

# Análisis de superficies: espectroscopia Auger\*

## Surface analysis: Auger spectroscopy

Cristian E. Daza J.<sup>1</sup> y Mikel F. Hurtado M.<sup>2</sup>

### Resumen

El efecto fotoeléctrico es sin duda uno de los principios físicos más empleados en tecnologías modernas; es la base de la energía solar fotovoltaica, de detectores de llama en centrales termoeléctricas y de sensores de cámaras digitales. El presente artículo tiene como propósito presentar al lector la historia de la espectroscopia Auger (AES) y los principios físicos y químicos relacionados con esta, que permiten medir el número de cuentas o intensidad de la energía cinética de los electrones emitidos desde la superficie de una muestra, algunos de los cuales son de características Auger (electrones emitidos a energías menores de 1000 eV, provenientes esencialmente de las capas más externas del átomo). Esto permite caracterizar superficies en función de su composición elemental y su estado de oxidación. La AES es una técnica de gran importancia en el desarrollo e investigación de nuevos materiales, al igual que sus aplicaciones en la tecnología de nuevos semiconductores y en la industria electrónica moderna.

**Palabras clave:** superficies, interfaces, nanométrico, análisis elemental, electrones Auger, semiconductores.

### Abstract

The photoelectric effect is one of most used physical principles in modern technology, being the base of photovoltaic solar cells, flame detectors in thermoelectric industry and digital camera sensors. In this article we want to show to the reader the history of the Auger Electron Spectroscopy, the main physical and chemical principles that allow measure the number of counts or kinetic energy intensity of emitted electrons from a certain surface, some of them are Auger-like (emitted electrons at lower energies than 1000 eV, that coming from the outermost atomic layers), allowing surface characterization as function of elemental composition and oxidation states. AES is a technique of high

\* Este artículo es resultado del proyecto de investigación en estado sólido, micro- y nanoestructuras "Nuevas técnicas en diseño de circuitos nanoestructurados".

<sup>1</sup> Ingeniero electrónico de la Universidad Central. Correo: cdazaj@ucentral.edu.co.

<sup>2</sup> Químico, magíster en Ciencias y Termodinámica, magíster en Ciencia de Materiales y Nanotecnología. Doctor en química y posdoctorado en nanomateriales. Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica y miembro de los grupos de investigación Maxwell y SPIN. Correo: mhurtadom1@ucentral.edu.co.

relevance in order to develop and research new materials, at the same time as its applications in new semiconducting materials and modern electronic industry.

**Keywords:** surfaces, interfaces, nanometric, elemental analysis, auger electrons, semiconducting materials.

## 1. Introducción

Aproximadamente hace sesenta años comenzó el estudio de superficies sólidas, y hoy en día son muchos los investigadores que en el mundo entero se dedican al continuo estudio de las propiedades físicas y químicas de superficies e interfaces. La motivación radica en las interacciones que se presentan entre los diversos sistemas que componen nuestro universo y en los cuales se involucran sus superficies. Esta es razón suficiente para explicar la importancia de su estudio para la vida humana y su repercusión tecnológica y económica modernas.

En la tecnología de los semiconductores, observamos actualmente un panorama abrumador con gran impacto socioeconómico, donde el conocimiento de las superficies de los materiales y sus interfaces definen y permiten la gran variedad de dispositivos electrónicos, así como su tendencia a ser cada vez más pequeños, con mayor capacidad de procesamiento y almacenamiento, bien sea de datos o energía. Para el estudio, caracterización y determinación del comportamiento de todas estas interfaces, se deben utilizar técnicas de alta sensibilidad superficial y en bloque que posean gran resolución (principalmente en los primeros nanómetros).

La espectroscopia de electrones Auger (AES) ha demostrado ser una de las técnicas más usadas en la identificación de la composición de las superficies de los sólidos. La alta sensibilidad para el análisis químico, la gran

velocidad de adquisición de datos y la capacidad de detectar todos los elementos con masa atómica superior a la del Helio (He) son las principales ventajas de esta técnica. En sus inicios era una técnica usada simplemente para la búsqueda o rastreo de contaminantes; sin embargo, AES es ahora una herramienta rutinaria de uso analítico en la industria electrónica moderna.

El presente trabajo es resultado de la aplicación directa de los conceptos adquiridos en la clase de Estado Sólido Micro y Nanosistemas, impartida en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central, donde se fortalece el proceso de aprendizaje bajo la modalidad de investigación.

Se ofrece una revisión bibliográfica detallada del funcionamiento y los principios básicos de operación del equipo y la técnica, lo que permite entender, desde el punto de vista físico y químico, algunos de los parámetros fundamentales para considerar y aplicar en futuros desarrollos y diseños de circuitos micro y nanoelectrónicos.

Se visitaron instalaciones para el reconocimiento de la instrumentación específica requerida y verificar las condiciones de operación de los instrumentos desde el punto de vista mecánico, electrónico y a nivel de *software*.

Adicionalmente, se analizan los resultados de la toma de espectros Auger de investigaciones previas en materiales tipo nitruro de boro (BN), así como la importancia que estos tienen en la industria electrónica moderna.

## 2. Estado de la cuestión

La espectroscopia Auger ha tomado gran relevancia en el análisis de materiales modernos por su alta sensibilidad de detección composicional superficial (1-10 nm), lo que ha permitido reconocer procesos de corrosión, gradientes de aleaciones, niveles de dopado en semiconductores, perfiles de composición en función de la profundidad en tecnologías de película delgada y reconocimiento de actividad catalítica, entre otros.

En la actualidad, existen grandes cantidades de desechos electrónicos que contienen materiales y elementos que pueden ser reutilizados en nuevos dispositivos electrónicos (Babu, Parande y Basha, 2007). En general, estos desechos tecnológicos están compuestos en un 40% de metales, en un 30% de plástico y en un 30% de óxidos refractarios (Sodhi y Reimer, 2001). Específicamente, los metales más abundantes se distribuyen en 20% de cobre, 8% de hierro, 4% de estaño, 2% de níquel, 2% de plomo, 1% de zinc, 0,02% de oro y 0,005% de paladio; y los componentes plásticos mayoritarios son polietileno, polipropileno, poliéster y policarbonatos (Gramatyka, Nowosielski y Sakiewicz, 2007; Souza y Freitas, 2017).

De este modo, la caracterización y análisis por AES es ampliamente utilizada en la industria electrónica moderna no solo en el ensamblado de elementos de circuito altamente específicos, sino también para elegir qué partes de los dispositivos electrónicos desechados pueden ser ampliamente utilizados, a la vez que permite hacer un análisis de cuáles deberían ser los procedimientos para recuperarlos.

## 3. Historia

El efecto Auger fue descubierto por Pierre Victor Auger en 1925 mientras trabajaba con rayos X. Auger observó la trayectoria de electrones en una cámara de niebla, mejor conocida como cámara de Wilson, donde explicó su origen.

Posteriormente, la técnica de usar electrones Auger para identificar impurezas en superficies fue sugerida por Lander (1953), y solo hasta 1968 fue cuando Harris (Parra, 2014) demostró el uso de la diferenciación de las curvas de distribución de energía para obtener espectros Auger.

## 4. Principios teóricos

La espectroscopia de electrones Auger (AES) se basa en un principio físico que consiste en la interacción entre la materia y los fotones; cuando se irradia un haz de electrones ( $e^-$ ) de alta energía (entre 1-10 KeV) sobre la primera capa del sólido (5-10 nm) (figura 1), dicha energía es suficiente para ionizar todos los niveles de los elementos más livianos y los niveles centrales superiores de los elementos más pesados (Walls, 1989).

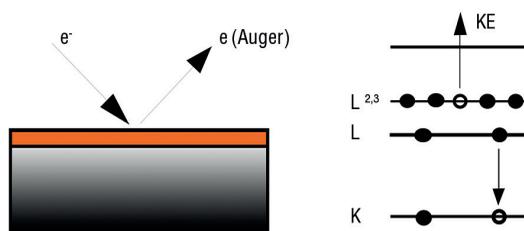


Figura 1. Proceso de generación de electrones Auger. Fuente: Chung (2012).

En la figura 2 se puede evidenciar lo que sucede cuando el electrón incide sobre el átomo en el nivel interno K; la energía del electrón incidente  $E_p$  debe ser mayor que la energía de enlace  $E_k$  del electrón en el nivel K, aproximadamente 5 veces mayor, para que la ionización sea eficiente. De esta forma se crea una vacante (hueco), que inmediatamente es llenada por otro electrón de un nivel externo, en este caso  $L_1$ . La energía de esta transición puede ser emitida en forma de rayos X o ser transferida a otro electrón localizado, por ejemplo, en el nivel  $L_2$ , que es expulsado del átomo como un electrón Auger. Esta energía también es conocida como “emisión Auger”.

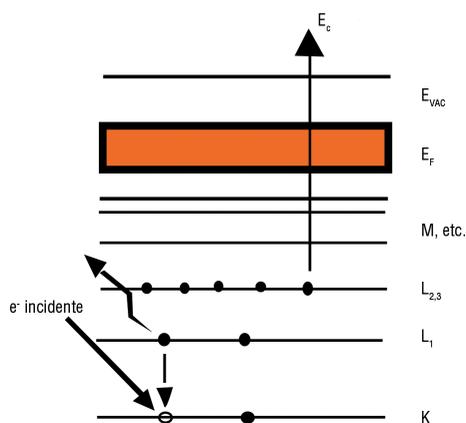


Figura 2. Diagrama esquemático de los procesos de emisión Auger.

Fuente: Chung (2012).

La energía de este electrón es aproximadamente igual a:

$$E E_k - E_{L_1} - E_{L_2} - f_A \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde  $f_A$  es la función de trabajo del material analizado. Este proceso de expulsión descrito recibe la denominación de transición Auger  $KL_1L_2$ . Muchas de estas transiciones pueden ocurrir con varias probabilidades de transición:  $KL_1L_1$ ,  $KL_1L_2, 3L_{2,3}$ ,  $M_2M_4M_4$ , etc. Las energías de los electrones Auger son

características del material que está siendo analizado, con independencia de la energía del haz incidente. Es evidente que, para lo expuesto anteriormente, deben existir al menos dos estados de energía entre electrones para lograr un proceso Auger.

Cabe resaltar que la energía expresada en la ecuación 1 depende implícitamente de los niveles de energía atómicos. Esto significa que para cada elemento de la tabla periódica hay un único conjunto de energías Auger determinado, ya que no existen dos elementos con el mismo conjunto de energías atómicas. Consecuentemente, átomos de hidrógeno (H) y helio (He) no pueden generar electrones Auger; de la misma forma, los átomos de Li (litio), por tener apenas un único electrón en el nivel más externo, no pueden generar electrones Auger.

## 5. Instrumentación

La Universidad Nacional de Colombia hoy en día cuenta con un laboratorio especializado para la caracterización de materiales, donde se encuentra un sistema único en el país para el análisis de materiales a nivel superficial. Allí se pueden mezclar diferentes técnicas, principalmente AES, XPS y SEM, que requieren *ultra alto vacío* (UHV). A continuación se describen los procesos electrónicos básicos del sistema.

### 5.1 Fuente de excitación

El análisis de la energía cinética de los electrones emitidos por la superficie de la muestra forma parte esencial de la técnica, por lo cual el analizador de energía cumple una función importante en el sistema. De la misma forma, es necesaria la excitación de la muestra por medio del bombardeo de electrones de una longitud de onda muy baja. Adicionalmente,

se deben tener ciertas condiciones de vacío entre la muestra y el analizador, que evitan, principalmente, la dispersión de los electrones emitidos y la contaminación superficial en el orden de  $10^{-9}$  mbar. Dicho sistema se puede evidenciar en la figura 3 (Morais, 1991).

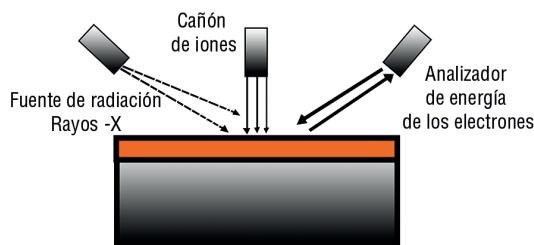


Figura 3. Componentes principales en un sistema de análisis de superficies mediante AES. Fuente: Chung (2012).

Como se comentó anteriormente, la excitación del material se obtiene mediante bombardeo con electrones de alta energía, donde su única función es la ionización de un nivel interno para iniciar el proceso Auger. Por lo tanto, la energía del haz siempre debe ser suficientemente alta para ionizar todos los niveles internos con una eficiencia elevada y uniforme.

La fuente de electrones (Electron Gun) usada en el sistema (emisión termoiónica) emplea un filamento de tungsteno, que es calentado por el paso de corriente eléctrica del orden de los mA, produciendo así un bombardeo de electrones que interactúan con la muestra.

## 5.2 Analizador de energía

Es el dispositivo que mide las energías de los electrones emitidos desde la superficie como consecuencia de la irradiación de esta con electrones de alta energía. Los electrones que se liberan de las capas de los átomos que salen de una forma parabólica son recogidos por el CMA (Cylindrical Mirror Analyzer), de modo que, para un valor determinado de la

energía cinética  $E_c$  de los electrones desprendidos, se puede saber el elemento químico de la tabla periódica que emitió dichos electrones y, por consiguiente, reconocer la composición elemental de la superficie de la muestra analizada (Albella, 2003).

En la figura 4 se muestra el dispositivo analizador de energía y la fuente de excitación.

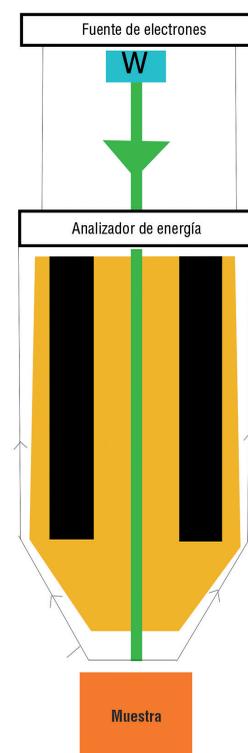


Figura 4. Imagen detallada del analizador de electrones. Fuente: Vij (2006).

Luego de obtener la  $E_c$ , se utilizan unos detectores (modulador, preamplificador) para llevar los datos obtenidos a una interfaz y mostrar la información espectral (Konstantatos, 2010).

## 5.3 Espectrómetro Auger

A continuación se muestran los elementos básicos necesarios para hacer mediciones de espectros de AES.

Debido a los avances tecnológicos, los equipos hechos recientemente cuentan con canales para mezclar técnicas de análisis de superficies, como se comentó anteriormente. En la figura 5 se aprecia la configuración convencional de un equipo para análisis AES en el que se pueden distinguir las partes más importantes (Faraldos y Goberna, 2011): analizador de electrones, lentes, espectrómetro de masas, fuente de rayos X, manipulador de muestras, cámara de análisis, sistema de vacío, cámara de pretratamiento, ventana, cañón de electrones, evaporador de metales. (Pietralunga, 2016)

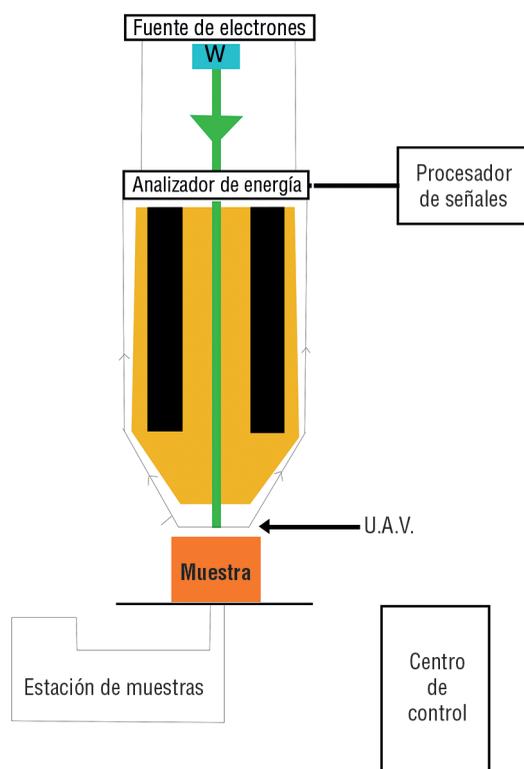


Figura 5. Principales componentes de un espectrómetro Auger. Fuente: Vij (2006).

### 5.3.1 AES en la industria electrónica

La AES es una herramienta bastante útil para determinar la composición, la concentración y

los estados químicos de un sólido en la superficie, así como información directa e indirecta a través de medidas de características energéticas, intensidad, desplazamiento de señales, forma espectral y anchos de banda espectral generados por los electrones Auger.

El nitruro de boro cúbico c-BN es ampliamente empleado por sus aplicaciones mecánicas como abrasivo y su potencial en distintas aplicaciones electrónicas, debido a su dureza, estabilidad térmica, estabilidad oxidativa y su capacidad de modificar fácilmente su conductividad eléctrica tipo *p* o *n* (Bello, Chong y Ye, 2012; Lorentz, Orgzall y Hinze, 1995; Yang et ál., 2011).

El método de síntesis HPHT (*high temperature and high pressure*) para obtener c-BN empleando  $\text{Li}_3\text{N}$  como catalizador es bastante eficiente, pero forma simultáneamente la fase hexagonal h-BN, que deteriora significativamente las propiedades esperadas de la fase c-BN. La proporción de estructuras secundarias de la fase h-BN puede ser estudiada y determinada a través de técnicas modernas de análisis, como AES y XRD (difracción de rayos X), para obtener la identificación del tipo de hibridación y su correspondencia con la estructura cristalográfica (Meizhe et ál., 2017)

Meizhe et ál. (2017) encontraron una proporción atómica de boro, 32,9%; nitrógeno, 22,1%; oxígeno, 17,7%; litio, 5,8% y carbono, 21,5%, al emplear el método HPHT. El litio se encuentra en forma de  $\text{Li}_2\text{BN}_2$  y el carbono y el oxígeno se consideran contaminantes como fases terciarias como  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  en la interfaz. La presencia de oxígeno (condiciones de síntesis 4,5–5,3GPa y temperatura entre 1350–1500 °C) causa defectos localizados que deterioran las propiedades de la fase c-BN. Los enlaces B–N conectan dos anillos paralelos en la fase h-BN en el orden de energías de enlace débiles tipo *p*, los cuales no aparecen

en las estructuras de las fases c-BN y  $\text{Li}_3\text{BN}_2$ , puestos que corresponden a hibridaciones (estados químicos) tipo  $\text{sp}^2$  y  $\text{sp}^3$  de los enlaces B-N para las estructuras h-BN y c-BN respectivamente.

En la figura 6 se pueden apreciar dos espectros AES correspondientes a las estructuras h-BN y c-BN. Allí se muestra una primera región de análisis donde el fenómeno Auger

tiene lugar en términos de energía cinética para átomos de boro, separado por una línea azul, donde los rangos de energías cinéticas corresponden a las transiciones Auger de átomos de nitrógeno. La forma de los espectros y la serie de picos observados son características de estructuras con diferente tipo de hibridación (estados químicos)  $\text{sp}^2$  o  $\text{sp}^3$ , como se muestra en la parte derecha de la figura 6.

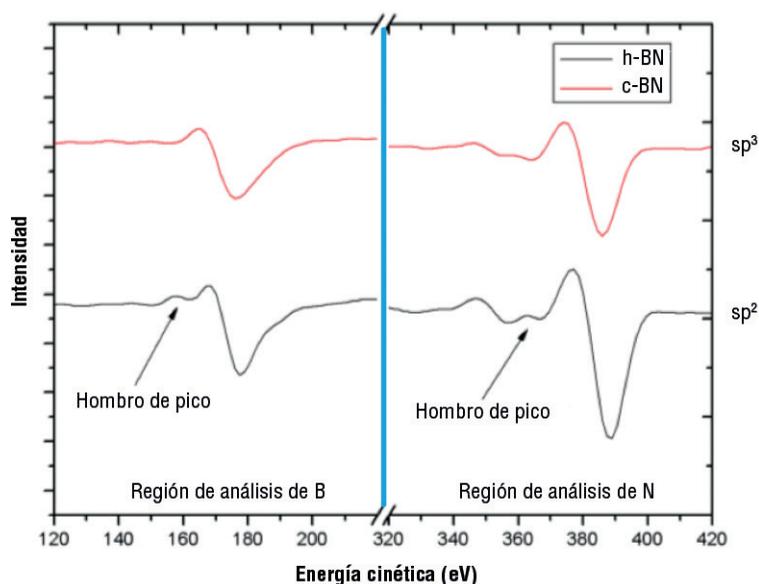


Figura 6. Contraste de espectros AES de h-BN y c-BN mostrando la región de análisis de boro y de nitrógeno, al igual que el tipo de hibridación. Fuente: adaptado de Meizhe et ál. (2017).

La correlación de la información de los estados químicos, en términos de la energía cinética de los electrones Auger, con el análisis de concentración en función de la profundidad del material, después de hacer una erosión controlada con el cañón de argón, permite saber si se presenta una sola fase del tipo c-BN o si, adicionalmente, aparece la fase secundaria h-BN cuando las condiciones del proceso HPHT son modificadas. Se evidencia, entonces, la importancia de la espectroscopia Auger tanto en el

control de composición en nuevos dispositivos electrónicos como en su disposición final y el aprovechamiento que podemos tener de los materiales con alto valor productivo.

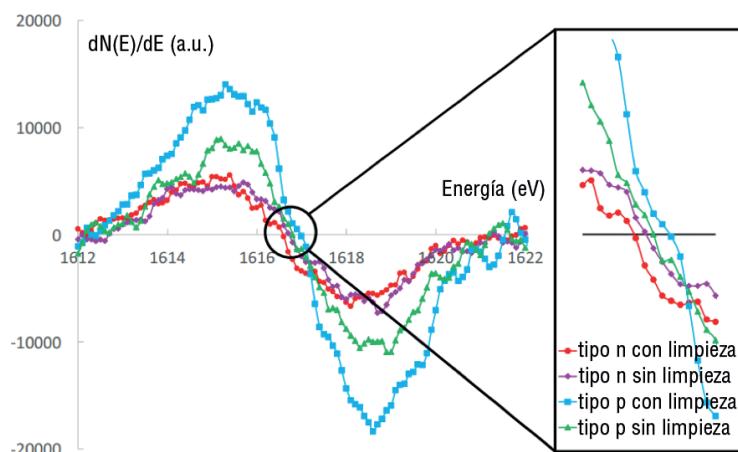
### 5.3.2 AES estudio de caso: modificación del nivel de Fermi en materiales semiconductores

La espectroscopia Auger nos permite también reconocer los cambios en la superficie del nivel de Fermi (Pantel, 1983; Klyachko,

1990; Werner, 1998; Mizuhara et ál., 2003). El conocimiento de cómo se modifica el nivel de Fermi es crucial para la elección y el óptimo funcionamiento de materiales en la industria electrónica. Es el caso de los transistores de efecto de campo tipo semiconductores de óxidos metálicos (Mosfet), fijando el valor del nivel de Fermi en un valor específico de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia; en otras palabras, dentro del *Band-gap* (Debehets et ál., 2018, Álamo, 2011). Los Mosfet son sometidos a diferentes tratamientos superficiales, lo que hace indispensable reconocer sus modificaciones estructurales en los primeros 4-50 Å, con el fin de verificar si ha existido un desplazamiento en el nivel de Fermi. En este caso, la resolución espacial de la técnica AES es de 3-30 nm, mientras la de XPS es de 150 nm a 15 mm (Hofmann, 2013). La variación en el nivel de Fermi se puede obtener de dos

formas: la primera es por la técnica de voltaje de contraste Auger (AVC) y la segunda, por electrones secundarios (SE). En AVC, los cambios en el nivel de Fermi están asociados con los desplazamientos en los picos que se detectan en AES; en el otro método, el nivel de Fermi se detecta con base en el comienzo (*onset*) del espectro de SE.

Tomemos como ejemplo específico el silicio dopado tipo *p* y tipo *n* en la industria electrónica. Estas obleas de silicio son tratadas superficialmente con ácido fluorhídrico (HF), pero así estén en atmósfera inerte, algo de aire causa modificaciones. Otros tratamientos para el silicio en la industria son el plasma en alto vacío (UHV), la sonicación con agua desionizada (Urduw), la limpieza con HF o  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ , o tratamientos donde es necesario depositar una fina capa sobre los Mosfet, entre otras (Jin et ál., 2013; Adachi y Kikuchi, 2000, A. Chanda, Verma y Jacob, 2007).



**Figura 7.** Espectros AES diferenciados del silicio presentando el pico KLL1 para ambas muestras con y sin tratamiento de limpieza. La ampliación al lado derecho muestra los puntos de cruce-cero con el eje x. Las relaciones que pueden ser derivadas entre las diferencias del nivel de Fermi y la energía cinética de los electrones Auger están descritas detalladamente por Debehets et ál. (2018). Fuente: J. Debehets et ál. (2018).

Se entiende claramente que la energía cinética de los electrones Auger en semiconductores tipo  $p$  es mayor que la medida de energía cinética para la misma transición en semiconductores tipo  $n$ . Sin embargo, el corrimiento del pico de energía de los electrones Auger puede ser observado cuando el pico del semiconductor tipo  $p$  y el del tipo  $n$  se comparan. Esta clase de mediciones es llamada *voltaje de contraste Auger (AVC)*, donde el contraste en imágenes 2D es obtenido de mediciones de picos de energía (o voltaje del pico Auger) a diferentes posiciones en una juntura  $p$ - $n$ . Entonces, tratamientos superficiales de limpieza pueden inducir cambios en el nivel de Fermi, lo que produce, a su vez, desplazamientos de los picos de energía de los electrones Auger.

El origen del ancho de pico es intrínseco para el proceso de generación de electrones Auger. Entonces, como los estados electrónicos asociados con los procesos Auger tienen un tiempo de vida media muy corto, los picos Auger suelen ser anchos. Esto es consistente con el principio de incertidumbre de Heisenberg (Vij, 2006). Por tanto, en espectroscopia AES, el espectro obtenido de forma directa es diferenciado para acentuar los picos Auger comparados con el incremento lineal de la señal de los electrones secundarios. En este tipo de espectros derivados AES, la posición del pico corresponde al punto donde la curva corta con el eje de energía, llamado punto de cruce cero.

La figura 7 muestra el espectro diferenciado AES para muestras con y sin tratamiento de limpieza de muestras de silicio con diferente dopado. Las áreas donde las curvas cortan el eje de energía se amplían para diferenciar el punto de cruce cero. El proceso de limpieza del silicio cambia la posición del Si KLL1, y el pico se desplaza hacia mayores valores de

energía para semiconductores tipo  $p$  y a bajas de energía para semiconductores tipo  $n$  (Debehets et ál., 2017). Claramente, las posiciones de los picos para ambas muestras (*as-received*) se mantienen dentro del intervalo del valor promedio de la desviación estándar asociada con la medición de la oblea de tipo  $n$ , lo que indica que no hay una diferencia significativa en la posición del pico para este tipo de muestras. Por otra parte, las muestras sometidas a tratamiento de limpieza presentan una diferencia significativa en el pico de energía de 0,46 eV, donde la desviación estándar para estas muestras está alrededor de 0,05 eV. Está claro que la diferencia en la posición de los picos AES para las dos muestras limpiadas es significativa y, por lo tanto, intrínseca a la diferencia en los niveles de Fermi.

## 6. Conclusiones

La espectroscopia de electrones Auger, desde sus inicios, ha sido la técnica más usada para encontrar impurezas en superficies y, por lo tanto, ha sido de gran importancia para la ciencia en el desarrollo de nuevos materiales.

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, que se encarga de desarrollar dispositivos electrónicos para solucionar problemas, se deben incluir dentro de sus estudios la ciencia de los materiales y técnicas modernas de caracterización de estos, puesto que en caso contrario, al no tener en cuenta las condiciones físicas y naturales a los que se va a exponer un dispositivo electrónico, se podría causar pérdida en el tiempo de diseño, implementación o toma de medidas equivocadas. Esto puede evitarse si se conocen a profundidad los materiales empleados y sus propiedades en bloque, de superficie y a nanoescala.

## Agradecimientos

Agradezco el apoyo prestado para el desarrollo de este trabajo a la Universidad Nacional de Colombia, que nos permitió el ingreso a su laboratorio de caracterización de materiales; especialmente a John Frey Pavas Arias, técnico operativo encargado de la manipulación del espectrómetro AES.

## Referencias

- Adachi, D. y Kikuchi, D. (2000) Chemical etching characteristics of GaAs(1 0 0) surfaces in aqueous HF solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 147 (12), 4618-4624.
- Albella, J. M. (2003). *Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Babu, B.R., Parande, A.K. y Basha, C.A. (2007). Electrical and electronic waste: a global environmental problem. *Waste Manage and Research*, 25, 307-318.
- Bello, I., Chong, Y. M. y Ye, Q. (2012). Materials with extreme properties: Their structuring and applications. *Vacuum*, 86 (6), 575-585.
- Chanda, A., Verma, S. y Jacob, C. (2007). Etching of GaAs substrates to create As-rich surface. *Bull. Mater. Sci.*, 30 (6), 561-565.
- Chung, Y.-W. (2012) *Practical guide to surface science and spectroscopy*. S. d.: Elsevier Academic Press.
- Debehets, J. et ál. (2018). Detecting Fermi-level shifts by Auger electron spectroscopy in Si and GaAs. *Applied Surface Science*, 440, 386-395.
- Álamo, J.A. (2011) Nanometre-scale electronics with III-V compound semiconductors. *Nature*, 479, 317-323.
- Faraldos, M. y Goberna, C. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Konstantatos, G. (2010). Nanostructured materials for phonon detection. *Nature Nanotechnology*, 5, 391-400.
- Klyachko, D.V. (1990) Auger-electron spectroscopy as a method of surface-potential barrier study. *J. Vacuu. Sci. Technol. a-Vacuu. Surfaces Films*, 8 (3), 2637-2643.
- Gramatyka, P., Nowosielski, R. y Sakiewicz, P. (2007). Recycling of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20, 535-538.
- Hofmann, S. (2013) Auger- and X-Ray photoelectron spectroscopy in materials science: A user-oriented guide. Berlín y Heidelberg: Springer.
- Jin, H., Shinotsuka, H., Yoshikawa, H., Iwai, H., Arai, M., Tanuma, S. y Tougaard, S. (2013). Evaluation of robustness to surface conditions of the target factor analysis method for determining the dielectric function from reflection electron energy loss spectra: Application to GaAs. *Surface and Interface Analysis*, 45 (6), 985-992.
- Lander, J.J. (1953). Auger peaks in the energy spectra of secondary electrons from various materials. *Physical Review*, 91, 1382-1387.
- Lorentz, H., Orgzall, I. y Hinze, E. (1995). Rapid formation of cubic boron nitride in the system Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>-h-BN. *Diamond and Related Materials*, 4 (8), 1050-1055.
- Meizhe, L., Bin, X., Lichao, C., Xiaofei, G. y Xingdong, Y. (2017). Auger electron spectroscopy analysis for growth interfa-

- ce of cubic boron nitride single crystals synthesized under high pressure and high temperature. *Applied Surface Science*, 439, 780-783.
- Mizuhara, Y., Kato, J., Nagatomi, T., Takai, Y. y Inoue, M. (2003) Analysis of dopant concentration in semiconductor using secondary electron method. *Japanese J. Appl. Phys.*, 42 (2, 6B), L709-L711.
- Morais, Jonder. (1991). Emprego da espectroscopia de elétrons Auger na otimização do crescimento de estruturas semicondutoras em MOCVD (tesis de maestría). Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Campinas, Brasil.
- Parra Sua, J. (2014). Evaluación de la resistencia a la corrosión a altas temperaturas y su comportamiento como barrera térmica de BixTixOx (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pantel, R. (1983). Auger voltage contrast depth profiling of shallow *p-n*-junctions, *Applied Physics Letters*, 43 (7), 650-652.
- Pietralunga, S. et ál. (2016, julio). Advanced spectroscopies of graphene and 2D materials. 18th International Conference on Transparent Optical Networks. Trento, Italia.
- Sodhi, M.S. y Reimer, B. (2001). Models for recycling electronics end-of-life products. *OR-Spektrum*, 23 (1), 97-115.
- Souza J. P. y Freitas, P. E. (2017). Development of new materials from waste electrical and electronic equipment: Characterization and catalytic application. *Waste Management and Research*, 65, 104-112.
- Vij, D. R. (ed.) (2006). *Handbook of applied solid state spectroscopy*. Nueva York: Springer Science+Business Media.
- Walls, J. M. (ed.) (1989). *Methods of surface analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Werner, W.S. (1998) Auger voltage contrast imaging for the delineation of two-dimensional junctions in cross-sectioned metal-oxide-semiconductor devices, *J. Vac. Sci. Technol.*, 16 (1), 420-425.
- Yang, D., Xiaorui, J., Hongshi, L., Ying-ai, L., Tiechen, Z. y Pinwen, Z. (2011). The influence of Li-based catalysts/additives on c-BN morphologies synthesized under HPHT. *Diamond and Related Materials*, 20 (2), 174-177.