

# Crecimiento, desorción térmica y daño por bombardeo iónico en films de C<sub>60</sub> depositados sobre Cu(111)

## Growth, thermal desorption and ion bombardment damage in C<sub>60</sub> films deposited on Cu(111)

R. A. Vidal<sup>a,b</sup>, F. Bonetto<sup>a,c,\*</sup>, V. Quintero Riascos<sup>a</sup>, C. J. Bonin<sup>a,b</sup>, J. Ferrón<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Física del Litoral (IFIS-Litoral) – Universidad Nacional del Litoral– CONICET  
Güemes 3450 – (S3000GLN) Santa Fe – Argentina

<sup>b</sup> Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Química (FIQ) – Universidad Nacional del Litoral  
Santiago del Estero 2829 – (S3000AOM) Santa Fe – Argentina

<sup>c</sup> Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Química (FIQ) – Universidad Nacional del Litoral  
Santiago del Estero 2829 – (S3000AOM) Santa Fe – Argentina

*fernando.bonetto@ifis.santafe-conicet.gov.ar*

Recibido: 01/12/2015; aceptado: 26/04/2016

En el presente trabajo caracterizamos el crecimiento y desorción térmica de C<sub>60</sub> sobre Cu(111) por medio de espectroscopia de electrones Auger (AES) y difracción de electrones de baja energía (LEED). Las películas de C<sub>60</sub> fueron crecidas sobre el sustrato por sublimación de C<sub>60</sub> desde una celda de Knudsen a 350°C, dentro de una cámara de ultra alto vacío (~10<sup>-9</sup>Torr). También, determinamos las condiciones de medición de espectros de dispersión de iones lentos (LEIS), estimando el daño por irradiación producido por las dosis típicas utilizadas en estos experimentos (~10<sup>14</sup> iones/cm<sup>2</sup>). Para analizar el daño por bombardeo iónico (H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup> y Ar<sup>+</sup>, con energías de incidencia de 2, 4 y 8 keV) de las películas de C<sub>60</sub> se siguió la evolución temporal del plasmón característico de los enlaces π de los átomos de Carbono que conforman la molécula de C<sub>60</sub>, mediante espectroscopia de pérdida de energía de electrones (EELS). Además, se tomaron espectros Auger antes y después del bombardeo para caracterizar y cuantificar el daño producido.

El presente estudio muestra que: el crecimiento de C<sub>60</sub> sobre Cu(111) es capa tras capa; la desorción de la primera monocapa es diferente a las demás, quedando solo una monocapa cuando es calentado a 500°C; y solo se detectó daño por irradiación, para las dosis relevantes, cuando la muestra fue bombardeada con Ar<sup>+</sup>.

*Palabras clave: desorción térmica, C<sub>60</sub>, Cu(111), bombardeo iónico, AES, EELS, LEED, LEIS.*

Auger Electron Spectroscopy (AES) and Low Energy Electron Diffraction (LEED) were used to characterize the growth and thermal desorption of C<sub>60</sub> on Cu(111). C<sub>60</sub> films were grown by sublimation from a Knudsen cell at 350°C, placed in an ultra-high vacuum chamber (UHV) (~10<sup>-9</sup>Torr). We estimated the best conditions to obtain low energy ion scattered spectra (LEIS) by measuring the irradiation damage produced by typical doses used in these experiments (~10<sup>14</sup> iones/cm<sup>2</sup>). In order to analyze the potential damage of the sample by ion bombardment (2, 4 and 8 keV H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup> and Ar<sup>+</sup>), we monitored the evolution of the characteristic plasmon due to π-bonds of the C<sub>60</sub> molecule C atoms by Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS). In addition, Auger spectra (AES) were taken before and after irradiation to characterize and quantify the damage. Our study shows that: C<sub>60</sub> grows on Cu(111) layer by layer; the desorption of the first monolayer is different to the desorption of the other layers, remaining the first monolayer even when the substrate is heated up to 500°C and; damage by ion bombardment, at the used dose, was only detected when the sample was under Ar<sup>+</sup> irradiation.

*Keywords: thermal desorption, C<sub>60</sub>, Cu(111), ion bombardment, AES, EELS, LEED, LEIS.*

### I. INTRODUCCIÓN

Los fulerenos han sido ampliamente investigados desde su descubrimiento en 1985<sup>1</sup>. Sus amplias aplicaciones en diversos campos tales como la medicina, la electrónica y la química<sup>2</sup>, han despertado el interés de la comunidad científica. Del mismo modo, existen numerosos trabajos dedicados al estudio básico de los fulerenos, entre los cuales muchos se focalizaron en el crecimiento de C<sub>60</sub> sobre diferentes sustratos<sup>3-7</sup>. En particular, el crecimiento de C<sub>60</sub> sobre superficies semiconductoras despierta

especial interés por sus aplicaciones en dispositivos basados en celdas fotovoltaicas<sup>8</sup>.

Previamente también se estudió el crecimiento de C<sub>60</sub> sobre sustratos metálicos. Mediante experimentos de STM, combinados con cálculos teóricos de estructura de bandas<sup>9</sup>, y fotoemisión<sup>9, 10</sup> se determinó que la transferencia electrónica desde el sustrato de Cu(111) al C<sub>60</sub> varía entre 1 y 2 electrones por molécula. En otro trabajo<sup>11</sup>, usando la técnica de field-ion STM (técnica que combina un STM con un microscopio de efecto de campo, FIM), se

encontraron diferencias sustanciales en el crecimiento de  $C_{60}$  sobre Cu(111) y Ag(111), principalmente debido a que la interacción  $C_{60}$ -Cu(111) es mucho más fuerte que la interacción  $C_{60}$ - $C_{60}$ ; ocurriendo lo contrario en el caso de  $C_{60}$ /Ag(111). Asimismo, trabajos recientes en los que se utilizan las técnicas de STM<sup>12</sup> y LEED<sup>13</sup> muestran que la adsorción de moléculas de  $C_{60}$  sobre un sustrato de Cu(111) induce una reconstrucción de la superficie del sustrato.

Relacionado a las primeras etapas del crecimiento de  $C_{60}$  sobre Cu(111), se sabe que inicialmente las moléculas de  $C_{60}$  decoran los escalones del Cu(111), para luego formar islas 2D (a partir de las primeras formaciones en los escalones) en un arreglo hexagonal compacto. Una monocapa con la misma estructura hexagonal se forma después de recocer la muestra por encima de los 250 °C; conduciendo a un patrón de LEED característico  $p(4 \times 4)$ <sup>13, 14</sup>. A temperaturas más bajas, se estima que el crecimiento es desordenado<sup>15</sup>, sin que haya estudios determinantes al respecto.

En este trabajo nos proponemos varios objetivos: 1) caracterizar el crecimiento de  $C_{60}$  sobre Cu(111); 2) estudiar la desorción térmica de las películas evaporadas; y 3) determinar las condiciones para la medición de espectros de dispersión de iones lentos (LEIS) y el daño por irradiación producido durante la medición. En los puntos 1) y 2) haremos uso de las técnicas de espectroscopia Auger (AES), de espectroscopia de pérdida de energía de electrones reflejados (Reflection Electron Energy Loss Spectrometry, REELS) y de difracción de electrones lentos (Low Energy Electron Diffraction, LEED), para comprender los procesos físicos involucrados en el crecimiento y desorción térmica de una película de  $C_{60}$  crecida sobre Cu(111).

Las técnicas basadas en la dispersión de iones lentos (Low Energy Ion Scattering, LEIS) son ampliamente utilizadas para la caracterización química y estructural de superficies<sup>16</sup>. La técnica tiene una alta sensibilidad superficial, siendo posible detectar fracciones de monocapa utilizando bajas dosis ( $\sim 10^{14}$  iones/cm<sup>2</sup>), con un daño mínimo por irradiación. En particular, esto es importante para ciertas superficies carbonadas nanoestructuradas, en donde el daño puede ser importante para determinadas condiciones de irradiación<sup>17-21</sup>. En el presente trabajo nos proponemos encontrar las condiciones óptimas de irradiación (ion, dosis, energía) para minimizar los daños durante la adquisición de espectros de LEIS en películas de  $C_{60}$  depositadas sobre Cu(111).

## II. MÉTODO EXPERIMENTAL

Películas de  $C_{60}$  fueron crecidas sobre un monocristal de Cu(111) por sublimación (a 350 °C) de  $C_{60}$  en polvo previamente introducido en una celda de Knudsen. La muestra fue posicionada

directamente en frente de la celda de Knudsen a una distancia aproximada de 5 cm. Todo el proceso de deposición se llevó a cabo dentro de una cámara en condiciones de ultra alto vacío ( $\sim 10^{-9}$  Torr).

Se utilizó un espectrómetro Auger comercial (SAM PHI 590 A) para caracterizar el crecimiento y la desorción de  $C_{60}$  sobre Cu. El mismo consta de una cámara de UHV y está equipado con un analizador cilíndrico con un cañón de electrones coaxial. Para analizar el crecimiento se realizaron experimentos a dos temperaturas diferentes: a temperatura ambiente y a 300 °C, siguiendo la evolución temporal de los espectros Auger correspondientes al C (KLL) y al Cu (MVV y LVV). El tiempo máximo de evaporación fue de 40 minutos. Los espectros Auger fueron adquiridos en el modo diferencial (modulación 4  $V_p$ ), utilizando un haz de electrones de 3 keV y 1  $\mu$ A de corriente.

Para el análisis de la desorción térmica de  $C_{60}$  se procedió similarmente al caso anterior: espectros Auger (AES) fueron tomados con el fin de monitorear la evolución de los picos del C y del Cu en función de la temperatura de la muestra (rango estudiado: entre 20 y 700 °C). También se tomaron espectros de EELS para distintas temperaturas, con el fin de seguir la evolución del pico del plasmón  $\pi$ . En este caso la energía de los electrones incidentes fue de 100 eV.

Los experimentos de daño por irradiación y LEED se realizaron en un sistema LEIS-TOF montado en nuestro laboratorio. Básicamente este sistema consiste de: *i*- una cámara de ultra alto vacío con una presión base del orden de  $10^{-9}$  Torr; *ii*- una fuente de iones (tipo Colutron), equipado con filtro de Wien, lentes focalizadoras del haz y placas para producir un haz pulsado, *iii*- un espectrómetro de tiempo de vuelo, y *iv*- un sistema para realizar LEED-AES basado en un analizador de retardo VG con pantalla de visión trasera. En esta misma cámara de UHV se realizaron las mediciones de AES, EELS y LEED necesarias para el estudio del daño por irradiación y desorción.

La superficie del sustrato fue limpiada, previamente a la evaporación del  $C_{60}$ , por *sputtering* de  $Ar^+$  a una energía de 6 keV y usando un ángulo de incidencia de 30°. Una vez preparada la superficie y evaporado el  $C_{60}$ , se procedió a irradiar la muestra con iones de  $Ar^+$ ,  $He^+$  y  $H^+$ , a energías de 2, 4 y 8 keV, durante 8 horas de irradiación pulsada para cada proyectil (densidad de corriente media de  $\sim 15$  nA/cm<sup>2</sup>), y finalmente, 10 minutos de irradiación sin pulsar (densidad de corriente sin pulsar de  $\sim 1$   $\mu$ A/cm<sup>2</sup>, en todos los casos). A los efectos de monitorear el daño producido sobre el  $C_{60}$ , espectros de EELS (energía primaria igual a 100 eV) y AES (3 keV de energía primaria) fueron tomados antes de evaporar, inmediatamente después de la deposición del  $C_{60}$ , en intervalos regulares de tiempo de 2 horas durante la irradiación y al finalizar la irradiación continua de 10 minutos.

Los tiempos de evaporación usados en los experimentos de LEED no se corresponden directamente con los tiempos de crecimiento mostrados en AES, ya que fueron realizados en dos cámaras de UHV distintas con celdas de Knudsen y distancia sustrato-celda diferentes.

### III. RESULTADOS Y DISCUSION

#### Crecimiento de $C_{60}$ sobre Cu(111)

En la Fig. 1 se muestra la evolución de la amplitud de los picos Auger del Cu(MVV) y del C(KLL) a medida que se va depositando el  $C_{60}$  sobre la superficie de Cu, cuando el sustrato es mantenido a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) y cuando es calentado a  $300^{\circ}\text{C}$ . Para el primer caso, inicialmente se tiene la superficie limpia de Cu, con un bajo contenido de C residual (relación C/Cu de aproximadamente 0.1). A medida que el tiempo de evaporación aumenta, las amplitudes Auger del C(Cu) aumentan (disminuyen) linealmente.

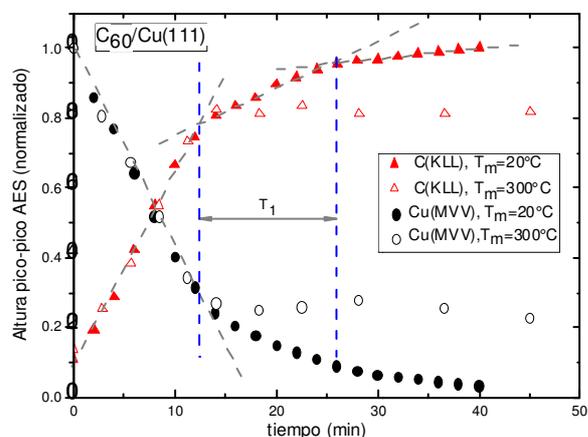


Fig. 1: Evolución de los picos Auger del C (capa KLL) y del Cu (capa MVV) durante la evaporación de  $C_{60}$  sobre Cu(111), y a dos temperaturas del mismo ( $T_m$ ):  $20^{\circ}\text{C}$  y  $300^{\circ}\text{C}$ .  $T_1$  es el tiempo de crecimiento de cada monocapa, aprox. 12 minutos.

Cuando el tiempo de deposición alcanza aproximadamente los 12 minutos (ver Fig. 1), se observa un quiebre en ambas amplitudes. Luego, el crecimiento (decrecimiento) lineal del C (Cu) continúan, pero con una pendiente inferior a la previamente observada. Este comportamiento es consistente con la idea de que el  $C_{60}$  crece capa tras capa sobre el Cu(111). Cada uno de los quiebres observados en la fig. 1 indican el final de la formación de una capa y el comienzo de la formación de la siguiente<sup>22</sup>.

Para el caso en que el sustrato se mantiene a  $300^{\circ}\text{C}$ , se observa el mismo comportamiento durante los primeros 12 minutos de deposición, sin embargo, para tiempos mayores, tanto la señal de C como de Cu permanecen aproximadamente constantes. Esto indica que una única monocapa de  $C_{60}$  se forma sobre el sustrato

También se caracterizó el crecimiento de  $C_{60}$  sobre Cu mediante imágenes de LEED (100 eV de energía primaria para algunos tiempos de deposición, y para una temperatura de sustrato de  $20^{\circ}\text{C}$ ). En la Fig. 2 se muestran estos patrones: a) para Cu limpio, antes de evaporar, se observa el patrón característico del Cu(111); b) para un tiempo de deposición de 10 minutos, no se observan mayores cambios; c) luego de 25 minutos de evaporación (tiempo de evaporación aproximado de 1 monocapa) y d) luego de 50 minutos. De a) a c) se puede observar el cambio en el patrón de difracción consistente con la formación de una monocapa de  $C_{60}$  con simetría  $(4 \times 4)$ <sup>13, 14</sup>. La imagen d) no muestra ningún patrón, indicando la formación de una película desordenada de  $C_{60}$  cuyo espesor es de aproximadamente 2 monocapas.

Es importante notar que estas imágenes son consistentes con la idea de crecimiento capa a capa claramente indicado en el análisis de la evolución de los espectros Auger (Fig. 1)

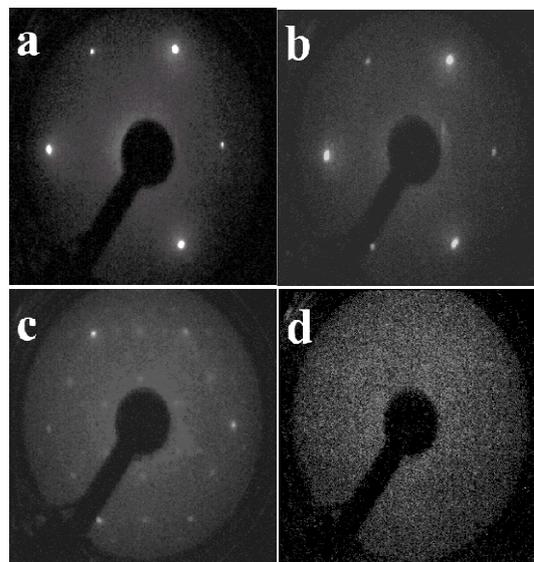


Fig. 2: Patrón de difracción de LEED, tomada a una energía de 100 eV. a) superficie de Cu(111) antes de evaporar  $C_{60}$ , b) después de evaporar durante 10 min, c) luego de evaporar durante 25 min., y d) luego de evaporar durante 50 min. El sustrato se mantuvo a  $T=20^{\circ}\text{C}$  durante el experimento.

#### Desorción térmica de $C_{60}$ sobre Cu(111)

En la Fig. 3 se muestra la evolución de la señal Auger (altura pico a pico) tanto del C (KLL) como del Cu (MVV y LVV) cuando una película gruesa ( $\sim 3$  ML) de  $C_{60}$  es desorbida térmicamente cuando el sustrato es calentado entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $700^{\circ}\text{C}$ . La relación inicial C/Cu(MVV) y C/Cu(LVV) es de alrededor de 11 y 2.3, respectivamente. Notar que las señales Auger no cambian en amplitud hasta una temperatura de sustrato de alrededor de  $200^{\circ}\text{C}$ . A partir de allí, se observa que la señal Auger del C comienza a

decrecer, y al mismo tiempo, aumentan la señales Auger del Cu. A partir de 275°C las tres señales se mantienen aproximadamente constantes hasta  $\sim 600^\circ\text{C}$  indicando la presencia de una monocapa de  $\text{C}_{60}$  aún a estas temperaturas.

A partir de  $600^\circ\text{C}$  se observa un incremento en la señales Auger del Cu, mientras que la señal del C decrece levemente, indicando un cambio en la composición de la película de  $\text{C}_{60}$ .

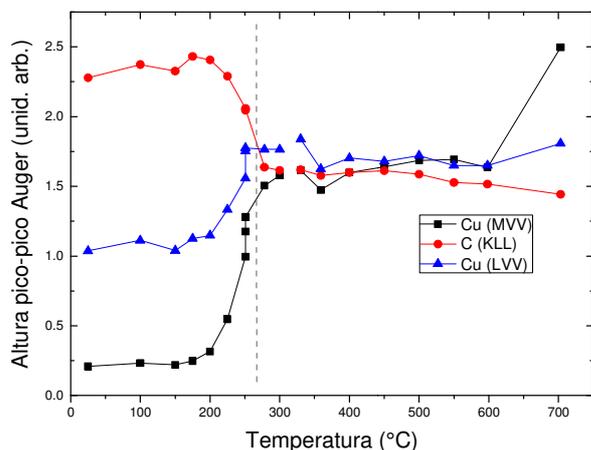


Fig. 3: Altura pico a pico de la señal Auger del C (capa KLL) y Cu (capas MVV y LVV), para diferentes temperaturas del sustrato. La línea de puntos ( $T \sim 275^\circ\text{C}$ ) indica la temperatura a partir de la cual solo una monocapa de  $\text{C}_{60}$  queda sobre el sustrato.

También se tomaron imágenes LEED (100 eV de energía primaria) durante la desorción térmica de una capa gruesa de  $\text{C}_{60}$  sobre Cu(111). En la Fig. 4 se muestran estas imágenes para un film grueso inmediatamente después de depositado sobre el sustrato (a) y cuando el sustrato se llevó a  $180^\circ\text{C}$  (b),  $300^\circ\text{C}$  (c) y  $500^\circ\text{C}$  (d).

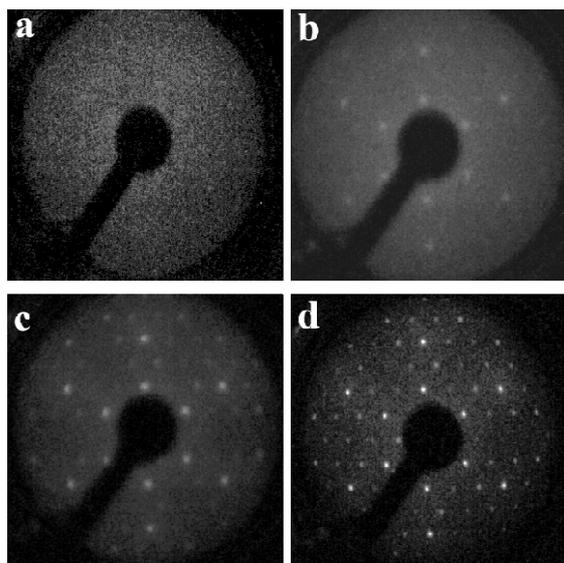


Fig. 4: Evolución del patrón de difracción de LEED (100 eV) durante la desorción de una película gruesa de  $\text{C}_{60}$  ( $\sim 2$  monocapas): a) inmediatamente después de evaporar el film, b) después de calentar el sustrato a

$180^\circ\text{C}$ , c) después de calentar a  $300^\circ\text{C}$ , y d) luego de calentar a  $500^\circ\text{C}$ . La temperatura se mantuvo fija durante 5 min antes de tomar cada imagen.

A partir de estas imágenes se advierte que: i) la estructura cristalina se recupera cuando la muestra se lleva a  $180^\circ\text{C}$ ; ii) el patrón de LEED, típico del  $\text{C}_{60}$  sobre Cu(111), se hace más nítido cuanto mayor es la temperatura y iii) el patrón de LEED del Cu limpio (Fig. 2a) no se recupera aún a temperaturas altas. Las primeras dos de estas observaciones indican que se produce un reordenamiento (y posible desorción) de las moléculas de  $\text{C}_{60}$  cuando el sustrato se calienta: a  $180^\circ\text{C}$  se pasa de un patrón LEED sin estructura (Fig. 4a) a una imagen donde se puede distinguir estructura cristalina, que se hace cada vez más nítida cuando la temperatura del sustrato es mayor. El punto iii) indica que, al igual que en el caso de los resultados de los espectros Auger, el  $\text{C}_{60}$  no se desorbe completamente (por debajo de  $700^\circ\text{C}$ ) y que, solo una monocapa subsiste cuando el sustrato es calentado a altas temperaturas.

Con el fin de evaluar posibles cambios en la estructura de la molécula de  $\text{C}_{60}$  durante la desorción térmica, se tomaron espectros de pérdida de energía de electrones reflejados (EELS) con el propósito de observar la evolución del pico correspondiente al plasmón característico de los enlaces  $\pi$  de los átomos de Carbono que conforman la molécula de  $\text{C}_{60}$  (Fig. 5).

Dos características se advierten en los espectros EELS cuando la temperatura del sustrato crece: i) el pico correspondiente al plasmón  $\pi$  se ensancha a medida que se desorbe la molécula de  $\text{C}_{60}$  (ver Fig. 3) y ii) se produce un ligero corrimiento de 0.8 eV hacia energías mayores en el pico del plasmón  $\pi$ , y de 0.8 eV hacia energías menores en el pico del plasmón  $\pi+\sigma$ .

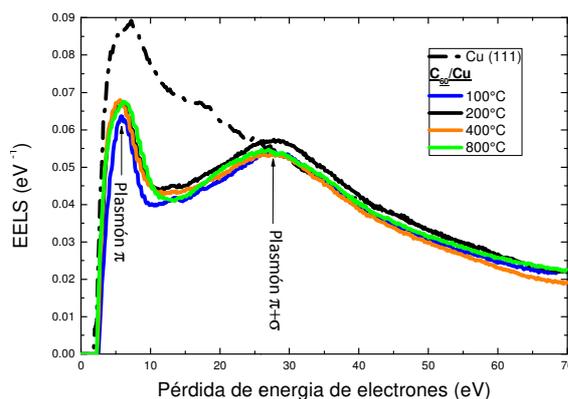


Fig. 5: Espectros de pérdida de energía de electrones para diferentes temperaturas del sustrato. Evolución del plasmón  $\pi$  característico del  $\text{C}_{60}$ . Energía de los electrones incidentes 100eV.

## Daño por bombardeo iónico de $C_{60}$

Con el propósito de establecer si la muestra de  $C_{60}$  sobre Cu(111) se modifica durante experimentos de LEIS se procedió a realizar un estudio para evaluar el daño producido por irradiación con dosis y energías típicas de estatécnica. El estudio consistió en bombardear la muestra con distintos iones ( $H^+$ ,  $He^+$  y  $Ar^+$ ), durante 8 hs con una corriente pulsada (característico de LEIS) y durante 10 min sin pulsar para distintas energías de incidencia (2, 4 y 8 KeV). Espectros de EELS y Auger se tomaron y contrastaron para distintos tiempos de irradiación

Los espectros EELS y Auger (inset) para energías de 2, 4 y 8 keV se muestran en la Fig. 6.

En estas figuras se muestra de manera ampliada la región correspondiente al plasmón  $\pi$  característico de la molécula de  $C_{60}$ . La relación C/Cu entre la altura pico a pico de los espectros Auger correspondientes al C (KLL) y Cu(MVV) se midió y contrastó para: a- Cu limpio (en negro, inset Fig. 6), b- inmediatamente después de evaporar  $C_{60}$  sobre Cu(111), c- luego de 8 hs. de irradiación con corriente pulsada y d- luego de 10 minutos de la misma corriente de irradiación sin pulsar. Tanto en la comparación de los espectros Auger como de los espectros EELS, solo se detectan cambios (dentro del error experimental) cuando se irradia la muestra con  $Ar^+$ , para las tres energías de incidencia explorada.

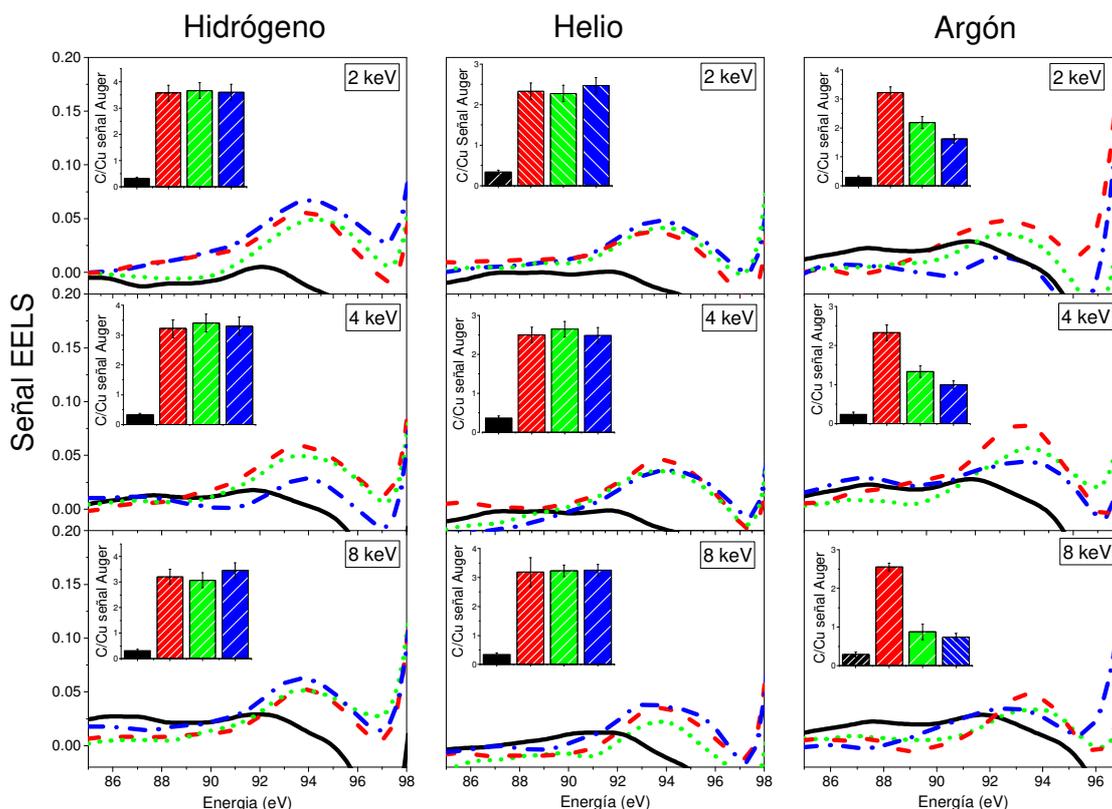


Fig. 6: **Resultados de la evaluación de daño por irradiación en experimentos de LEIS.** Espectros de EELS medidos luego de bombardear con iones de  $H^+$  (izquierda),  $He^+$  (centro) y  $Ar^+$  (derecha), durante 8hs pulsado (línea de puntos verde) y luego de 10 min sin pulsar (línea de puntos y rayas azul) fueron comparados con espectros de EELS de Cu(111) limpio (línea sólida negra) y con espectros de EELS tomados inmediatamente después de haber sido depositado el film de  $C_{60}$  (línea discontinua roja). La energía de incidencia de los iones fue de 2, 4 y 8keV, tal como se indica en el gráfico. Los cocientes entre las señales Auger del Cu(MVV) y C(KLL) fueron medidos para los mismos casos (gráficos de barras insertados a la derecha): a) Cu limpio (negro), b)  $C_{60}$  recién evaporado (rojo con rayas blancas en un patrón denso), c) después de 8 hs de experimentos de LEIS (verde con rayas blancas con densidad intermedia) y d) después de irradiar la muestra de manera continua (azul con rayas blancas poco densas). Tanto los cocientes de la señal Auger como los espectros EELS revelan daño solo para el caso de bombardeo con  $Ar^+$  para las tres energías estudiadas y aun para dosis de irradiación pulsadas como las usadas en LEIS.

## IV. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que el crecimiento de  $C_{60}$  sobre Cu(111) se produce, principalmente, capa a capa, para las primeras monocapas con tiempos de crecimiento similares. De acuerdo a lo revelado por el estudio de LEED, la primera monocapa presenta estructura cristalina, que

desaparece a medida que crece el film más grueso (2 ML). Cuando la temperatura del sustrato se mantiene a  $\sim 300^\circ C$  durante la deposición crece una única monocapa de  $C_{60}$ .

Para un film grueso las moléculas de  $C_{60}$  comienzan a desorber para temperatura mayores a  $\sim 200^\circ C$ , quedando una única monocapa para una temperatura del orden o mayores a los  $300^\circ C$ .

Partiendo de un film grueso, sin estructura, se comienza a observar un reordenamiento cristalino (o desorción) cuando el sustrato se calienta a temperaturas del orden de los 180°C.

No se detectó daño alguno cuando la muestra fue irradiada con  $H^+$  y  $He^+$  con dosis y tiempos de irradiación típicos de experimentos de LEIS (dosis del orden de  $2 \times 10^{14}$  iones/cm<sup>2</sup>), ni aún con irradiación continua (dosis del orden de  $4 \times 10^{15}$  iones/cm<sup>2</sup>). Sin embargo, tanto los espectros Auger como los de EELS revelaron que el film de  $C_{60}$  es modificado cuando la muestra es irradiada con  $Ar^+$ , aún para energías de incidencia bajas (2 keV) y con dosis bajas de irradiación (pulsada).

Este resultado es consistente con los coeficientes de sputtering calculados mediante un código (SRIM) que calcula la interacción de iones con la materia<sup>23</sup>(www.srim.org). Para iones de 4 keV, incidiendo a 22.5° respecto de la superficie (geometría utilizada en los experimentos de LEIS) se obtienen coeficientes de sputtering de 0.01, 0.06 y 0.86 para  $H^+$ ,  $He^+$  y  $Ar^+$ , respectivamente. Esto está

## V- REFERENCIAS

1. H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl and R. E. Smalley, *Nature* **318** (6042), 162-163 (1985).
2. O. Amelines-Sarria, P. C. dos Santos Claro, P. L. Schilardi, B. Blum, A. Rubert, G. Benitez, V. A. Basiuk, A. González Orive, A. Hernández Creus, C. Díaz and R. C. Salvarezza, *Organic Electronics* **12** (9), 1483-1492 (2011).
3. R. M. Fleming, M. J. Rosseinsky, A. P. Ramirez, D. W. Murphy, J. C. Tully, R. C. Haddon, T. Siegrist, R. Tycko, S. H. Glarum, P. Marsh, G. Dabbagh, S. M. Zahurak, A. V. Makhija and C. Hampton, *Nature* **352** (6337), 701-703 (1991).
4. H. Xu, D. M. Chen and W. N. Creager, *Physical Review Letters* **70** (12), 1850-1853 (1993).
5. E. Radeva, V. Georgiev, L. Spassov, N. Koprinarov and S. Kanev, *Sensors and Actuators B: Chemical* **42** (1), 11-13 (1997).
6. J. I. Pascual, J. Gómez-Herrero, C. Rogero, A. M. Baró, D. Sánchez-Portal, E. Artacho, P. Ordejón and J. M. Soler, *Chemical Physics Letters* **321** (1-2), 78-82 (2000).
7. H. Liu and P. Reinke, *The Journal of Chemical Physics* **124** (16), 164707 (2006).
8. C. J. Brabec, S. Gowrisanker, J. J. M. Halls, D. Laird, S. Jia and S. P. Williams, *Advanced Materials* **22** (34), 3839-3856 (2010).
9. T. Hashizume, K. Motai, X. D. Wang, H. Shinohara, Y. Saito, Y. Maruyama, K. Ohno, Y. Kawazoe, Y. Nishina, H. W. Pickering, Y. Kuk and T. Sakurai, *Physical Review Letters* **71** (18), 2959-2962 (1993).
10. K.-D. Tsuei, J.-Y. Yuh, C.-T. Tzeng, R.-Y. Chu, S.-C. Chung and K.-L. Tsang, *Physical Review B* **56** (23), 15412-15420 (1997).

también de acuerdo con la deposición de energía nuclear ( $S_n$ , frenado nuclear) producida por los iones. Por ejemplo para iones de 4 keV el frenado nuclear de los iones  $Ar$  es 30 veces mayor que para  $He^+$  y casi 300 veces mayor que para  $H^+$ . Sin embargo en este trabajo también se pretendió estudiar el efecto de la deposición de energía electrónica ( $S_e$ , frenado electrónico) en donde las diferencias entre los diferentes iones no es tan grande (11.3, 6.6 y 6.2 eV/Å, para 4 keV  $Ar^+$ ,  $He^+$  e  $H^+$  respectivamente).

A partir de aquí se puede concluir que la técnica de LEIS con iones  $Ar$  es inadecuada para estudiar películas de  $C_{60}$ . No obstante, a priori no existe inconveniente alguno para emplear la técnica con iones de  $H^+$  o  $He^+$ .

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la ayuda económica brindada por CONICET ( PIP 2012-2014 N° 0577), ANPCyT ( PICT 2010 N° 0294 y PICT 2013 N° 0164) y UNL(CAI + D 2011 N° 501 201101 00283 LI).

11. T. Sakurai, X. D. Wang, T. Hashizume, V. Yurov, H. Shinohara and H. W. Pickering, *Applied Surface Science* **87-88**, 405-413 (1995).
12. W. W. Pai, C.-L. Hsu, M. C. Lin, K. C. Lin and T. B. Tang, *Physical Review B* **69** (12), 125405 (2004).
13. G. Xu, X.-Q. Shi, R. Q. Zhang, W. W. Pai, H. T. Jeng and M. A. Van Hove, *Physical Review B* **86** (7), 075419 (2012).
14. W. W. Pai, C. L. Hsu, K. C. Lin, L. Y. Sin and T. B. Tang, *Applied Surface Science* **241** (1-2), 194-198 (2005).
15. T. Sakurai, X. D. Wang, Q. K. Xue, Y. Hasegawa, T. Hashizume and H. Shinohara, *Progress in Surface Science* **51** (4), 263-408 (1996).
16. H. H. Brongersma, M. Draxler, M. de Ridder and P. Bauer, *Surface Science Reports* **62** (3), 63-109 (2007).
17. M. R. C. Hunt, J. Schmidt and R. E. Palmer, *Applied Physics Letters* **72** (3), 323-325 (1998).
18. R. F. Egerton and M. Takeuchi, *Applied Physics Letters* **75** (13), 1884-1886 (1999).
19. F. C. Zawislak, D. L. Baptista, M. Behar, D. Fink, P. L. Grande and J. A. H. da Jornada, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **149** (3), 336-342 (1999).
20. R. Singhal, F. Singh, A. Tripathi and D. K. Avasthi, *Radiation Effects and Defects in Solids* **164** (1), 38-48 (2009).
21. B. Florian, *Reports on Progress in Physics* **62** (8), 1181 (1999).
22. R. A. Vidal and J. Ferrón, *Journal of Physics D: Applied Physics* **48** (43), 435302 (2015).
23. J. F. Ziegler, M. D. Ziegler and J. P. Biersack, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **268** (11-12), 1818-1823 (2010).

