

文章编号: 1007-4627(2010)02-0223-05

低速高电荷态重离子在 C₆₀ 薄膜中引起的势效应研究*

付云翀^{1, 2, †}, 姚存峰^{1, 2}, 金运范¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了研究低速高电荷态离子在 C₆₀ 薄膜中引起的势效应, 用能量为 200 keV 的高电荷态 Xeⁿ⁺ ($n=3, 10, 13, 15, 17, 20, 22, 23$) 离子辐照了 C₆₀ 薄膜。用原子力显微镜 (AFM) 和 Raman 散射技术分析了辐照过程中高电荷态 Xeⁿ⁺ 离子所储存势能在 C₆₀ 薄膜中引起的效应, 即势效应。AFM 分析结果表明, 辐照 C₆₀ 薄膜的表面粗糙度随辐照 Xeⁿ⁺ 离子电荷态 (即势能) 的增加而减小, 揭示了势效应的存在。而 Raman 分析结果表明, 由于 Xe 离子的动能远大于其所储存的势能, 因此, 尽管有表面势效应的影响, 但在 Raman 分析的深度范围内, 弹性碰撞还是主导了 C₆₀ 薄膜的损伤过程。

关键词: 低速高电荷态离子; C₆₀ 薄膜; 势效应

中图分类号: O657.32; O571.33

文献标识码: A

1 引言

C₆₀ 分子具有笼形结构, 其分子点群为 I_h, 并具有五重对称性, 在 C₆₀ 分子中的碳原子杂化类型为 sp^{2, 28} 且有一定的 sp³ 性质, 其三维大 π 键共轭形成碳笼。笼形结构的 C₆₀ 分子占据 C₆₀ 晶体的格点位置并在常温下按面心立方 (fcc) 结构堆砌。C₆₀ 是碳团簇中最稳定的原子簇。以 C₆₀ 为代表的碳原子簇是一种新的物质形态, 其特殊的结构、奇异的性质和潜在的应用前景, 为物理、化学和材料科学等开辟了崭新的研究领域^[1, 2]。荷能离子与 C₆₀ 相互作用的研究, 或许涵盖了荷能离子与完整晶体和分子材料相互作用的基本特点^[3, 4], 因此, 是认识荷能离子与物质相互作用基本动力学过程和拓宽 C₆₀ 应用的基础。目前国内外已有不少荷能离子与 C₆₀ 分子相互作用的研究工作, 研究内容主要包括以核能损过程为主导的低能离子在 C₆₀ 中引起的弹性碰撞效应和以电子能损过程为主导的快重离子在 C₆₀ 中引起的强电子激发效应, 即荷能离子在 C₆₀ 中引

起的相变、新相的形成和非晶化^[5-8]。相比之下, 由于受实验条件的限制, 低速高电荷态离子与 C₆₀ 相互作用的研究工作甚少。然而, 由于近年来电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, 简称 ECR) 离子源和电子束离子阱 (electron beam ion trap) 的建成并投入使用, 为获得高电荷态离子束提供了基本条件, 因此, 有关低速高电荷态离子与 C₆₀ 相互作用的研究工作, 也正在发展成为国际上的一个研究热点^[9-11]。

本文利用能量为 200 keV 的高电荷态 Xeⁿ⁺ 离子辐照了 C₆₀ 薄膜, 用原子力显微镜 (AFM) 和 Raman 散射技术分析了高电荷态 Xeⁿ⁺ 离子所储存势能在 C₆₀ 薄膜中引起的效应, 即势效应。

2 实验方法

C₆₀ 薄膜是用固相真空蒸发法制备的, 所用 C₆₀ 样品是由阿法埃莎 (Alfa Aesar) 化学有限公司提供的纯度为 99.92% 的 C₆₀ 粉末, 固相蒸发前真空

* 收稿日期: 2009-09-02; 修改日期: 2009-09-17

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10175084, 10675150, 10835010); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB832902)

作者简介: 付云翀 (1982-), 男 (汉族), 云南昆明人, 硕士, 从事重离子与物质相互作用物理学研究;

E-mail: fuyunchong@impcas.ac.cn; fuyc@ieecas.cn

† 现在地址: 中国科学院地球环境研究所, 西安, 邮编 710075

(1.333×10^{-4} Pa) 300 °C 退火 12 h, 以去除 C_{60} 中的剩余有机物, 薄膜的衬底是 10 mm × 10 mm、厚度为 40 μm 的高纯 (99.99%) Al 箔, 固相蒸发是在 1.33×10^{-3} Pa 的真空和 450 °C 的温度条件下进行的, 这样制备的 C_{60} 薄膜的厚度约为 200 nm。

高电荷态 Xe^{n+} 离子辐照 C_{60} 薄膜的实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷离子实验平台上完成的。辐照过程中, 在保持束流动能不变 (200 keV) 的情况下, 通过改变电荷态, 改变 Xe^{n+} 离子所储存的势能。 Xe^{n+} 离子电荷态分别为 3+, 10+, 13+, 15+, 17+, 20+, 22+ 和 23+。辐照量分别为 5×10^{12} , 7×10^{12} , 1×10^{13} 和 2×10^{13} ions/cm²。更多的实验参数由表 1 给出, 200 keV Xe 离子在 C_{60} 薄膜中的电子能损 S_e 为 55.9 eV/Å, 核能损 S_n 为 181.8 eV/Å (由 TRIM 程序计算)。

表 1 高电荷态 Xe^{n+} 离子辐照 C_{60} 薄膜的实验参数

样品 分组	离子	动能 /keV	电荷态 $q+$	势能 /eV	势能动能比 $E_p/E_k(\%)$
1	Xe	200	3+	65.44	0.033
2	Xe	200	10+	790	0.400
3	Xe	200	13+	1551	0.776
4	Xe	200	15+	2208	1.104
5	Xe	200	17+	2985	1.493
6	Xe	200	20+	4548	2.274
7	Xe	200	22+	5814	2.907
8	Xe	200	23+	6513	3.257

高电荷 Xe 离子在 C_{60} 薄膜中的势效应是用 Raman 散射技术和 AFM 分析的。Raman 分析是在 JY-HR800 谱仪上进行的, 实验几何为背向散射, 分析过程中所用激发波的波长为 325 nm, 所对应的能量为 3.8 eV。AFM 分析是在 SPM-RTESP 上进行的, 测试过程中采用轻敲模式, 扫描范围为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。

3 实验结果及讨论

3.1 原子力显微镜的分析结果与讨论

能量为 200 keV 的高电荷态 Xe^{n+} 离子辐照 C_{60} 薄膜 (辐照量为 2×10^{13} ions/cm²) 的 AFM 形貌图和三维形貌图分别由图 1 和图 2 给出。两图中的 4

个分图相对应, 分别为未辐照、 Xe^{3+} 辐照、 Xe^{15+} 辐照和 Xe^{23+} 辐照结果。由图可见, C_{60} 薄膜的表面粗糙度的均方根 (RMS) 随着电荷态的增高逐渐降低, 并趋于平滑。为了进一步量化分析, 我们根据 AFM 的测试数据用如下公式

$$RMS = (Z_1, Z_2, \dots, Z_N) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z)^2}$$

计算了辐照样品的 RMS 值。公式中的 Z 是相对于 C_{60} 表面的平均高度, Z_i 是某一位置相对于样品表面的高度, N 是在扫描范围的扫描次数。由此得出的未辐照、 Xe^{3+} 离子辐照、 Xe^{15+} 离子辐照和 Xe^{23+} 离子辐照后 C_{60} 薄膜的表面粗糙度 (RMS) 分别为 10.61, 9.01, 7.97 和 6.54 nm。图 3 给出了辐照样品的表面粗糙度随电荷态的变化关系。显然, 随辐照 Xe 离子电荷态的增加, 辐照 C_{60} 表面的粗糙度单调地下降, 揭示了 C_{60} 表面粗糙度的入射离子电荷态相关性。这是由于随辐照 Xe 离子电荷态的增加, Xe 离子内所储存的势能单调地增加所至 (见表 1)。说明入射离子所储存的势能越大, 在 C_{60} 薄膜表面引起的势效应也越强。因此, C_{60} 表面粗糙度的入射离子电荷态相关性, 本质上是 C_{60} 表面粗糙度的入射离子所储存势能的相关性。这是由于高电荷态离子作用于固体表面时, 其强库仑势场的作用使炮弹离子可以在 fs 时间尺度和 nm 空间尺度沉积

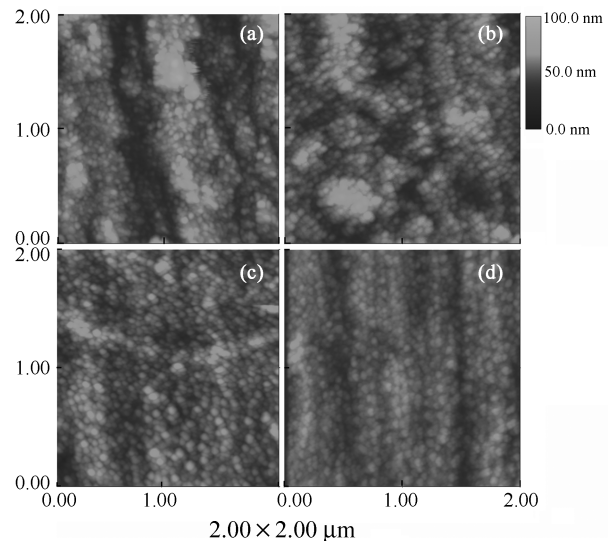


图 1 能量为 200 keV 的不同电荷态 Xe 离子辐照 C_{60} 薄膜至辐照量为 2×10^{13} ions/cm² 时的 AFM 形貌图 (a) 未辐照的 C_{60} 薄膜, (b) 辐照离子为 Xe^{3+} , (c) 辐照离子为 Xe^{15+} , (d) 辐照离子为 Xe^{23+} 。

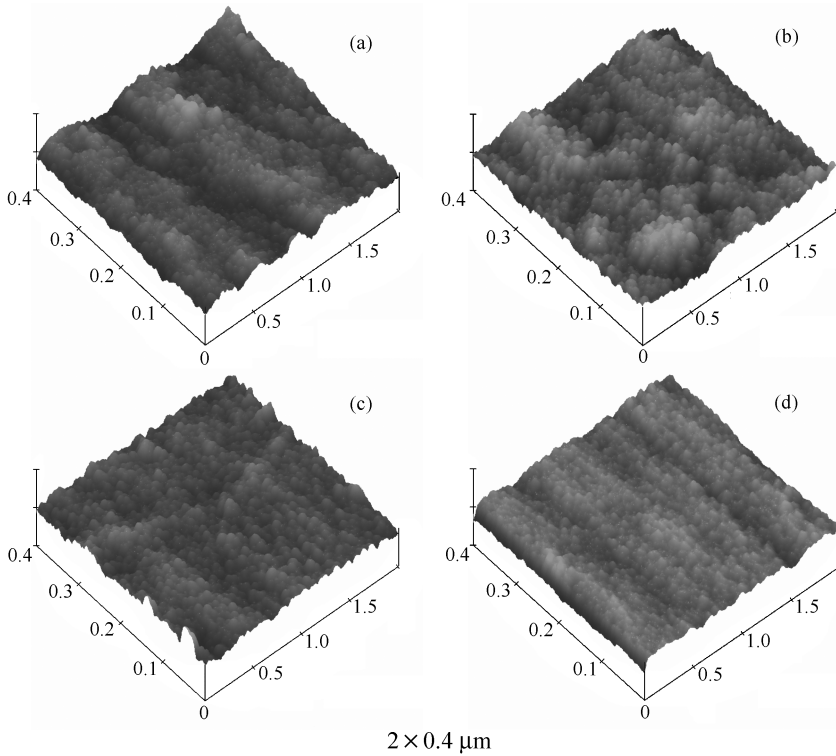


图 2 能量为 200 keV 的不同电荷态 Xe 离子辐照 C₆₀ 薄膜至辐照量为 2×10^{13} ions/cm² 时的三维 AFM 形貌图 (a) 未辐照的 C₆₀ 薄膜, (b) 辐照离子为 Xe³⁺, (c) 辐照离子为 Xe¹⁵⁺, (d) 辐照离子为 Xe²³⁺。

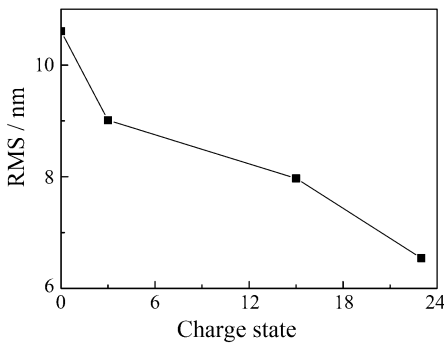


图 3 能量 200 keV 的不同电荷态 Xe 离子辐照 C₆₀ 薄膜至 2×10^{13} ions/cm² 时的表面粗糙度随 Xe 离子电荷态的变化关系

其所储存的势能, 从而使作用区域形成瞬间等离子体, 而等离子体的电子阻止本领要远远大于普通状态下物质的电子阻止本领^[12, 13]。这就直接导致了高电荷态离子引起强的势溅射^[14]。从而导致 C₆₀ 薄膜表面粗糙度的下降, 即逐渐平坦化。

3.2 Raman 谱的分析讨论

图 4 给出了能量为 200 keV, 不同电荷态 Xeⁿ⁺ 离子辐照 C₆₀ 薄膜至 5×10^{12} ions/cm² 的 Raman 谱,

Xe 离子电荷态分别为 Xe³⁺, Xe¹⁰⁺, Xe¹³⁺, Xe¹⁵⁺, Xe¹⁷⁺, Xe²⁰⁺, Xe²²⁺ 和 Xe²³⁺ (具体参数见表 1)。图中未辐照的 C₆₀ 薄膜有 10 个强度各异的 Raman 激活模 ($2A_g + 8H_g$)^[15]。其中, 最强峰同时也是 C₆₀ 的主要特征峰, 是位于 1469 cm^{-1} 处的 A_g(2) 激活模, 这个峰表征 C₆₀ 分子 12 个五边形环的对称、同时的伸缩振动, 这个峰的位置对 C₆₀ 分子的聚合和碱金属掺杂非常灵敏^[16, 17]。在未辐照 C₆₀ 薄膜 Raman 谱中, 位于 1435 和 1585 cm^{-1} 处有两个明

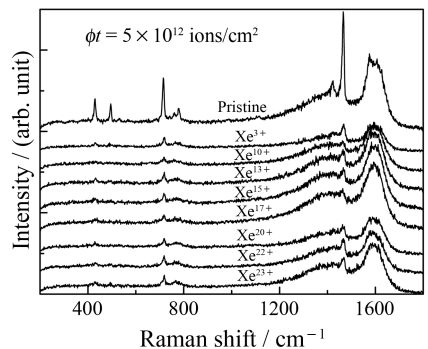


图 4 200 keV Xeⁿ⁺ ($n=3, 10, 13, 15, 17, 20, 22, 23$) 离子辐照 C₆₀ 薄膜至 5×10^{12} ions/cm² 时的 Raman 谱

显可见的宽峰,这两个峰是由 C_{60} 的 $H_g(7)$ (1427 cm^{-1}) 和 $H_g(8)$ (1578 cm^{-1}) 激活模分别与 C_{60} 薄膜中残留的无序态的碳 D (1435 cm^{-1}) 峰和石墨态的碳 G (1585 cm^{-1}) 峰叠加而成。不同电荷态 Xe^{n+} 离子辐照 C_{60} 薄膜的 Raman 谱与未辐照 C_{60} 薄膜的 Raman 谱有一定的差异,在相同辐照量下,随 Xe 离子电荷态的增加 C_{60} 分子遭破坏的程度趋于加重,但并不十分明显。这是由于随着电荷态的增加,入射离子所储存的势能也逐步增加。因此,在辐照过程中释放在靶原子系统的势能也逐步增加,导致 C_{60} 分子遭破坏的程度也趋于加重。

随 Xe 离子电荷态增加, C_{60} Raman 谱中特征峰减弱不十分明显的原因在于 Xe 离子所携带的动能 (200 keV) 远大于其所储存的势能。高电荷态 Xe 离子与 C_{60} 分子碰撞时,其储存的势能基本释放在 C_{60} 薄膜的表面。因此,在 Raman 分析深度范围内,更多地表现出的是 200 keV Xe 离子射程内的弹性碰撞所造成的损伤。

图 5 给出了 200 keV Xe^{23+} 离子辐照 C_{60} 薄膜至不同辐照量的 Raman 谱。从图中可以看出,辐照过的 C_{60} 薄膜的 Raman 谱与未辐照 C_{60} 薄膜的 Raman 谱有非常明显的差异。随着辐照量的增加,其特征峰的强度逐渐减弱,最后完全消失。说明 200 keV Xe^{23+} 离子辐照使 C_{60} 分子的 I_h 对称性降低,最后使处在 C_{60} 晶体点阵位置上的 C_{60} 分子完全被破

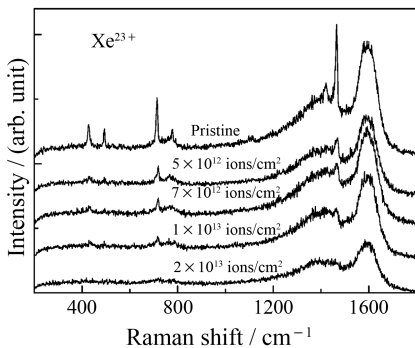


图 5 200 keV Xe^{23+} 离子辐照 C_{60} 薄膜至不同辐照量的 Raman 谱

坏。这与 170 keV B 离子辐照 C_{60} 薄膜的结果较为接近^[18],只是由于 Xe 离子在 C_{60} 薄膜中的核能损值远大于 B 离子在 C_{60} 薄膜中的核能损值(约为 100 倍),因此, Xe 离子在辐照量远远小于 B 离子辐照量时,对 C_{60} 分子造成的损伤就达到或超过了 B 离

子辐照引起的损伤水平。

3 结论

由上述 Xe^{n+} 离子辐照 C_{60} 薄膜的 AFM 和 Raman 分析结果可以得出如下结论:

(1) AFM 的分析结果表明,辐照 C_{60} 薄膜的表面粗糙度随着辐照 Xe^{n+} 离子电荷态(势能)的增加而单调地减小。揭示了势效应的存在。

(2) Raman 分析表明,随 Xe^{n+} 离子电荷态和辐照量的增加, C_{60} 薄膜遭损伤的程度日趋严重,但由于 Xe 离子的动能远大于其所储存的势能,因此,尽管有表面势效应的影响,但在 Raman 分析深度范围内,弹性碰撞还是主导了 C_{60} 薄膜的损伤过程。

致谢 作者感谢中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷离子实验平台的工作人员所提供的技术支持与帮助。

参考文献 (References):

- [1] Krätschmer W, Lamb L D, Fostiropoulos K, *et al.* Nature, 1990, **347**: 354.
- [2] Hebard A F, Roseinsky M J, Haddon R C, *et al.* Nature, 1991, **350**: 320.
- [3] Find D, Klett R, Szimkowiak P, *et al.* Nucl Instr & Meth, 1996, **B108**: 114.
- [4] Kastner J, Kuzmany H, Palmethofer L. Appl Phys Lett, 1994, **65**: 543.
- [5] Borisov A M, Mashkova E S. Nucl Instr & Meth, 2007, **B258**: 109.
- [6] Aumayr F, El-Said A S, Meissl W. Nucl Instr & Meth, 2008, **B266**: 2729.
- [7] Rhee J H, Byeongchul H, Sharma, Thin Solid Films, 2008, **517**: 522.
- [8] Saha S K, Chowdhury D P, Das S K, *et al.* Nucl Instr & Meth, 2006, **B243**: 277.
- [9] Murty M V R. Surf Sci, 2002, **500**: 523.
- [10] Schenkel T, Barnes A V, Hamza A V, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**: 4325.
- [11] Gillaspay J D, Parks D C, Ratliff L P. J Vac Sci Techn, 1998, **B80**: 3294.
- [12] Hoffmann D H H, Weyrich K, Wahl H, *et al.* Phys Rev, 1999, **A42**: 2313.
- [13] Aumayr F, Winter H P. Nucl Instr & Meth, 2005, **B233**: 111.
- [14] Aumayr F, Kurz H, Schneider D, *et al.* Phys Rev Lett,

- 1993, **71**: 1943.
- [15] Jin Yunfan, Yang Ru, Wang Yanbin, *et al.* Nuclear Physics Review, 2000, **17**(3): 134(in Chinese).
(金运范, 杨茹, 王衍斌等. 原子核物理评论, 2000, **17**(3): 134.)
- [16] Dresselhaus M S, Dresselhaus G, Eklund P C. J of Raman Spec, 1996, **27**: 351.
- [17] Jin Y F, Yao C F, Wang Z G, *et al.* Nucl Instr & Meth, 2005, **B230**: 565.
- [18] Fu Y C, Jin Y F, Yao C F, *et al.* Chin Phys Lett, 2009, **26**: 016101.

Studies of Slow Highly-charged Ion Irradiated C₆₀ Films^{*}

FU Yun-chong^{1, 2, 1), †} YAO Cun-feng^{1, 2} JIN Yun-fan¹

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to investigate the potential effect in the C₆₀ films induced by slow highly-charged ion (SHCI), the irradiation experiments of C₆₀ films were performed by using Xeⁿ⁺ ions ($n=3, 10, 13, 15, 17, 20, 22, 23$). The irradiated C₆₀ films were analyzed by means of AFM and Raman scattering. The analysis results indicated that the surface roughness of C₆₀ films irradiated is decreasing with the increase of the charge state of Xeⁿ⁺ ions (potential energy stored in Xeⁿ⁺ ions). This reveals the existing of the potential effect. The results of the Raman spectra showed that in despite of existing influence of potential effect, the damage process of C₆₀ films in the area for analysis depth of Raman is dominated by the elastic collisions, because the deposited potential energy of Xeⁿ⁺ ion in C₆₀ films is much less than its kinetic energy.

Key words: slow highly-charged ion; C₆₀ film; potential effect

* **Received date:** 2 Sep. 2009; **Revised date:** 17 Sep. 2009

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10175084, 10675150); Major State Basic Research Development Program of China(2010CB832902)

1) E-mail: fuyunchong@impcas.ac.cn & fuvcc@ieecas.cn

† **Present address:** Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075; China