

# D<sup>+</sup> 离子束轰击时间对氕钛靶特性的影响\*

王博宇<sup>1)</sup> 向伟<sup>1)†</sup> 戴晶怡<sup>1)</sup> 谈效华<sup>1)</sup> 程亮<sup>1)</sup> 陈磊<sup>1)</sup> 秦秀波<sup>2)</sup>

1) (中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

2) (中国科学院高能物理研究所核分析技术重点实验室, 北京 100049)

(2010年1月8日收到; 2010年6月1日收到修改稿)

利用 ZF-300keV 中子发生器, 采用伴随粒子法研究了氕钛靶的中子产额随 D<sup>+</sup> 离子束轰击时间的变化特性; 利用慢正电子湮没技术和扫描电镜分别研究了 D<sup>+</sup> 离子束轰击前后靶辐射损伤特性和表面形貌特征. 结果表明, 束流轰击引起氕钛靶缺陷结构和表面形貌的改变, 但轰击时间的不同并未引起氕钛靶的中子产额、缺陷结构和表面形貌有明显差异; 数值模拟了 D<sup>+</sup> 离子束在氕钛靶的辐射损伤特性和能量损失规律并与实验结果进行了比照分析和讨论.

**关键词:** 中子发生器, 氕钛靶, 伴随粒子法, 慢正电子湮没技术

**PACS:** 29.20. Rf, 29.25. Dz, 78.70. Bj, 24.10. Lx

## 1. 引言

中子已广泛应用于冶金、化学、生物、材料辐照损伤研究、半导体抗核加固、辐照育种、治疗癌症、照相、石油勘探、地质和矿物勘探等诸多领域<sup>[1-7]</sup>, 中子发生器中离子源产生的 D<sup>+</sup> 离子束经加速后轰击氕靶或氕靶, 通过  $T(d, n)^4\text{He}$  和  $D(d, n)^3\text{He}$  聚变反应, 产生 14 和 2.5 MeV 中子.

金属钛的吸氢密度高达  $9.2 \times 10^{22}$  氢原子/cm<sup>3</sup>, 比液态氢密度高达一倍多, 是一种吸氢密度很高的功能材料; 金属钛具有强度高、抗腐蚀以及良好的机械性能等特点<sup>[8]</sup>; D<sup>+</sup> 离子束在钛中散射截面小, 其能量损失小, 平均射程远, 使 D<sup>+</sup> 离子与 D 或 T 原子核发生碰撞和核反应的概率相应增大, 因此, 金属钛是中子发生器靶材料最佳选择之一<sup>[9,10]</sup>. 束流与靶的作用特性的研究一直是众多科研工作者关注的焦点. 此外, 研究 D<sup>+</sup> 离子束轰击时间对氕钛靶特性的影响对于提高中子发生器的使用寿命有重要意义; 目前最为有效的研究辐射损伤效应的方法之一就是束流作用前后靶微观结构进行表征, 通过其状态变化的研究推动辐射损伤机理的进一步完善和发展<sup>[11]</sup>. 由于存在中子防护等问题, 国内外有关 D<sup>+</sup> 离子束与氕钛靶作用特性的研究报道

很少<sup>[12]</sup>.

本工作中子发生器上, 采用伴随粒子法研究中子产额随 D<sup>+</sup> 离子束轰击时间的变化情况; 采用慢正电子湮没技术和扫描电镜分别研究束流轰击前后靶辐射损伤特性和表面形貌特征; 依据离子与固体相互作用理论, 对 D<sup>+</sup> 离子束流轰击氕钛靶的作用特性进行分析和讨论.

## 2. 实验装置和方法

### 2.1. 氕钛靶的制备

实验用的钛膜样品是将经表面和高真空除气处理后 Mo 衬底放置在电子枪镀膜机内的靶架上, 采用电子枪加热的方式将 99.9% 的高纯钛沉积在 Mo 衬底上, 镀膜时系统真空度约为  $10^{-4}$  Pa.

钛膜的氕化在无油超高真空金属系统内进行. 通过加热氕化铀粉瓶释放一定量的氕气, 加热钛膜吸氕形成氕钛靶.

### 2.2. 中子发生器

实验是在 ZF-300 keV 中子发生器上进行的, 图 1 是中子发生器的结构示意图, 中子发生器采用双等离子体离子源, 进气量由加在靶管上的电流来控制

\* 中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金(批准号: S20090801)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xiangwei@caep.ac.cn

制;抑制电极能抑制了加速管出口的次级电子,保护了离子源阳极,降低了由于次级电子反加速造成的高压放电的概率,保证加速器的稳定运行;靶室前水冷限束光阑的内孔径是 20 mm;135°方向为伴随离子测量系统管道,内装有准直光阑,伴随离子测量系统管道端头装有金硅面垒探测器,以记录伴随粒子;电源、磁铁、真空泵采用循环水冷却,离子源采用循环油冷却。

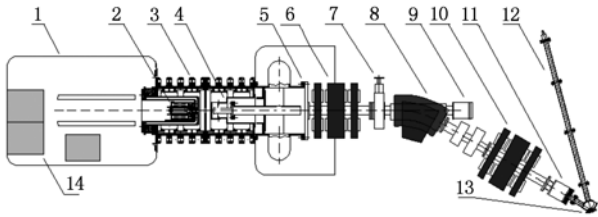


图1 中子发生器结构示意图 1 高压电极;2 离子源;3 加速管;4 抑制电极;5 真空四通;6 三重四极透镜 I ;7 闸板阀;8 分析磁铁;9 束流观察窗 I ;10 三重四极透镜 II ;11 束流观察窗 II ;12 135°伴随粒子测量系统;13 靶室; 14 离子源电源

### 2.3. 实验方法

在中子发生器上,分别用能量为 210 keV,束流强度为 0.5 mA 的 D<sup>+</sup> 离子束分别对 3 块以 Mo 为衬底的氙钛靶进行 15, 30 和 60 min 连续轰击,利用 135°伴随粒子测量系统测量伴随粒子计数率;利用慢正电子湮没的多普勒展宽分析技术和扫描电子显微镜分别对束流轰击前后氙钛靶微观缺陷结构和表面形貌进行分析。

氙钛靶的编号及实验条件如表 1 所示。

表 1 氙钛靶的编号及实验条件

编号	束流能量/keV	束流强度/mA	辐照时间/min
D-0#		未辐照	
D-4#	210	0.5	15
D-5#	210	0.5	30
D-6#	210	0.5	60

## 3. 结果与讨论

### 3.1. D<sup>+</sup> 离子束轰击时间对氙钛靶中子产额的影响

中性原子在 D<sup>+</sup> 离子束能量为几百 keV 的低能区,D-D 核反应有两个反应道

$$D + d \rightarrow p + T + 4.708 \text{ MeV}, \quad (1)$$

$$D + d \rightarrow n + {}^3\text{He} + 3.269 \text{ MeV}. \quad (2)$$

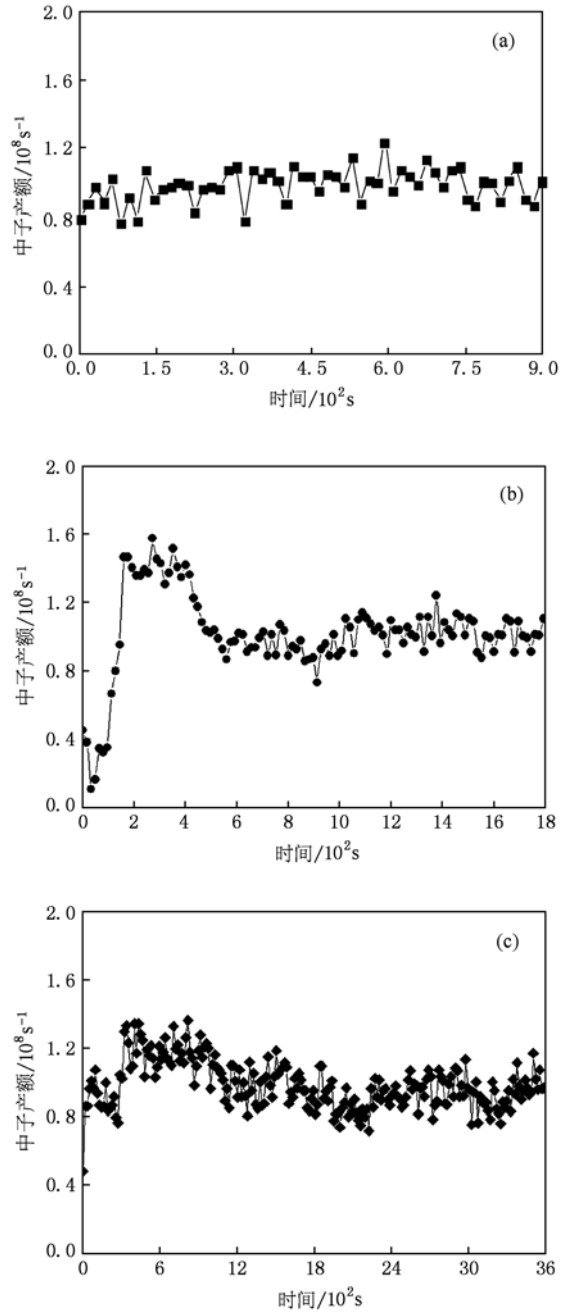


图 2 中子产额随束流轰击时间的变化 (a) D-4#;(b) D-5#;(c) D-6#

其中核反应产生的<sup>3</sup>He, p, T 粒子的能量分别为 0.78, 3.05, 0.98 MeV,理论上可以通过测量<sup>3</sup>He 来实现对中子的监测,但由于<sup>3</sup>He 粒子能量太低,在入射的 D<sup>+</sup> 离子束流能量 E<sub>d</sub> 大于 150 keV 时,很难与靶上散射的氙核区分. 三种产物的中只有质子的能量比较高,可以与散射氙核及噪声信号分开,同时反应道(1)与(2)反应截面相似,故实验上通常利用测量 p 来确定 D-D 核反应中子产额<sup>[12]</sup>.

在 D-D 核反应中,反应道(1)与(2)反应截面接近,但质子的计数和中子数成倍数关系;在质心坐标系中,中子的发射是各向同性的,而在实验室坐标系中,中子的发射是各向异性的. 在本实验中,伴随粒子记数  $N_p$  与中子产额  $Y_n$  表示为<sup>[13]</sup>

$$Y_n = \frac{4\pi}{\Delta\Omega} \cdot R_{\text{thick}} \left( \frac{Y_{d,n}}{Y_{d,p}} \right)_{\text{thick}} \cdot N_p, \quad (3)$$

其中,  $\Delta\Omega$  为金硅面垒探测器对靶张的立体角;  $R_{\text{thick}} \left( \frac{Y_{d,n}}{Y_{d,p}} \right)_{\text{thick}}$  为各向异性修正因子可在文献[14]中直接查找.

中子产额随  $D^+$  离子束轰击时间的变化如图 2 所示,中子产额保持在  $1.0 \times 10^8$  左右,随着束流轰击时间的变化未出现明显变化, D-5# 氘靶中子产额出现的一个峰位,这是因为在此实验开始阶段中子发生器运行不稳定导致  $D^+$  离子束流变化,从而引起了中子产额的不稳定造成了这个峰位的存在;实验过程中, D-D 核反应消耗靶中的氘核不会引起氘靶中子产额的下降,由此可知:能量为 210 keV 束流强度为 0.5 mA 的  $D^+$  离子束在 1 h 以内轰击靶,能量沉积产生的热效应对中子产额影响不明显.

### 3.2. $D^+$ 离子束轰击时间对氘靶微观缺陷结构的影响

$D^+$  离子束轰击前后氘靶慢正电子湮没多普勒展宽能谱中的  $S$  参数随正电子入射能量的变化如图 3 所示, Veen 经过多次实验和理论研究,给出一般正电子在材料中的平均射程  $R$  (nm) 与能量  $E$  (keV) 有如下关系<sup>[15]</sup>:

$$R = \frac{40}{\rho} E^{1.6}. \quad (4)$$

$D^+$  离子束轰击前后氘靶慢正电子湮没多普勒展宽能谱中的  $S$  参数随深度的变化如图 4 所示,在 D-0# 靶中,  $S$  参数的变化很小,表明在氘靶制备过程中其结构缺陷是均匀分布的;相对于 D-0# 靶,在 D-4#, D-5# 和 D-6# 氘靶中缺陷浓度显著增加,表明  $D^+$  离子束对靶造成辐照损伤;随  $D^+$  离子束轰击时间改变, D-4#, D-5# 和 D-6# 靶  $S$  参数的变化基本相同; D-4#, D-5# 和 D-6# 靶中辐射损伤程度的最大值在 0.3  $\mu\text{m}$ .

采用数值计算的方法,利用基于 Monte Carlo 的 SRIM 程序模拟了能量为 210 keV 的  $D^+$  离子束轰击氘靶时空位数目随深度的变化如图 5 所示,空位数目最大值在 1.3  $\mu\text{m}$  左右.

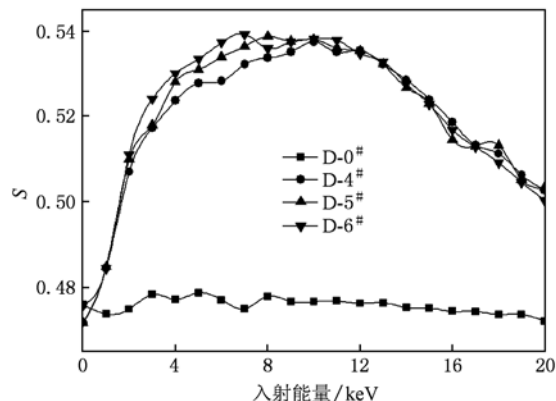


图3 氘靶  $S$  参数随正电子入射能量的变化

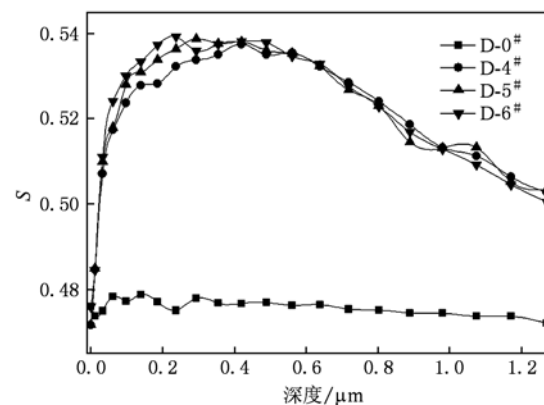


图4 氘靶  $S$  参数随靶深度的变化

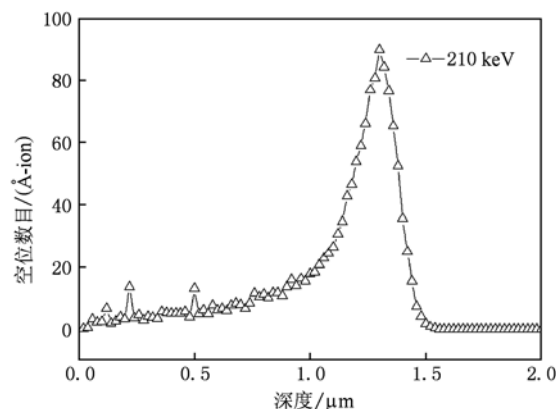


图5  $D^+$  离子束轰击氘靶时空位数目随深度的变化

$S$  参数和空位数目表征都是靶中辐射损伤的程度,二者相比较,  $S$  参数和空位数目随靶深度的变化在趋势上是相似的,都是先增大后变小,  $S$  参数的变化主要受谱中心区相对计数的影响,在氘靶中,价电子运动的动量较小,与正电子湮没产生的光子

计数落入峰中心区域中,决定  $S$  参数的大小,因此  $S$  参数主要反应正电子与低动量电子即价电子或传导电子的动量湮没信息,有空位的地方,原子的缺失造成核心电子密度降低,价电子密度相对增加,因而缺陷湮没谱中,低动量电子的湮没贡献比重相对增大,即  $S$  参数变大,因此  $S$  参数的变化反映出空位浓度的变化.

实验测量表明缺陷浓度最大处是距离靶表面  $0.3 \mu\text{m}$  处,数值模拟的值却在  $1.3 \mu\text{m}$  处. 存在差异的原因是:1)SRIM 程序基于原子碰撞理论,在辐射损伤模拟时只考虑同类粒子的碰撞,忽略了氘原子与钛原子的碰撞;2)SRIM 程序没有考虑点缺陷的迁移和复合;3)SRIM 程序未考虑束流能量造成的热效应,热效应的存在会加速原子的扩散,点缺陷的迁移和复合;4)SRIM 程序考虑点缺陷的变化,而未考虑空位和杂质原子的复合体的影响;5)入射正电子在物质中分布曲线的半高宽随着正电子入射能增加而增加,正电子的穿越效应对  $S$  参数的测量有影响.

### 3.3. $D^+$ 离子束轰击时间对氘钛靶表面形貌的影响

$D^+$  离子束轰击前后氘钛靶的扫描电镜结果如图 6 所示,未辐照的 D-0#氘钛靶的原始钛靶在沉积镀膜和机械加工过程中留下了条纹状痕迹,表面致

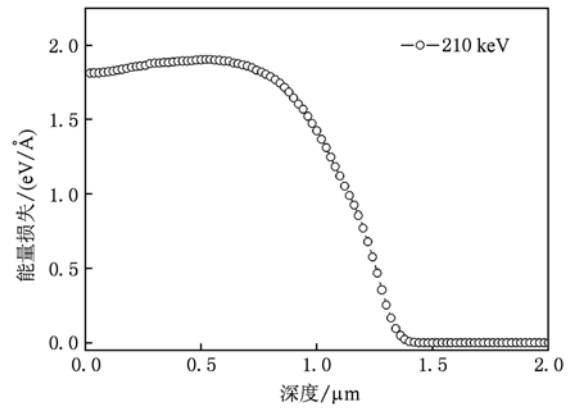


图 7  $D^+$  离子束在氘钛靶中的能量损失随深度的变化

密,无裂纹,在靶表面上存在不均匀性;D-4#, D-5# 和 D-6#氘钛靶表面的条纹状微凸变得不明显,靶的表面有较为严重的烧蚀,没有明显的熔坑,与原始表面相比,束流轰击后氘钛靶表面不均匀性降低;辐照强度不足以产生较深的熔化层,氘钛靶原始表面不均匀性导致了择优烧熔,其基本机理<sup>[16]</sup>:表面不均匀性导致了靶表面不同区域(即微凸与平坦区域) $D^+$  离子束能量沉积传热过程的差异,而这种传热过程的变化势必影响到后续辐照的热效应,在束流与条带状微凸作用过程中,表面微凸的顶端及其临近微区同时有能流流入,导致了微凸比平坦区域

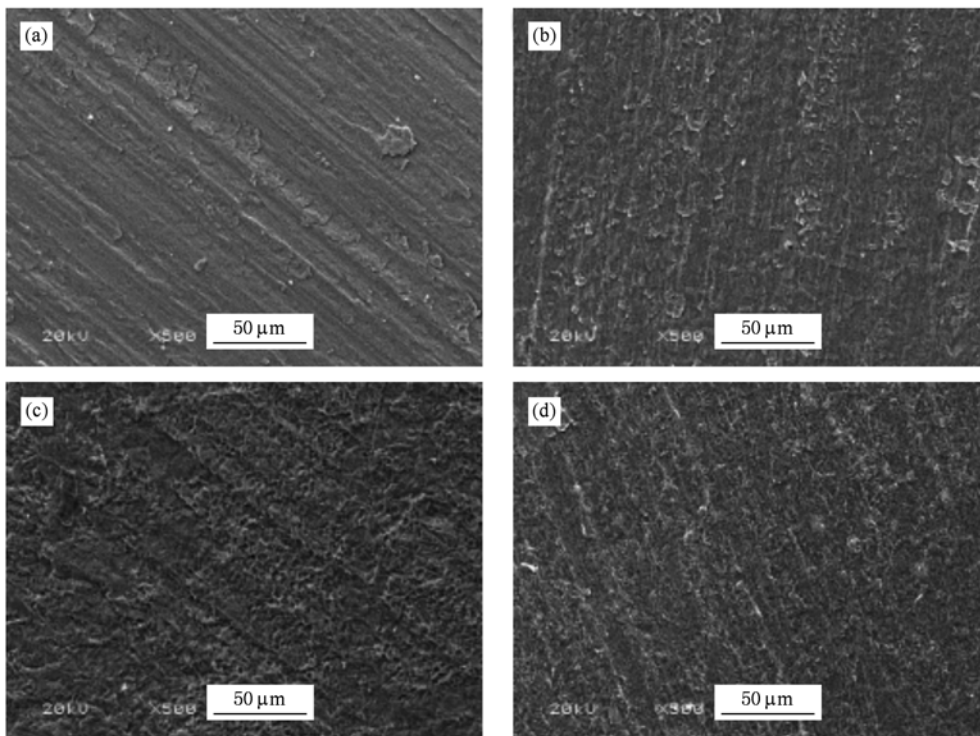


图 6 氘钛靶的 SEM 图片 (a) D-0#;(b) D-4#;(c) D-5#;(d) D-6#

更剧烈地加热和更快速升温,所以,微凸首先达到熔化温度,即择优烧熔,导致了选择烧蚀的产生.

利用数值计算的方法,结合 SRIM 程序模拟  $D^+$  离子能量在氘钛靶中能量损失随深度的变化如图 7 所示,  $D^+$  离子束入射能量为 210 keV 时,能量损失随深度的增加先缓慢增加后下降,出现了损失峰,靶内部能量损失峰的存在表明  $D^+$  离子能量可在靶内部快速聚积,从而导致表面物质产生较为严重的烧蚀,这与 SEM 观察到的实验现象相符合.

#### 4. 结 论

在中子发生器上,用能量为 210 keV 束流强度

为 0.5 mA 的  $D^+$  离子束分别对 3 块氘钛靶进行 15,30 和 60 min 连续轰击,氘钛靶的中子产额保持在  $1.0 \times 10^8$  左右.随着  $D^+$  离子束轰击时间的变化中子产额未出现明显变化; $D^+$  离子束轰击引起了氘钛靶缺陷浓度变化, $D^+$  离子束轰击时间的改变氘钛靶中缺陷浓度变化趋势基本一致,实验测量表明缺陷浓度最大处是距离靶表面 0.3  $\mu\text{m}$  处,数值模拟的值却在 1.3  $\mu\text{m}$  处; $D^+$  离子束轰击后氘钛靶表面出现了选择性烧熔,靶表面不均匀性对  $D^+$  离子束对靶表面形貌的改变有影响,数值模拟表明能量为 210 keV 的  $D^+$  离子束能量在氘钛靶中能量损失随深度的变化中出现了能量损失峰.

- 
- [1] Reijonen J 2007 *Nucl. Instrum. Meths B* **261** 272
- [2] Pauli M, Kehayias, Joseph J, Kehayias 2007 *Nucl. Instrum. Meths B* **261** 827
- [3] Aleksandrov V D, Bogolubov E P, Bochkarev O V, L Korytko A, Nazarov V I, Polkanov Y G, Ryzhkov V I, Khasaev T O 2005 *Appl. Radiat Isotopes* **63** 537
- [4] Lunardon M, Nebbia G, Pesente S 2004 *Appl. Radiat Isotopes* **61** 43
- [5] Jarman S E, Pinchin J, Brushwood J M 2007 *J. Radioanal Nucl.* **271** 47
- [6] Solano I, Reichenbach B, Schwoebel P R, Chichester D L, Holland C E, Hertz K L, Brainard J P 2008 *Nucl. Instrum. Meths A* **587** 76
- [7] Hatice A, Joel L G, Jacob T, Richard S, Larry E, Samuel F, Richard H, Lucy L, Timothy M C, Ralph J, Timothy M, Jeffrey S 2005 *Nucl. Instrum. Meths B* **241** 232
- [8] Liu G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4441 (in Chinese) [刘贵立 2008 物理学报 **57** 4441]
- [9] Hughey B J 1995 *Nucl. Instrum. Meths B* **95** 393
- [10] Yao Z E, Chen S W, Su T L 2004 *Nuclear Techniques* **27** 787 (in Chinese) [姚泽恩、陈尚文、苏桐龄 2004 核技术 **27** 787]
- [11] Wan F Y 1993 *Radiation Damage of Metal Material* (Beijing: Science Press) p1 (in Chinese) [万发荣 1993 金属材料的辐射损伤(北京:科学出版社) 第 1 页]
- [12] Monnin C, Ballanger A, Sciora E, Steinbrunn A, Alexandre P, Pelcot G 2000 *Nucl. Instrum. Meths. A* **453** 493
- [13] Ruby L, Crawford R B 1963 *Nucl. Instrum. Meths.* **24** 413
- [14] Liskien H, Paulsen A. 1973 *Nuclear Data Tables* **11** 569
- [15] Chichibu S, Iwai A, Nakahara Y, Matsumoto S, Higuchi H, Wei L S 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 256
- [16] Zhu X P, Lei M K, T C M 2003 *Nucl. Instrum. Meths B* **211** 69

## Effect of deuterium ion beam bombarding time on characteristic of deuteride titanium target\*

Wang Bo-Yu<sup>1)</sup> Xiang Wei<sup>1)†</sup> Dai Jing-Yi<sup>1)</sup> Tan Xiao-Hua<sup>1)</sup> Cheng Liang<sup>1)</sup> Chen Lei<sup>1)</sup> Qin Xiu-Bo<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Key Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 8 January 2010; revised manuscript received 1 June 2010)

### Abstract

Effect of the deuterium ion beam bombarding time on characteristic of the deuteride titanium target is studied by measuring the neutron yield as a function of bombarding time with the associated-particles method in ZF-300 neutron generation. Slow positron annihilation spectroscopy for defect structure analysis and scanning electron microscopy for the surface morphology analysis are used to characterize the targets. The results show that the beam bombardment cause the changes of the defect structure and the surface morphology of the deuteride titanium target, but the different bombarding times do not lead to the changes of the neutron yield, the defect structure, and the surface morphology of the deuteride titanium target under the work condition. The prominent physical mechanism of the interaction between deuterium ion beam and deuteride titanium target is discussed in detail based on the numerical study of the interaction between beam and solid.

**Keywords:** neutron generator, deuteride titanium target, associated particles method, slow positron annihilation spectroscopy

**PACS:** 29. 20. Rf, 29. 25. Dz, 78. 70. Bj, 24. 10. Lx

---

\* Project supported by the Science and Technique Innovation Foundation of Institute of Electronic Engineering of China, Academy of Engineering Physics, China (Grant No. S20090801).

† Corresponding author. E-mail: xiangwei@caep.ac.cn