中, 保持第一镜的表面光学特性, 尤其是保持表面反射率, 是一项亟待攻克的重要研究课题。但人们目前还不足以彻底理解和预测这 2 个重要过程(腐蚀和沉积)对镜面反射率的影响, 世界各地的聚变实验室纷纷开展各种实验, 研究等离子体腐蚀和杂质沉积对第一镜表面反射率的影响^[2-5]。

对 2 种第一镜(分别由多晶钼、钨制成)进行等离子体辐照, 拟研究其表面反射率的变化情况, 以及等离子体腐蚀和杂质沉积对第一镜表面反射率所造成的影响, 进而提出有效保持第一镜表面反射率的合理建议。

1 实验

第一镜样品的实验材料通常选用不锈钢、钼和钨。由于不锈钢材料制成的第一镜在托卡马克装置中经等离子体辐照后表面反射率下降较为严重^[6], 实验中将细晶粒的钼和钨多晶纯金属材料经过热压烧结制成第一镜实验样品, 钼第一镜样品尺寸为 35 mm × 20 mm, 钨第一镜样品的尺寸为 40 mm × 35 mm。经过特殊抛光工艺加工后, 使用原子力显微镜(AFM)测得钼第一镜和钨第一镜表面的粗糙度分别为 0.96, 1.86 nm。在超声波清洗机中用乙醇水溶液对第一镜样品进行清洗, 之后使用紫外-可见光-红外分光光度计(SHIMADZU UV-2550)测量样品表面的初始反射率, 测量波段为 200~900 nm。第一镜样品经等离子

[收稿日期] 2010-04-22; **[修回日期]** 2010-05-12

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(10775138)

[作者简介] 陈聚(1984—), 男, 浙江人, 硕士生, 主攻等离子体物理。

体辐照后,仍使用该分光光度计测量其表面相同波段的反射率。

为了研究等离子体腐蚀和杂质沉积对第一镜表面反射率的影响,通过预先设计好的样品架将第一镜实验样品安置在 HT-7 托卡马克第一壁的水平面上,位于石墨限制器以下,且远离等离子体加热装置。第一镜样品表面与水平面成 45° 仰角,镜面最顶部距等离子体最外闭合磁面的距离约为 1 cm。由于镜面不同部位与最外闭合磁面的距离不同,笔者定义了镜面的“顶部”、“中部”和“底部”,见图 1。这种设置方法使第一镜的整个镜面覆盖限制器以下的腐蚀区和沉积区,使得同时研究等离子体腐蚀和杂质沉积对镜面反射率的影响成为可能。

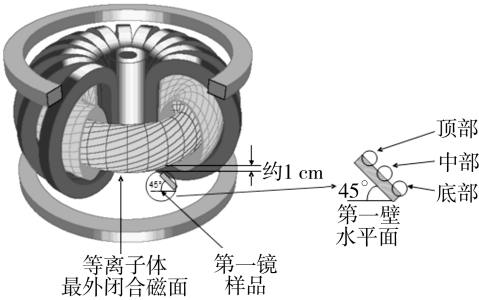


图 1 第一镜样品在 HT-7 托卡马克真空室中的设置
Fig. 1 First mirror experiment setup
in vacuum chamber of HT-7 tokamak

在大约 2 个月的等离子体放电实验期间,共放电 3 528 炮,等离子体极向电流 $I_p = 80 \sim 160$ kA,环向磁场 $B_t = 1.5 \sim 2$ T,电子密度 $n_e = (1.5 \sim 3.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,边界等离子体电子温度 $T_e = 10$ eV,低杂波加热的能量范围为 300~500 kW,工作气体为氢气或同位素氘气。

2 结果及分析

2.1 腐蚀和沉积对表面反射率的影响

钼、钨第一镜样品经高温等离子体辐照后可以发现,镜面上覆盖了厚度不均的沉积膜,且在镜面顶部(即镜子表面紧邻边缘等离子体的部分)出现凹凸不平的缺陷区,而镜面底部则相对较为平滑。图 2 是钼、钨

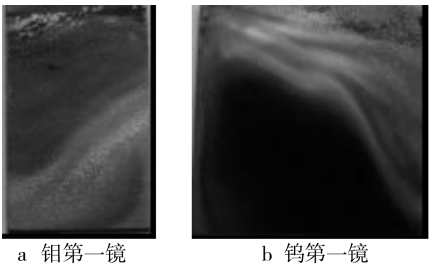


图 2 第一镜样品经等离子体辐照后的表面
Fig. 2 View of first mirror samples after plasma irradiation

第一镜经等离子体辐照后的表面。

钼、钨第一镜样品经等离子体辐照后,表面各部位的反射率均有不同程度的下降,见图 3 和图 4。以钼第一镜为例(图 3),由于镜面顶部较底部更接近于边缘等离子体,使得镜面顶部主要处于等离子体腐蚀区,因而等离子体对顶部的腐蚀作用较底部强烈;所以,经等离子体放电实验后,镜面顶部的表面形貌出现严重缺陷,相比镜面底部,反射率下降更为严重,甚至于接近 0。图 4 中需要解释的是:钨第一镜经等离子体辐照后,表面底部的反射率出现波动较大的曲线,这是由于入射光在镜子表面的干涉所引起的。

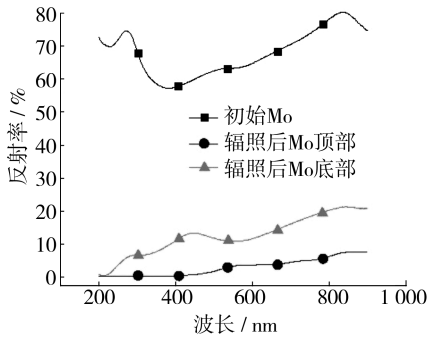


图 3 钼第一镜样品在等离子体辐照前后的反射率
Fig. 3 The reflectivity of Mo first mirror sample
before and after plasma irradiation

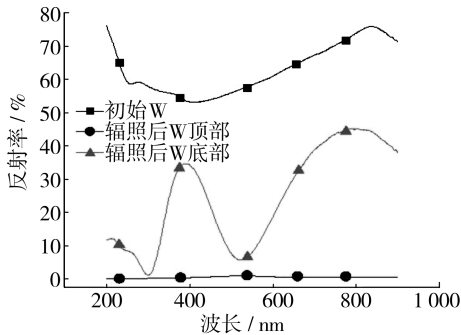


图 4 钨第一镜样品在等离子体辐照前后的反射率
Fig. 4 The reflectivity of W first mirror sample
before and after plasma irradiation

使用场发射扫描电镜(SEM),可以更清晰地观察钼第一镜镜面上各部位在经等离子体辐照后的表面形貌,见图 5。对比 SEM 图像可以发现,钼第一镜样品

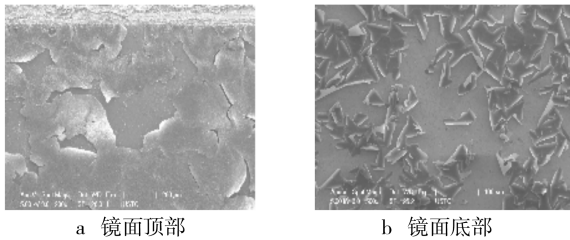
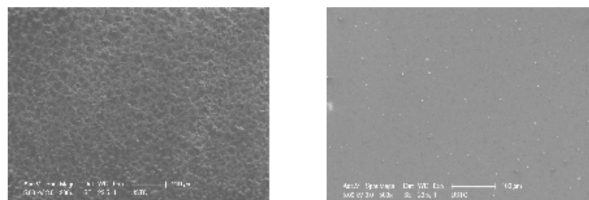


图 5 钼第一镜样品 SEM 图像 500X
Fig. 5 The SEM image of Mo first mirror 500X

底部的缺陷较其顶部少,但整个镜面均有不同厚度的杂质膜覆盖,这种表面形貌上的差异使得镜面底部的反射率要高于顶部。钨第一镜样品的 SEM 图见图 6,同样可以发现,实验后,其表面底部较顶部更为平整,使得底部的反射率高于顶部。



a 镜面顶部

b 镜面底部

图 6 钨第一镜样品 SEM 图像 500×

Fig. 6 The SEM image of W first mirror 500×

使用能谱仪(EDS)对钨第一镜样品表面的沉积膜进行元素定性分析,结果见图 7,可以发现,沉积膜的主要成分为 Mo, B, C, Si, Cr, Fe 等元素。其中, Mo 来自第一镜样品, B 来自等离子体实验期间第一壁的硼化, C 和 Si 来自石墨限制器及其 SiC 涂层, Cr 和 Fe 来自第一壁不锈钢材料。这些杂质元素共同沉积在第一镜表面上,构成杂质膜,从而降低了第一镜表面的反射率。此外,由于这些杂质膜离边缘等离子体的距离不同,等离子体不同程度的腐蚀作用使得膜表面的粗糙程度有所不同,进而使表面各部位的反射率产生差异。

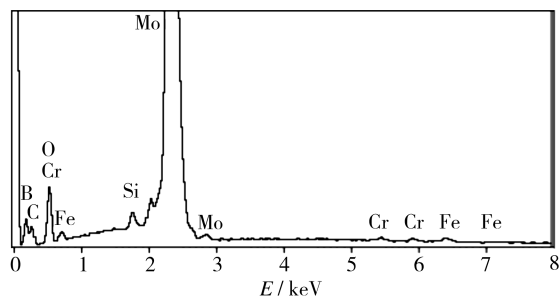


图 7 钨第一镜表面 EDS 分析

Fig. 7 Energy dispersive spectroscopy (EDS)
on Mo first mirror surface

2.2 2 种第一镜表面反射率变化对比

第一镜所用材料不同,在经等离子体辐照后,其表面顶部和底部的反射率下降程度则有所不同。对比钼、钨第一镜样品在等离子体辐照前后的反射率变化(见图 3 和图 4),可以发现:两者的初始反射率相差不大,以 600 nm 入射光的情况为例,2 种材料的初始反射率仅相差 4%;但经等离子体辐照后,两者的反射率差别较大,且钼第一镜表面底部的反射率较钨第一镜表面底部下降更为严重,以 800 nm 入射光的情况为例,钼第一镜表面底部的反射率比钨第一镜表面底部约低 40%。这是由于经等离子体辐照后,钼、钨第一镜样品底部的表面粗糙程度不同(见图 5 和图 6)所导

致的。

以 800 nm 入射光为例,钼第一镜顶部的反射率与钨第一镜顶部相差不大,都接近于 0。对比 SEM 图像(见图 5 和图 6)可以发现,等离子体放电实验后,钨第一镜表面的顶部和底部要比钼第一镜表面相同部位平整得多,且未发现有沉积层剥落的现象。因此作为第一镜的材料,钨比钼理想得多。

3 结语

等离子体的腐蚀作用使得相对平整的杂质沉积层变得粗糙,甚至剥落,进而更大程度地降低第一镜表面的反射率。在距边缘等离子体较远的镜面底部区域,腐蚀作用较弱,沉积层能够完整地覆盖在镜面本底之上,虽然沉积层也会在一定程度上降低镜面的反射率,但其影响相对较弱。所以,在没有任何保护装置和原位清洗技术的情况下,第一镜被安装在远离边缘等离子体的沉积区,可以相对较好地保持镜面粗糙度及其反射率,使工作效率大大提高。

在第一镜的选材方面,由于钨材料在抗溅射性能方面优于钼材料,所以在等离子体辐照过程中,钨材料能较好地保持其表面粗糙度,且杂质沉积层不会出现表面剥落现象,此外,钼、钨第一镜样品的初始反射率相差不大(约为 4%);所以,钨材料是更为理想的选择。

[参 考 文 献]

- [1] Litnovsky A, Rudakov D L, De Temmerman G, et al. First Mirror of Diagnostic Mirror in a Tokamak Divertor: An Overview of Experiments in DIII-D[J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83: 79—89.
- [2] Maeot L, De Temmerman G, Oelhafen P, et al. Rhodium Coated Mirrors Deposited by Magnetron Sputtering for Fusion Applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78 (10): 103507—103513.
- [3] De Temmerman G, Pitts R A, Voitsenya V S, et al. First Mirror Tests for ITER: Influence of Material Choice on the Erosion/Deposition Mechanisms Affecting Optical Reflectivity[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 363: 259—263.
- [4] Zhou Y, Gao B Y, Jiao Y M, et al. Study of First Mirror Exposure and Protection in HL-2A Tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 2823—2826.
- [5] Tang C J, Li R H, Chen J L. Influence of Long-term Plasma Irradiation on Metallic First Mirrors in HT-7 Tokamak[J]. Plasma Science and Technology, 2008, 10 (4): 412—415.
- [6] 李仁红, 汤春江, 陈俊凌, 等. HT-7 等离子体辐照后金属第一镜表面特性研究[J]. 表面技术, 2007, 34(4): 11—14.