

《原子核物理评论》

www.npr.ac.cn Nuclear Physics Review



Started in 1984

类金刚石碳剥离膜的制备及其寿命研究

樊启文 孟波 王华 张榕

Preparation and Lifetime Research of Diamond-like Carbon Stripper Foil

FAN Qiwen, MENG Bo, WANG Hua, ZHANG Rong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC03

引用格式:

樊启文, 孟波, 王华, 张榕. 类金刚石碳剥离膜的制备及其寿命研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):491-497. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC03

FAN Qiwen, MENG Bo, WANG Hua, ZHANG Rong. Preparation and Lifetime Research of Diamond-like Carbon Stripper Foil[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):491-497. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC03

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用多普勒移动衰减法研究⁴⁶Ti核的激发态能级寿命

Studies on the Lifetimes of ⁴⁶Ti Excited States via the Doppler Shift Attenuation Method 原子核物理评论. 2023, 40(2): 193–197 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023021

π^0 介子寿命的实验研究

Experimental Research of Neutral Pion Lifetime 原子核物理评论. 2021, 38(3): 256-264 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021028

放射性核素寿命计算方法的模拟研究

Simulation Study of Lifetime Calculation Methods for Radioactive Nuclides 原子核物理评论. 2020, 37(3): 611-616 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC26

超氚核寿命之谜及其展望(英文)

Hypertriton Lifetime Puzzle and Its Perspective 原子核物理评论. 2019, 36(3): 273–277 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.273

碳离子束射程快速验证方法的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Study on the Method of Rapid Range Verification of Carbon Ion Beam 原子核物理评论. 2020, 37(4): 901–907 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019064

碳离子在不同材料叶片的多叶光栅上产生的次级粒子研究

Study on the Secondary Particles Produced in Different Material Leaves of Multi-leaf Collimator under Carbon Ion Irradiation 原子核物理评论. 2020, 37(2): 217-224 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019050

文章编号: 1007-4627(2024)01-0491-07

类金刚石碳剥离膜的制备及其寿命研究

樊启文,孟波,王华,张榕

(中国原子能科学研究院核物理研究所,北京 102413)

摘要:采用磁过滤阴极真空弧(FCVA)技术,结合交流碳弧(ACCA)技术和松弛技术,制备了~5 μg/cm²的自 支撑类金刚石碳(DLC)剥离膜。采用 XP2U 电子天平测试 DLC 膜的均匀性。结果显示,在Φ100 mm 范围内, DLC 膜最大不均匀性为 8.82%。采用扫描电子显微镜(SEM)、拉曼(Raman)谱仪和 X 光电子谱(XPS)仪测试 分析 DLC 膜的微观结构。SEM 图像显示,通过双 90°过滤后的 DLC 膜表面光滑,基本不含液滴。Raman 光 谱显示,DLC 膜为典型的非晶 DLC 膜。XPS 能谱显示,DLC 膜中的 sp³杂化键超过 70%。通过北京 HI-13 串 列加速器提供的系列重离子束测试研究 DLC 剥离膜的寿命。结果显示,松弛后的 DLC 剥离膜寿命约为松驰 前的 3 倍;对于⁶³Cu⁻和¹⁹⁷Au⁻离子束(加速电压~9 MV、低能端流强~1 μA),DLC 剥离膜寿命分别为碳弧碳 剥离膜寿命的 4 倍和 13 倍;对于¹⁰⁷Ag⁻、⁷⁰Ge⁻、⁴⁸Ti⁻、²⁸Si⁻和¹²⁷I⁻离子束,DLC 剥离膜寿命为碳弧碳剥离 膜寿命的 2.6~10.0 倍,并且离子越重、束流越强,DLC剥离膜的寿命对比碳弧碳剥离膜寿命的优势就越大; DLC剥离膜寿命与基衬偏压有一定关系,目前的测试结果显示,随基衬偏压的加大,剥离膜寿命呈现先升 高后降低的大概趋势,-400 V 左右的基衬偏压下DLC剥离膜寿命最长。

关键词:类金刚石碳;剥离膜;松弛;寿命

中图分类号: O484.1 文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC03

0 引言

北京HI-13串列加速器国家实验室是我国重要的核 物理实验基地之一,该加速器能否高效率地运行对我国 核物理基础研究的发展至关重要。近年来,由于核物理 实验的需求,在该加速器上引出越来越多的大流强低能 重离子束,对剥离膜的质量和寿命提出了更高要求。过 去使用碳弧法制备的普通碳剥离膜^[1],用于这些大流 强低能重离子的剥离时寿命太短,例如在遇到¹⁹⁷Au⁻离 子(加速电压 9~11 MV、低能端流强~1 µA)的剥离时寿 命为4~8 min, 而物理用户一个实验的束流时间通常为 100 h。加速器中安装的剥离膜数量有限,剥离膜的寿 命短, 直接导致物理实验供束不流畅, 并且缩短了加速 器的维护周期,进而降低了加速器运行效率,并提高了 加速器运行成本,同时也降低了物理实验的工作效率。 长寿命碳剥离膜的研究制备一直都是国际制靶行业研究 的热点和难点,在引出大流强低能重离子束时,国外许 多加速器实验室也遇到剥离膜寿命短的问题。为提高碳 剥离膜的寿命,国内外同行们开发了许多制备碳剥离膜 的技术,诸如接触火花法^[2]、电子轰击法^[3]、碳弧 法^[4-7]、离子束溅射法^[8-9]、裂解乙烯法^[10-11]、激光 刻蚀法^[12-14]和直流辉光溅射法^[15-17]等,试图找到更 有效的方法和工艺来制备长寿命的碳剥离膜。其中有不 少加速器实验室使用类金刚石碳(Diamond-Like Carbon, DLC)剥离膜代替普通碳剥离膜,在寿命上取得了较好 效果^[12-17]。

本文采用磁过滤阴极真空弧(Filtered Cathodic Vacuum Arc, FCVA)技术,结合碳弧技术和松弛技术,制 备质量厚度~5 µg/cm²的自支撑 DLC 剥离膜,测试分析 其表面形貌和微观结构,并通过北京 HI-13 串列加速 器提供的系列低能重离子束测试分析 DLC 剥离膜的 寿命。

1 实验装置和实验方法

采用磁过滤阴极真空弧技术,结合交流碳弧技术和 松弛技术,制备北京HI-13串列加速器所需的~5 μg/cm² 的自支撑 DLC 剥离膜。1 mm 厚的抛光镜面不锈钢片作 为镀膜基衬,甜菜碱作为脱膜剂。首先采用交流碳弧技 术沉积~1 μg/cm² 的普通碳膜作为脱膜剂的保护层,然

收稿日期: 2023-06-14; 修改日期: 2023-10-08

基金项目:国防科技工业抗辐照应用技术创新中心创新基金资助项目(KFZC2021020201);国家自然科学基金资助项目(11205251) 作者简介:樊启文(1980-),男,江西南昌人,正高级工程师,博士,从事核反应靶与剥离膜制备技术研究,E-mail:fanqiwen0926@163.com 后用双 90°弯管 FCVA 技术沉积~4 μg/cm²的 DLC 膜, 涂上一层薄火绵胶后在去离子水中进行脱膜处理,最后 转移固定至专用剥离膜支架上进行松弛和烘干处理。剥 离膜支架孔径为13 mm,即膜的原始尺寸为Φ13 mm, 松弛下拉 2 mm。

图 1 为碳弧装置示意图。该装置是由 DM-450A 镀 膜机改造而成,主要由传动部分、工件架、控厚系统、 电源和 DM-450A 镀膜机原真空主体构成。当转动工作 台上的手轮时,通过链条、齿轮和伞轮,使传动轴绕轴 线旋转,并带动滑动架在滑轨上移动,调节两碳电极间 的距离,达到起弧和断弧目的。用交流碳弧法制备碳保 护膜时,选择合适的电弧电流是十分重要的。电流太小, 不能引燃起弧或电弧只燃烧一瞬间就熄灭;电流太大, 使碳棒温度急剧上升,并导致大量碳颗粒飞溅而使膜层 产生大量针孔。研究测量了碳电极直径与电弧电流的对 应关系,列于表1。工作中,结合沉积碳膜的效果,选 择的碳棒直径为6 mm,电弧电流为90 A。镀膜厚度由 石英晶体膜厚监控仪在线监控。

图 2 为制备 DLC 膜的 FCVA 装置示意图,其核心 部件为弧源和双 90°磁过滤弯管过滤器,文献 [18] 中有 该装置的详细介绍。表2为FCVA法沉积DLC膜的最新工艺参数。镀膜厚度通过时间监控,图3为沉积时间与DLC膜厚度的关系,厚度随时间的增长近似线性增加。



表1 电极直径与电弧电流的对应关系

碳电极直径/mm	3	4	5	6	8	10
电弧电流/A	40	50	70	90	110	160



图 2 磁过滤阴极真空弧装置示意图

表 2	沉积DI	C膜的	工作参数
144	1/1/1/DL	へ近日	エドシ奴

弧流/A	弧压/V	偏转电压/V	偏转电流/A	基衬偏压/V	占空比	本底真空/Pa
80	28~33	24	1.6	-400	20%	4×10 ⁻⁴



2 均匀性测试与分析

本工作测试分析有效镀膜尺寸为100 mm×100 mm 范围内的DLC膜的均匀性,测试方法采用挂片镀膜天 平称重法。具体如下:1)在150 mm×150 mm×3 mm的 铝质基板上的100 mm×100 mm范围内通过数控机床均 匀分布地加工36个台阶孔(通孔直径为13 mm,台阶直 径为15 mm,孔间距为2 mm),如图4所示;2)在36个 基板台阶孔上安置Al箔(~10 µm),通过XP2U型千万 分之一精密电子天平(0.1 µg)测量沉积DLC膜前后的每 片Al箔的质量,并计算出每片DLC膜的质量厚度,最 后计算分布在 36 个台阶孔位置的 DLC 膜的均匀性,并 用此来表征 100 mm×100 mm 范围内的 DLC 膜均匀性。 测试数据列于表 3。由表 3 中数据可知: 1)在上述工艺 条件下,得到的 DLC 膜平均厚度为 6.7 μg/cm²,厚度分 布中间厚,周围薄,四边角位置的 DLC 膜最薄; 2)对 于在有效镀膜尺寸为 100 mm×100 mm 的基衬上沉积 DLC 膜,最大不均匀性为 14.9%,若考虑 Φ100 mm 的 范围 (即舍弃四角的四片 DLC 膜),则最大不均匀性为 8.82%。



表 3 DLC 膜均匀性的测试数据

	第一列	第二列	第三列	第四列	第五列	第六列	行平均
第一行	5.7	6.4	6.5	6.5	6.3	5.9	6.2
第二行	6.8	7.0	7.1	7.2	6.9	6.6	6.9
第三行	6.8	6.9	7.4	7.0	7.4	6.6	7.0
第四行	6.6	6.8	7.4	7.1	7.1	6.8	7.0
第五行	6.5	7.2	7.0	7.2	7.0	6.7	6.9
第六行	5.9	6.2	6.3	6.6	6.4	6.1	6.3
列平均	6.4	6.8	7.0	6.9	6.9	6.5	
总平均值: 6.7; 去除四角后的平均值: 6.8; 单位为µg/cm ²							

3 DLC 膜微观结构的测试分析

3.1 表面形貌

由于真空弧产生的等离子体中存在大颗粒或微 粒,这样直接沉积的碳膜性能大大降低,磁过滤器 能将大部分不带电的大颗粒过滤掉。首先对90°磁过 滤器的过滤效果进行了测试。分别在安装双90°磁过 滤弯管、单90°磁过滤弯管和不安装磁过滤弯管三种 情况下,在厚度为1mm的单晶Si片上进行DLC膜的 沉积试验。通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察过滤大颗粒的效果,如图5所 示。由图5可见,无磁过滤弯管时沉积的薄膜中含 有大量的碳颗粒;单90°磁过滤弯管时含有少量的碳 颗粒;双90°磁过滤弯管时,几乎没有大颗粒的污染。 因此,制备DLC剥离膜时,采用双90°磁过滤弯管进 行过滤。 · 494 ·



3.2 Raman 和 XPS 光谱分析

intensity/cps

Raman 光谱是在型号为 Nexus 670 的显微共焦 Raman 光谱仪上测试的,X射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)是在型号为AXIS ULTRA^{DLD} 的 XPS 谱仪上测定的。图 6 是在硅片上沉积的 DLC 膜 的可见光(波长为623.8 nm) Raman 光谱(a)和 ClsXPS 谱 图(b)。由图 6(a)可见,在1100~1900 cm⁻¹之间存在一 不对称的宽峰, Raman 谱图通过高斯分解为两个中心分 别位于 1 360.9 cm⁻¹ (D峰) 和 1 548.6 cm⁻¹ (G峰)(与单晶 石墨G峰相比,明显向低频方向漂移),D峰和G峰的 积分强度之比 I_0/I_G 为 0.78,这是典型的非晶 DLC 膜的 Raman 光谱 ^[19–20]。通过 Xps Peakfit 程序对实测 DLC 膜 的 ClsXPS 数据进行数据分峰拟合分析,结果显示 sp^3 键含量为 71.56%。



图 6 DLC 膜的 V-Raman 谱图 (a) 和 XPS 谱图 (b)

4 DLC 剥离膜寿命的测试分析

寿命通过北京 HI-13 串列加速器提供的离子束进行 测试。剥离膜寿命定义采用国际通用的,即在低能端入 射流强不变的条件下,经过头部剥离和加速后,像点处 离子束流强从开始照射到它下降 50% 的时间^[16]。图 7 为北京 HI-13 串列加速器示意图,本文研究测试的剥离 膜安装在第四段加速管与第五段加速管之间的第一剥离 器中,束流测量位置位于图中像点处。

第一次测试实验用¹⁹⁷Au⁻(加速高压~9 MV、低能 端流强~1 μA)离子束对松弛前后的DLC剥离膜寿命进 行测试,结果如图8所示。结果显示,松弛后的DLC 剥离膜寿命约为松驰前的3倍。

第二次实验用⁶³Cu⁻和¹⁹⁷Au⁻离子束对 DLC 剥离膜



图 7 测量剥离膜寿命的北京 HI-13 串列加速器示意图

300

和碳弧法制备的碳剥离膜寿命进行了测试,加速高压 为9 MV、低能端流强为1 μA,测试结果如图9所示。 结果显示,DLC剥离膜寿命分别为碳弧碳剥离膜寿命 的4 倍和13 倍。

第三次实验用¹⁰⁷Ag⁻、⁷⁰Ge⁻、⁴⁸Ti⁻、²⁸Si⁻、¹⁹⁷Au⁻和¹²⁷L⁻六种典型质量的离子束(头部高压和低能端流强见表4)对DLC剥离膜和碳弧法制备的碳剥离膜寿命进行了测试,在头部高压和流强(低能端)不变的条件下,寿命测试结果列于表4。从表4可看出,DLC剥离膜寿命为碳剥离膜寿命的2.6~10.0倍,对于流强越大和质量越重的离子束,二者寿命差别越大。





序数 离子种类 加速高压/MV 低能端流强 寿命/min 比较 剥离膜种类 碳弧碳膜 40 ¹⁰⁷Ag⁻ 2.8倍 1 11.7 160 nA 110 DLC 碳弧碳膜 94 ⁷⁰Ge⁻ 2 11.6 120 nA 2.6倍 DLC 244 碳弧碳膜 30 ⁴⁸Ti⁻ 2.9倍 3 10.9 250 nA DLC 88 碳弧碳膜 10 ²⁸Si⁻ 3.5倍 4 11.3 2.5 µA DLC 35 碳弧碳膜 2.5 ¹⁹⁷Au⁻ 10.0倍 5 11.7 1.1 µA DLC 25 碳弧碳膜 24 $127I^{-}$ 3.5倍 11.5 340 nA 6 DLC 84

表 4 剥离膜寿命测试结果

注: 表中比较项中的倍数是指DLC剥离膜寿命除以碳弧碳剥离膜寿命所得到的数值。

第四次测试实验用¹⁹⁷Au⁻离子束(加速高压~9 MV、 低能端流强~0.25 μA)对不同偏压制备的 DLC 剥离膜 寿命进行测试,结果如图 10 所示。从图 10 可以看出, DLC 剥离膜寿命与基衬偏压(碳离子能量)存在一定关 系,随基衬偏压的加大,剥离膜寿命呈现先升高后降 低的大概趋势,基衬偏压为-400 V 左右时 DLC 剥离膜

寿命达到峰值,这也是我们的工艺参数中基衬偏压选 择-400 V的原因。需要说明的是,由于测量时加速器 提供的束流时间的限制,本次只对每种条件制备的膜 测试了一片,从测试膜的数量来讲,存在统计意义上 的不确定性,因此,该测试结果为一个参考性的大概 趋势结果。



图 10 不同基衬偏压制备的 DLC 剥离膜寿命曲线

在剥离膜寿命的测试中,有一个普遍性的现象就是 像点处流强在开始时都呈现上升趋势,之后再逐步下降, 直到该剥离膜不能用了。流强开始时呈现上升趋势的原 因主要是:剥离膜制作中涂敷有一层火绵胶,刚开始随 着束流对剥离膜的照射通过,剥离膜因能量的沉积而逐 步升温,升温的过程一方面去除附在其上的火棉胶(有 机物)致使束流品质更好,另一方面升温过程也会修复 碳膜中微小的缺陷。之后束流逐步下降,其原因是随着 能量沉积至一定值后对碳膜逐步产生辐射损伤。

5 总结

采用"磁过滤阴极真空弧+交流碳弧+松弛"的复合 技术,研究制备了应用于北京HI-13串列加速器上的 ~5 µg/cm²的自支撑 DLC 剥离膜。通过 XP2U 电子天平 测试了 DLC 膜的均匀性。结果显示, Φ 100 mm 范围内 的DLC膜最大不均匀性为8.82%。通过扫描电子显微 镜(SEM)、Raman光谱仪和X射线光电子谱仪(XPS)测 试分析了 DLC 膜的微观结构。SEM 图显示双 90°弯管 过滤制备的 DLC 膜表面光滑,几乎没有大颗粒污染。 Raman 谱显示, DLC 膜为典型的非晶 DLC 膜, $I_{\rm D}/I_{\rm G}$ 为 0.78。XPS 谱显示, DLC 膜中 sp³ 键含量超过 70%。在 北京HI-13串列加速器上测试分析了剥离膜的寿命,结 果显示,对于¹⁹⁷Au⁻离子束(加速电压9~11 Mv、低能 端流强~1 μA),经过松弛后的DLC剥离膜寿命约为不 松驰的3倍;对于⁶³Cu⁻和¹⁹⁷Au⁻离子束(加速电压9~ 11 MV、低能端流强~1 uA), DLC 剥离膜寿命分别为碳 弧碳剥离膜的4倍和13倍;对于¹⁰⁷Ag⁻、⁷⁰Ge⁻、⁴⁸Ti⁻、 ²⁸Si⁻和¹²⁷I⁻离子束,DLC剥离膜寿命为碳弧碳剥离膜 的2.6~10.0倍,并且离子越重、束流越强,DLC剥离 膜的寿命对比碳弧碳剥离膜寿命的优势就越大; DLC 剥离膜寿命与基衬偏压有一定关系,随基衬偏压的加大, 剥离膜寿命呈现先升高后降低的大概趋势,-400 V左 右的基衬偏压下 DLC 剥离膜寿命最长。通过一系列研 究,研制的 DLC 剥离膜已完全代替传统碳弧法制备的 碳剥离膜,应用于北京 HI-13 串列加速器中,显著提高 了剥离膜的寿命,缩短了加速器的维护周期,进而提高 了加速器运行效率并降低了加速器运行成本,取得了良 好的效果。

参考文献:

- XU Guoji, LOU Meiling, ZHANG Gongxiang. Atomic Science and Technology, 1999(4): 368. (in Chinese) (许国基, 楼美玲, 张共祥, 原子能科学技术, 1999(4): 368.)
- [2] AVASTHI D K, JAIPAL, GARGARI S. Nucl Instr and Meth A, 1991, 303(1): 43.
- [3] ARMITAGE B H, HUGHES J D H, WHITMELL D S, et al. Nucl Instr and Meth, 1979, 167(1): 25.
- [4] SUGAI I, HATTORI T, MUTO H, et al. I. Nucl Instr and Meth A, 1989, 282(1): 164.
- [5] ZHANG Hongbin, LU Ziwei, XU Hushan, et al. Atomic Science and Technology, 2006(5): 599. (in Chinese) (张宏斌, 卢子伟, 徐瑚珊, 等. 原子能科学技术, 2006(5): 599.)
- [6] ZHANG Hongbin, LU Ziwei, XU Hushan, et al. Nuclear Technology, 2008(9): 689. (in Chinese)
 (张宏斌, 卢子伟, 徐瑚珊, 等. 核技术, 2008(9): 689.)
- [7] LIU Fengqiong, LU Ziwei, ZHANG Hongbin, et al. Nuclear Technology, 2019, 42(10): 5. (in Chinese)
 (刘凤琼, 卢子伟, 张宏斌, 等. 核技术, 2019, 42(10): 5.)
- [8] SUGAI I, OYAIZU M. Nucl Instr and Meth A, 1997, 397: 137.
- [9] SUGAI I, TAKEDA Y, Nucl Instr and Meth A, 2004, 521; 187.
- [10] TOLFREE D W L. Nucl Instr and Meth A, 1982, 200: 15.
- [11] XU Guoji, WANG Jing, LUO Xinghua, et al. Nucl Instr and Meth A, 1989, 282: 161.
- [12] DOLLINGER G. Nucl Instr and Meth A, 1991, 303: 50.
- [13] MAIER-KOMOR P, BERGMAIER A, DOLLINGER G, et al. Nucl Instr and Meth A, 1997, 397: 131.
- [14] MAIER-KOMOR P, DOLLINGER G, KOMER H J. Nucl Instr and Meth A, 1999, 438: 73.
- [15] LIECHTENSTEIN V K, IVKOVA T M, OLSHANSKI E D, et al. Nucl Instr and Meth A, 1997, 397: 140.
- [16] LIECHTENSTEIN V K, IVKOVA T M, OLSHANSKI E D, et al. Nucl Instr and Meth A, 1999, 438: 79.
- [17] LIECHTENSTEIN V K, IVKOVA T M, OLSHANSKI E D, et al. Nucl Instr and Meth A, 2006, 561: 120.
- [18] FAN Qiwen, DU Yinghui, ZHANG Rong, et al. Nucl Instr and Meth A, 2013, 708: 78.
- [19] AISENBERG S, CHABOT R. Journal of Appled Physics, 1971, 42: 2953.
- [20] HAN Jiecai, ZHU Jiaqi, MENG Songhe. Journal of Functional Materials and Devices. 2003.6, 9 (2): 118.

Preparation and Lifetime Research of Diamond-like Carbon Stripper Foil

FAN Qiwen¹⁾, MENG Bo, WANG Hua, ZHANG Rong

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The diamond-like carbon(DLC) stripper foils with ~5 μ g/cm² in thickness were produced by using the composite technology of the filtered cathodic vacuum arc(FCVA)- alternating current carbon arc(ACCA)-relaxation technique. The uniformity of the DLC foils were measured by the XP2U balance. The results show that the maximum inhomongeneity of DLC foils in the range of Φ 100 mm is 8.82%. The microstructure of the DLC foils were measured by the scanning electron microscopy(SEM), Raman spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy(XPS). The SEM images show that the DLC foils are smooth, and contain hardly droplets through the double 90° filters. The Raman spectrum indicates that the DLC foils are amorphous carbon films. The X-ray photoelectron spectrum indicates the sp³ bonds of the DLC foils exceed 70%. The irradiation lifetimes of the DLC stripper foils were tested with the heavy ion beams at the Beijing HI-13 Tandem Accelerator. The results indicate that the lifetime of the DLC stripper foils after relaxation is ~3 times of the DLC stripper foils before relaxation. The lifetime of DLC stripper foil is respectively 4 and 13 times of the carbon stripper foil for the ¹⁰⁷Ag⁻, ⁷⁰Ge⁻, ⁴⁸Ti⁻, ²⁸Si⁻ and ¹²⁷I⁻ ion beams. The heavier ions and the stronger beam current, the longer lifetime of DLC stripper foil compared with that of carbon stripper foil. The lifetime of the DLC stripper foils is related to the substrate bias voltage, and increases at first and then decreases with the increasing of the SUC stripper foils is related to the substrate bias voltage is -400 V.

Key words: diamond-like carbon; stripper foil; relaxation; lifetime

Received date: 14 Jun. 2023; Revised date: 08 Oct. 2023

Foundation item: Fund for Innovation Center of Radiation Application(KFZC2021020201); National Natural Science Foundation of China(11205251)

1) E-mail: fanqiwen0926@163.com