

文章编号: 1007- 4627(2000)03-0134-06

# 荷能离子在 C<sub>60</sub> 薄膜中引起的辐照效应\*

金运范, 杨 茹<sup>#</sup>, 王衍斌, 刘昌龙, 刘 杰, 侯明东

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

姚江宏

(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要: 用 Raman 散射和 XPS 技术分析了能量为几百 keV 到几百 MeV 的多种离子在 C<sub>60</sub> 薄膜中引起的辐照效应. 分析结果表明, 在低能重离子辐照的 C<sub>60</sub> 薄膜中, 其晶态向非晶态的转变过程是由核碰撞主导的. 在快离子(120 keV 的 H 离子和 171.2 MeV 的 S 离子)辐照的情况下, 电子能损起主导作用. 发现在 H 离子辐照过程中, 电子能损有明显的退火效应, 致使 C<sub>60</sub> 由晶态向非晶态转变的过程中, 经历了一个石墨化的中间过程; 而在 S 离子辐照的情况下, 电子能损的破坏作用超过了退火效应, 因此, 在 C<sub>60</sub> 由晶态向非晶态转变的过程中, 无石墨化的中间过程.

关键词: 辐照效应; C<sub>60</sub> 薄膜; 荷能离子; 退火效应

中图分类号: O483 文献标识码: A

## 1 引言

荷能离子穿过固体材料时, 主要通过两种几乎独立的相互作用过程损失其携带的能量, 即与靶原子核之间的弹性碰撞(核能损  $(dE/dX)_n$ ) 和与靶电子之间的非弹性碰撞(电子能损  $(dE/dX)_e$ ), 前者引起靶原子移位, 后者则引起靶电子的激发和电离. 能量小于 0.1 MeV/u 的低能重离子主要通过与靶核的弹性碰撞损失能量, 因此, 低能重离子在固体材料中引起的效应主要是由核能损引起的; 而能量为 0.1-300 MeV/u 的快重离子主要是通过与靶电子相互作用而损失能量, 具有很高的电子能损 ( $S_e \approx \text{keV}/\text{\AA}$ ), 而且, 在除核阻止区以外长达几百  $\mu\text{m}$  甚至 mm 量级的离子路径上, 电子能损起主导作用 ( $S_e/S_n \approx 10^3$ ), 因此, 快重离子在固体材料中引起的效应, 本质上是强电子激发引起的效应<sup>[1,2]</sup>.

C<sub>60</sub> 是碳团簇中最稳定的原子簇, 笼状结构的 C<sub>60</sub> 分子占据 C<sub>60</sub> 晶体的格点位置, 并在常温下按面心立方结构堆砌. 以 C<sub>60</sub> 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<sup>[3]</sup>. 荷能重离子在 C<sub>60</sub> 中辐照效应的研究, 或许涵盖了荷能重离子在完整晶体和高分子材料中辐照效应的基本特点, 因此, 是认识荷能重离子与凝聚态物质相互作用的基本规律和开发 C<sub>60</sub> 应用的基础.

以 C<sub>60</sub> 为代表的团簇材料的荷能离子辐照效应研究是最近几年才开始的<sup>[4-7]</sup>, 而且多为低能离子辐照或注入的工作, 涉及快重离子强电子激发效应的研究工作甚少, 也还没有触及到荷能重离子辐照引起 C<sub>60</sub> 分子(或晶体)损伤的基本动力学过程. 业已取得的实验结果又存在很大的分歧. J. Kastner 等人认为荷能离子辐照引起 C<sub>60</sub> 由晶态向非晶态的转变, 完全是由核能损引起的, 电子能损只能引起 C<sub>60</sub> 的聚合<sup>[8]</sup>. 而 F. C. Zawislak 等人则认为核能损和电子能损共同破坏了 C<sub>60</sub> 分子<sup>[9]</sup>. 由此可见, 团簇材料的荷能离子辐照效应, 特别是强电子激发效应的研究, 在国际上仍处于起步阶段. 因此, 大量的实验现象有待于系统地揭示. 相互作用物理有待于进一步认识, 在此基础上才能建立描述这一损伤过

\* 收稿日期: 2000-04-01

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19675054); 中国科学院基础性研究重点项目(KJ952-S1-423)

作者简介: 金运范(1941-), 男(汉族), 甘肃兰州人, 研究员, 博士生导师, 从事快重离子与物质相互作用物理学研究.

<sup>#</sup> 现在地址: 北京师范大学低能核物理所, 北京 100875

程的物理模型, 进而有效地开发和拓广团簇材料的应用.

为了研究 C<sub>60</sub>分子乃至 C<sub>60</sub>晶体在荷能离子辐照下的结构稳定性, 我们用能量为 120 keV 的 H, He, N, Ar, Fe 和 Mo 离子, 240 和 360 keV 的 Ar 离子, 以及 171.2, 125.3 和 75.8 MeV 的 S 离子, 辐照了真空蒸发在抛光单晶硅片和 Al 箔上的 C<sub>60</sub>薄膜, 用 Raman(拉曼)散射和 XPS(X 射线光电子谱)技术分析了荷能离子在 C<sub>60</sub>薄膜中引起的辐照效应, 即由晶态向非晶态的转变, 并对非晶化过程做了试验性解释.

## 2 实验过程

5 × 20 mm<sup>2</sup> 的 C<sub>60</sub>薄膜是用真空(10<sup>-3</sup> Pa)蒸发方法制备的. 用 S 离子辐照时, C<sub>60</sub>薄膜的衬底是 15 μm 厚的 Al 箔, 辐照中采用堆叠试样方式, 堆叠试样的总厚度(包括 Al 箔的厚度)小于 S 离子在其中的投影射程, 以避免离子射程末端的注入效应的影响. 用 H 和 He 离子辐照时, C<sub>60</sub>薄膜的衬底是单晶硅片, 膜的厚度略小于 H 和 He 离子在 C<sub>60</sub>中的投影射程. 其它离子辐照 C<sub>60</sub>薄膜的厚度与辐照离子在膜中的投影射程相当. 120 keV 的 H, He, N, Ar, Fe 和 Mo 离子, 以及 240 和 360 keV 的 Ar 离子是由中国科学院近代物理研究所的小型重离子加速器提供的, 171.2 MeV 的 S 离子是由兰州重离子加速器(HIRFL)提供的. 辐照期间样品托的温度通过循环水冷却保持在 50 °C 以下, 辐照离子的选择考虑了它们在 C<sub>60</sub>薄膜中的核能损大于电子能损(Fe 和 Mo 离子)、核能损近似等于电子能损(Ar 离子)和核能损远小于电子能损(H, He 和 S 离子)3 种情况, 辐照量在 1 × 10<sup>12</sup>–5 × 10<sup>17</sup> ions/cm<sup>2</sup> 之间, 辐照期间平均流密度不大于 0.5 μA/cm<sup>2</sup>, 以避免热效应的影响. 辐照样品的背散射拉曼谱分析是在 SPEX-1403 型拉曼谱仪上完成的, 谱仪使用 Ar 离子激光器, 激光波长为 514.5 nm, 对应的能量为 2.412 eV, 测量过程中激光器的功率选取 300 和 20 mW 两种情况, 谱仪的分辨率为 0.15 cm<sup>-1</sup>. 对测得的背散射拉曼谱进行了数据化处理和计算机拟合. 在 XPS 分析中, 谱仪所用的 X 射线是 Al 的 Kα 线, 其能量为 1486.6 eV, 记录了碳原子 1s 态的光电子谱.

## 3 结果和讨论

### 3.1 拉曼谱分析

在谱仪激光器功率为 20 mW 的情况下, 未辐照 C<sub>60</sub>样品的拉曼谱中的最强特征峰位于 1469 cm<sup>-1</sup>处, 这是 C<sub>60</sub>的 A<sub>g</sub> 振动模, 为 C<sub>60</sub>分子的主要特征峰. 而在激光器功率为 300 mW 的情况下, 未辐照 C<sub>60</sub>样品的最强特征峰移动到 1460 cm<sup>-1</sup>处. C<sub>60</sub>主要特征峰峰位的移动是由于 C<sub>60</sub>在强激光的照射下发生聚合或光电转换, 形成了光电转换-C<sub>60</sub>, 它的主要特征峰位于 1460 cm<sup>-1</sup>处<sup>[10]</sup>.

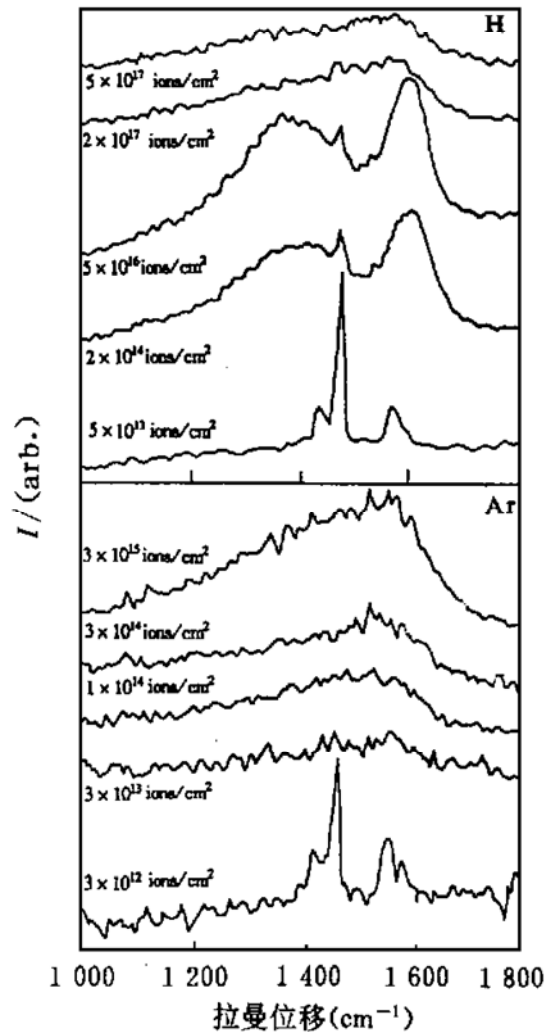


图 1 120 keV 的 H 和 Ar 离子辐照 C<sub>60</sub>薄膜的拉曼谱

图 1 是谱仪激光器功率为 300 mW 的情况下, 能量为 120 keV 的 H 和 Ar 离子辐照 C<sub>60</sub>薄膜的拉曼谱, 其共同特点是随着辐照量的增加, 表征 C<sub>60</sub>的特征峰 1460 cm<sup>-1</sup>的强度(I)逐渐减弱, 最后在 1200–1700 cm<sup>-1</sup>之间出现了一个表征非晶碳的宽带. 其它离子辐照 C<sub>60</sub>的拉曼谱均有类似的变化. 由此可以看出, 尽管 H, Ar 和其它离子的原子序数和原子量相差很大, 它们在 C<sub>60</sub>中的 S<sub>e</sub>, S<sub>n</sub> 和 S<sub>e</sub>/S<sub>n</sub>

的值也相差甚远(见表 1),但在这些离子的辐照下, C<sub>60</sub>薄膜中都发生了由晶态向非晶态的转变. 通常非晶碳是由无序态的碳(拉曼谱中位于 1 355 cm<sup>-1</sup>处的 D 峰)和石墨态的碳(拉曼谱中位于 1 580 cm<sup>-1</sup>处的 G 峰)构成,因此,本文用三分量——无序态的碳、石墨态的碳和 C<sub>60</sub>,即 D 峰、G 峰和剩余 C<sub>60</sub>的特征峰拟合了辐照 C<sub>60</sub>样品的拉曼谱,得到了辐照样品中碳的 3 种同素异构体的相对含量及其随辐照量和(或)电子能损的变化.

表 1 H, He, N, Ar, Fe, Mo 和 S 离子在 C<sub>60</sub> 薄膜中的 S<sub>e</sub>, S<sub>n</sub>和 S<sub>e</sub>/S<sub>n</sub> 的值

离子	E/keV	S <sub>n</sub> /(MeV·μm <sup>-1</sup> )	S <sub>e</sub> /(MeV·μm <sup>-1</sup> )	S <sub>e</sub> /S <sub>n</sub>
H	120	0.206×10 <sup>-3</sup>	0.161	782
He	120	0.270×10 <sup>-2</sup>	0.290	107
N	120	0.680×10 <sup>-1</sup>	0.537	7.89
Ar	120	0.559	0.608	1.09
Fe	120	1.02	0.45	0.44
Mo	120	1.94	0.46	0.24
S	171.2×10 <sup>3</sup>	1.75×10 <sup>-3</sup>	3.02	1 730
S	125.3×10 <sup>3</sup>	2.40×10 <sup>-3</sup>	3.50	1 460
S	75.8×10 <sup>3</sup>	3.93×10 <sup>-3</sup>	3.92	1 000

由图 1(a)可见, H 离子辐照 C<sub>60</sub>样品的拉曼谱与 Ar 离子辐照 C<sub>60</sub>样品的拉曼谱也有显著的不同. 在辐照量为 2×10<sup>14</sup>–5×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> 之间,其拉曼谱的 D 峰和 G 峰能清晰地分开,而且 D 峰和 G 峰的峰位也分别移动到 1 380 和 1 600 cm<sup>-1</sup>处. D 峰的出现是小的石墨微晶存在的显著标志, G 峰则为大的石墨单晶的拉曼谱; D 峰与 G 峰的漂移与碳膜中 sp<sup>3</sup> 和 sp<sup>2</sup> 杂化碳键角的无序程度、石墨化程度、晶体相体积的大小和内应力的大小有关<sup>[11]</sup>. 谱中的 D 峰和 G 峰向高位移方向移动,表明膜中石墨化程度的增加. 由此可以肯定,当 H 离子的辐照量在 2×10<sup>14</sup>和 5×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> 之间时,辐照 C<sub>60</sub>样品发生了由晶态 C<sub>60</sub>部分向石墨态的转变,辐照后的样品中产生了大量的 sp<sup>2</sup> 杂化碳的成分. 当辐照量继续增加到 2×10<sup>17</sup>–5×10<sup>17</sup> ions/cm<sup>2</sup> 时, D 峰和 G 峰又向低位移方向移动,说明石墨态因 H 离子的继续辐照而失去了有序结构,发生了由石墨态向非晶碳的转变.

H 离子与 Ar 和其它离子辐照 C<sub>60</sub>样品的拉曼谱存在显著不同的原因在于 H 离子在 C<sub>60</sub>样品中的电子能损为核能损的 782 倍,因此,电子能损主导了 H 离子辐照引起的损伤过程. 按照电子能损的热峰模型<sup>[12]</sup>, H 离子使 C<sub>60</sub>中的碳原子高度激发和电离,高激发电子的电子-电子相互作用和电子-声子相互作用将其能量转移给晶格,使晶体的局域温度陡然升高, C 原子的热运动变得非常剧烈,致使 C–C 化学键断裂,造成分子结构乃至晶体结构的破坏. 同时,由于高温下的退火效应,使得辐照产生非晶碳的结晶化程度提高,这里表现为拉曼谱中 D 峰和 G 峰向高频端移动,即石墨化过程. 另外,辐照量在 2×10<sup>14</sup>–5×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup> 之间的 C<sub>60</sub>样品的拉曼谱,与经退火处理的非晶碳的拉曼谱极为相似<sup>[13]</sup>(见图 2),也证明了电子能损在 C<sub>60</sub>损伤过程中的退火效应. 而当辐照量继续增加到 2×10<sup>17</sup>–5×10<sup>17</sup> ions/cm<sup>2</sup> 时,电子能损的破坏作用超过了退火效应, G 峰不再与 D 峰分离, C<sub>60</sub>的非晶化发生.

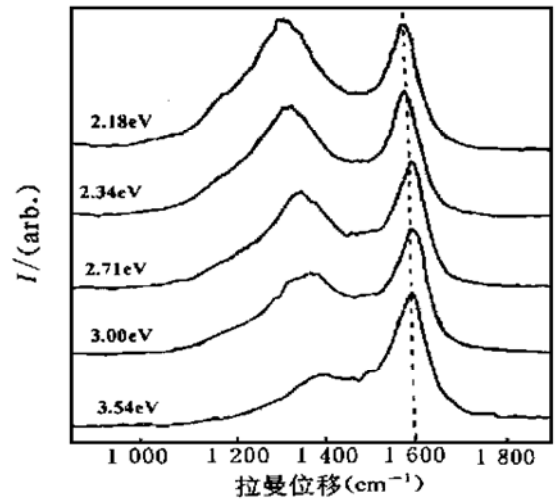


图 2 600 °C 退火非晶碳的拉曼谱<sup>[13]</sup>

对 Ar 和其它离子辐照的情况,其拉曼谱的 G 峰与 D 峰无明显分离,即辐照引起 C<sub>60</sub>由晶态向非晶态转变过程中,无石墨化的中间过程.

Fe 和 Mo 离子在 C<sub>60</sub>中的核能损比电子能损大 1 倍,核能损主导了损伤过程. 核碰撞过程中,荷能离子直接将 C<sub>60</sub>中的碳原子击出,破坏了 C<sub>60</sub>分子进而也破坏了 C<sub>60</sub>晶体.

尽管 N 和 Ar 离子在 C<sub>60</sub>中的电子能损比核能损略大或相当,但仍没有发现由电子能损引起的退火效应,说明在电子能损与核能损相当,甚至比核

能损大很多的情况下,核能损仍然主导 C<sub>60</sub>的非晶化过程. 这个结果支持 D. Fink<sup>[4]</sup>给出的损伤产额  $Y_d \propto D_e + fD_n$  的关系, 关系式中的  $D_e$  和  $D_n$  分别为电子和核能量沉积密度,  $f$  因子的值很大, 约在 300 左右. 由此可见, 除 H 离子外, 所用低能离子辐照 C<sub>60</sub>的非晶化过程都是由核能损主导的. 但是, 就是在这种情况下, 电子能损仍然影响 C<sub>60</sub>的结构, 主要表现在低能离子低辐照量情况下, 即在 C<sub>60</sub>薄膜还没有明显非晶化之前, 谱图中表征 C<sub>60</sub>的最强的特征峰  $1469\text{ cm}^{-1}$  “红移”到  $1460\text{ cm}^{-1}$  处. 这与在测量过程中谱仪使用激光功率为 300 mW 的情况下, 在未辐照样品种中所观察到的现象很类似. 说明低能离子低辐照量和强激光照射都能使 C<sub>60</sub>薄膜发生聚合, 形成光电转换-C<sub>60</sub>.

图 3 给出了几种离子辐照下,  $1460\text{ cm}^{-1}$  峰的相对强度 ( $I_{1460}$ ) 随辐照量  $D$  的变化关系<sup>[14]</sup>. 从图 3 看出, 在低辐照量下,  $I_{1460}$  随辐照量的增加而增大, 达到极大值后, 随辐照量的继续增加而降低, 而且, 对于所有的辐照离子  $I_{1460}$  的变化都遵从这个规律.

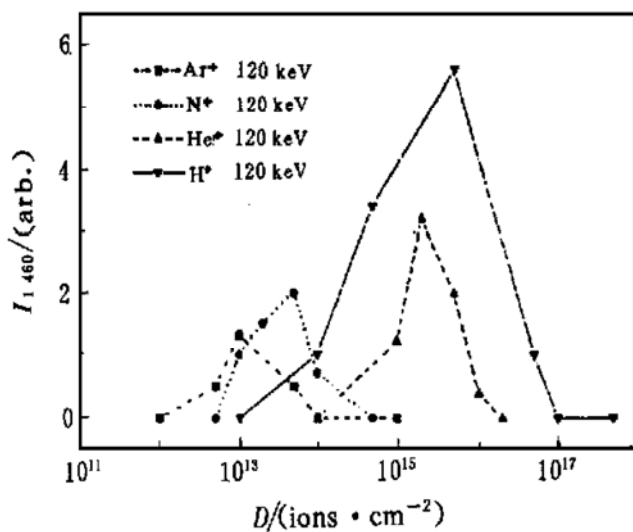
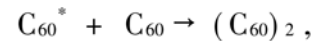


图 3  $1460\text{ cm}^{-1}$  峰的强度随辐照量的变化<sup>[14]</sup>

对于不同的辐照离子,  $I_{1460}$  达到极大值时所对应的辐照量是不同的, 辐照离子愈轻,  $I_{1460}$  达到极大时所对应的辐照量愈大,  $I_{1460}$  的数值也愈大. 由于在强激光或等离子体轰击下, C<sub>60</sub>分子的拉曼谱中五边形伸缩模 A(g) 的频率会从  $1469\text{ cm}^{-1}$  移动到  $1460\text{ cm}^{-1}$ , 发生 C<sub>60</sub>分子的聚合, 因此  $1460\text{ cm}^{-1}$  峰的出现常常被认为是 C<sub>60</sub>分子发生聚合的重要标志<sup>[15, 16]</sup>. 由此可以得出, 低辐照量的离子辐照会使 C<sub>60</sub>分子发生聚合的结论. 低辐照量的离子辐照会因离子-电子相互作用激发 C<sub>60</sub>分子, 由于 C<sub>60</sub>分子的三重激

发态为亚稳态, 具有较长的寿命, 因此, 一旦电子处于这一激发态, 就有可能与其邻近的基态分子进行环加成光化学反应, 形成二聚物, 即



其中  $\text{C}_{60}^*$  表示处于激发态的 C<sub>60</sub>分子, C<sub>60</sub>分子的聚合是辐照离子与 C<sub>60</sub>分子中的电子相互作用的结果, 它与碰撞过程中的电子能损密切相关. 随着辐照量的进一步增加, C<sub>60</sub>分子被破坏成非晶碳的程度加剧, 非晶碳峰掩盖了  $1460\text{ cm}^{-1}$  峰.

图 4 为快 S 离子辐照到量达到  $5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 时 C<sub>60</sub>薄膜的拉曼谱. 从图 4 看出, 拉曼谱的形状随 S 离子能量的降低(电子能损的增加)而变化, 在 S 离子能量为 171.2 MeV 的情况下, 其谱图为具有少量剩余 C<sub>60</sub>的非晶碳的拉曼谱, 而在离子能量为 125.3 和 75.8 MeV 的情况下, 则变为完全非晶碳的谱图. 其拉曼谱的 G 与 D 峰无明显分离, 即在快 S 离子辐照引起 C<sub>60</sub>由晶态向非晶态转变过程中, 无石墨化的中间过程. 这是由于 S 离子的电子能损比 H 离子的电子能损大 20 倍, 在单次或少数几次碰撞中, 转移到 C<sub>60</sub>电子系统的能量足以破坏 C<sub>60</sub>分子乃至 C<sub>60</sub>晶体, 电子能损的破坏作用远远超过了电子能损的退火效应, 因此, 没有石墨化的中间过程.

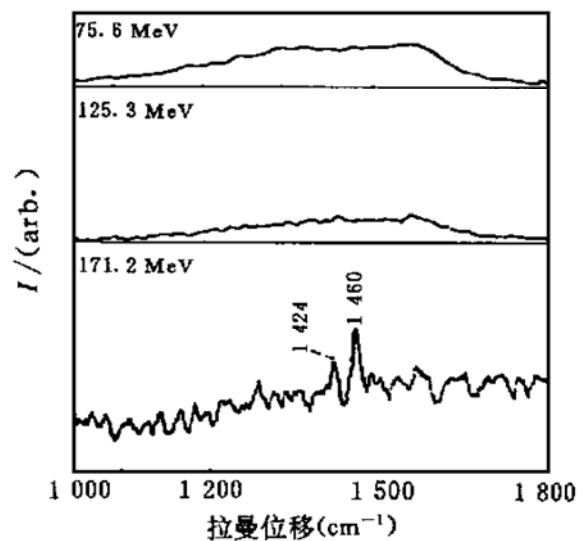


图 4 不同能量的快 S<sup>9+</sup> 离子辐照 C<sub>60</sub>薄膜的拉曼谱

### 3.2 XPS 分析

图 5 和表 2 给出了 Mo 离子辐照 C<sub>60</sub>样品的 XPS 分析结果. C<sub>60</sub>样品的 C<sub>1s</sub>态光电子峰位于 284.9 eV 处, 随着 Mo 离子辐照量的增加, 光电子峰逐渐

向低能端移动, 已知  $sp^2$  杂化的  $C_{1s}$  电子的结合能为 284.2 eV, 因此光电子峰的低移说明  $sp^2$  杂化碳成分或晶态含量的增加. 我们用两个分别表征  $C_{60}$  和  $sp^2$  碳的 284.9 和 284.2 eV 的  $C_{1s}$  光电子峰拟合了 XPS 的测量结果(见表 2). 从表 2 看出, 随着辐照量的增加  $C_{60}$  分子中碳原子  $sp^{2.28}$  杂化键逐步破坏, 形成了大量的  $sp^2$  成分, 因此, 可以用  $sp^2$  杂化的含量表征  $C_{60}$  遭破坏的程度, 这与拉曼谱分析结果(表 3) 基本一致, 但在 XPS 中  $C_{60}$  的含量稍大于拉曼谱中  $C_{60}$  的含量, 这是因为在 XPS 分析中被破坏的  $C_{60}$  分子中, 仍有 C 原子保留着原有的  $sp^{2.28}$  杂化键的结构, 这部分 C 对 XPS 谱中 284.9 eV 的光电子峰仍有贡献, 但在拉曼谱中却贡献于无定型碳.

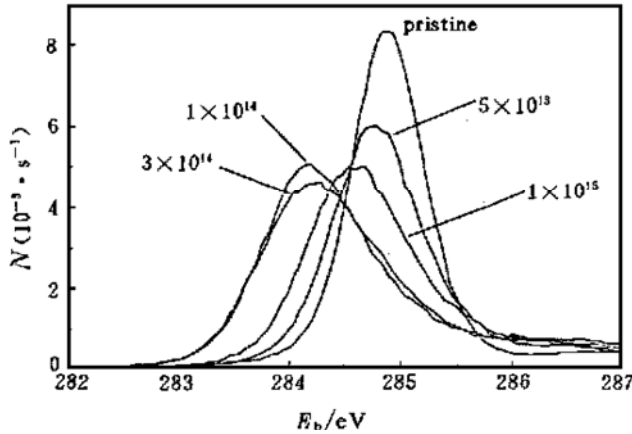


图 5 120 keV Mo 离子辐照  $C_{60}$  薄膜的 XPS 谱

表 2 Mo 离子辐照  $C_{60}$  薄膜的 XPS 结果

照射量 $I / (\text{ions} \cdot \text{cm}^{-2})$	$C_{1s}$ 光电峰	
	284.2 eV	284.9 eV
$1 \times 10^{13}$	0	100
$5 \times 10^{13}$	69.5%	30.5%
$1 \times 10^{14}$	80.2%	19.8%
$3 \times 10^{14}$	87.4%	12.6%

表 3 Mo 离子辐照  $C_{60}$  薄膜的拉曼谱结果

照射量 $I / (\text{ions} \cdot \text{cm}^{-2})$	峰贡献		
	$C_{60}$ 峰	D 峰	G 峰
$1 \times 10^{13}$	-	-	-
$5 \times 10^{13}$	15.3%	64.1%	20.6%
$1 \times 10^{14}$	10.5%	67.8%	21.7%
$3 \times 10^{14}$	5.0%	76.5%	18.5%

参 考 文 献:

[1] Klaumunzer S, Schumacher G. Dramatic Growth of Glassy  $Pd_{80}Si_{20}$  during Heavy Ion Irradiation [J]. Phys Rev Lett,

在快 S 离子辐照的情况下, 强电子激发效应主导  $C_{60}$  非晶化的过程, 也可以从 XPS 谱(见图 6) 上清楚地看出. 显然, 辐照  $C_{60}$  样品的  $C_{1s}$  峰随 S 离子能量的降低或电子能损的增加, 向低能方向移动, 这个移动表明  $C_{1s}$  态结合能( $E_b$ ) 的降低, 即  $sp^{2.28}$  键的破坏, 或  $sp^2$  键的建立. 换句话说,  $C_{60}$  由晶态向非晶态转变的程度随电子能损的增加而增加.

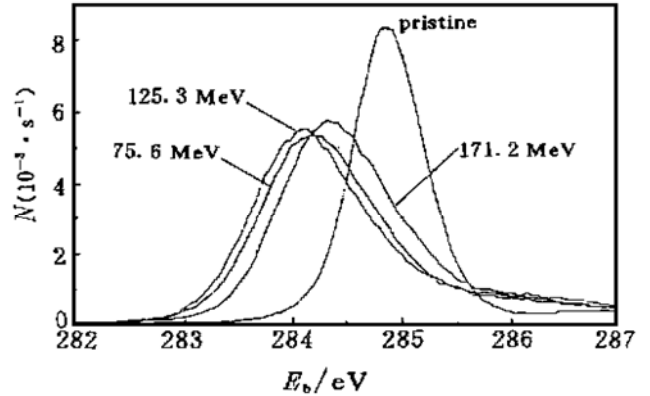


图 6 快 S 离子辐照  $C_{60}$  薄膜的 XPS 谱

4 结 论

根据以上实验结果的分析 and 讨论可以得出如下结论:

(1) 120 keV H 离子辐照  $C_{60}$  薄膜的损伤过程为由晶态  $C_{60}$  经中间石墨化过程向非晶碳的转变, 在这个过程中, 电子能损起主导作用, 石墨化的中间过程是由电子能损的退火效应引起的.

(2) Ar, Fe 和 Mo 等低能重离子辐照  $C_{60}$  薄膜的损伤过程为由晶态  $C_{60}$  向非晶碳的转变, 无石墨化的中间过程, 在这个过程中核能损起主导作用, 但在低辐照量的情况下, 电子能损引起  $C_{60}$  分子的聚合仍然是很明显的.

(3) 快 S 离子辐照  $C_{60}$  薄膜的损伤过程为由晶态  $C_{60}$  向非晶碳的转变, 在这个过程中电子能损的破坏作用超过了退火效应, 无石墨化的中间过程.

致谢 作者对为本实验提供束流的兰州重离子加速器(HIRFL) 和 IMP 小型重离子加速器的运行人员表示衷心的感谢.

1983, 51: 1 987- 1 990.

[ 2 ] Dammak H, Dunlop A, Lesueur D et al. Phase

- Transformation Induced by Swift Heavy Ion Irradiation of Pure Metal [J]. Nucl Instr & Meth, 1996, B107: 204–211.
- [3] Kratschmer W, Lamb L D, Fostiropoulos K *et al.* Solid C<sub>60</sub>: A new form of carbon [J]. Nature, 1990, 347: 354–358.
- [4] Fink D, Klett R, Szimkoviak P *et al.* Ion Beam Radiation Damage of Thin Fullerene Film [J]. Nucl Instr & Meth, 1996, B108: 114–124.
- [5] 金运范, 杨茹, 姚江宏等. 快离子在 C<sub>60</sub>薄膜中电子能损效应 [J]. 科学通报, 1999, 44(20): 2150–2153.
- [6] Jin Yunfan, Yang Ru, Yao Jianghong *et al.* Investigation of the Strong Electronic Excitation Effect in Fullerite Films Induced by Swift Ions [J]. Nucl Instr & Meth, 2000, 164–165: 391–395.
- [7] 金运范, 杨茹, 姚江宏等. 低能离子在 C<sub>60</sub>薄膜中引起的辐照效应 [J]. 高能物理与核物理, 2000, 24(1): 82–86.
- [8] Kastner J, Kuzmany H, Palmetshofer L. Damage and Polymerization by Ion Bombardment of C<sub>60</sub> [J]. Appl Phys Lett, 1994, 65(5): 543–545.
- [9] Zawislak F C, Baptista D L, Behar M *et al.* Damage of Ion Irradiated C<sub>60</sub> Films [J]. Nucl Instr & Meth, 1999, B149: 336–343.
- [10] Sauvajol J L, Brocard F, Hricha Z *et al.* Raman Spectroscopy of C<sub>60</sub> Solid Films [J]. Phys Rev, 1995, B52: 14 839–14 849.
- [11] Dillon R O, Woollam J A, Katkanant V. Use of Raman Scattering to Investigate Disorder and Crystallite Formation in as-Deposited and Annealed Carbon Films [J]. Phys Rev, 1984, B29: 3 482–3 489.
- [12] Toulemonde M, Dufour C, Paumier E *et al.* Transient Thermal Process after a High Energy Heavy Ion Irradiation of Amorphous Metals and Semiconductors [J]. Phys Rev, 1992, 46: 14 362–14 369.
- [13] Ramsteiner M, Wagner J. Resonant Raman Scattering of Hydrogenated Amorphous Carbon: Evidence for  $\pi$ -bonded carbon clusters [J]. Appl Phys Lett, 1987, 51: 1 355–1 357.
- [14] 姚江宏, 邹云娟, 杨茹等. 离子注入对 C<sub>60</sub>结构的影响 [J]. 物理学报, 1999, 48(7): 1 269–1 274.
- [15] Menon M, Subbaswang K R, Sawtarie M. Structure and Properties of C<sub>60</sub> Dimers by Generalized Tight-binding Molecular Dynamics [J]. Phys Rev, 1994, B49: 13 966–13 969.
- [16] Rao A M, Zhou P, Wang K W *et al.* Photoinduced Polymerization of Solid C<sub>60</sub> Films [J]. Science, 1993, 259: 955–957.

## Irradiation Effect In C<sub>60</sub> Films Induced by Energetic Ions<sup>\*</sup>

JIN Yun-fan, YANG Ru<sup>#</sup>, WANG Yan-bin, LIU Chang-long, LIU Jie, HOU Ming-dong  
(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

YAO Jiang-hong

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Irradiation effects (mainly including transformation from crystalline into amorphous state) of C<sub>60</sub> films induced by 120 keV H, He, N, Ar, Fe and Mo ions, 240 keV and 360 keV Ar ions, and 171.2 MeV, 125.3 MeV and 75.8 MeV S ions were analysed by means of Raman scattering and XPS technique. The analysis results indicate that amorphization process in the cases of N, Ar, Fe and Mo ions irradiation is dominated by nuclear collision, but in the case of H ion irradiation, the process is dominated by electron energy transfer. The annealing effect of electron energy loss which induced the intermediate graphitization process before amorphization in lower irradiation dose ranging from  $2 \times 10^{14}$  to  $5 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> was found in the case of H ion irradiation for the first time. In the case of swift S ion irradiation, the destruction action of the strong electronic excitation exceeds the annealing effect, and therefore there is no intermediate graphitization process.

**Key words:** irradiation effect; C<sub>60</sub> film; low energy ion; annealing effect

\* **Foundation item:** NSFC (19675054); the Foundation of the Chinese Academy of Sciences (KJ952-S1-423)

# **present address:** Institute of Low Energy Physics, Normal University of Beijing, Beijing 100875