

## Inversión

El platino se considera una atractiva inversión y una buena forma de cobertura de activos contra la inflación. La preferencia por el platino como inversión se está extendiendo por todo el mundo, y se basa en la relativa escasez del metal, la evolución histórica de su precio y sus fundamentos únicos. La inversión en platino se puede producir tanto en forma de futuros y opciones como en barras, lingotes y monedas.

## Usos médicos

El platino se usa en drogas anticancerígenas y en implantes. También es utilizado en aparatos de neurocirugía y en aleaciones para restauraciones dentales.

## Baterías de combustible

Las baterías de combustible son dispositivos que generan energía eléctrica y se están desarrollando en la actualidad como alternativa a los motores de combustión interna en los vehículos. La mayor parte

de estos dispositivos aplican tecnologías de membranas de intercambio de protones para producir energía a partir de hidrógeno y oxígeno, utilizando catalizadores de platino. El uso de baterías de combustible presenta ventajas tanto medioambientales como económicas. Son más eficientes en la producción de energía y la contaminación es mínima. En realidad, algunos vehículos pesados ya las están utilizando. Sin embargo, existen ciertas dudas debido al hecho de que cada vehículo que use una de estas nuevas baterías dejará de usar el catalizador convencional. El efecto neto en la demanda de platino dependerá de qué dispositivo use más platino. La investigación actual en este campo se centra en mejorar la eficiencia y reducir los costes. Las baterías de combustible pueden también generar energía estacionaria. El uso de platino en esta aplicación parece ser uno de los sectores que presenta mejores perspectivas para el futuro.

## ENLACES EXTERNOS

- Platinum Guild Internacional: <http://platinumguild.org>

- Internacional Platinum Association: <http://platinuminfo.net>
- Johnson Matthey's Platinum Today: <http://platinum.matthey.com>
- International Precious Metals Institute: <http://www.ipmi.org>
- European Metal Association: <http://www.eurometaux.org>
- US Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov>

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. "Platinum 2000", Johnson Matthey, 2000.
2. "ANGLO PLATINUM Annual Report" (diciembre, 1999).
3. "Cómo fueron descubiertos los elementos químicos", D.N. Trifonov y V.D. Trifonov, Ed. Mir, Moscú, 1990.
4. "La búsqueda de los elementos", I. Asimov, Plaza y Janés, 1983.
5. "Historia de la Química", F. Aragón de la Cruz. Ed. Síntesis, S.A., Madrid, 2004.

Elizabeth Perozo, Vanesa Calvino, Santiago Ferrera, Davinia Blasco, Laureano Costarrosa, M.<sup>a</sup> Jesús Ávila, Antonio J. López Peinado y Rosa M.<sup>a</sup> Martín Aranda  
Dpto. de Química Inorgánica y Química Técnica

## Cómo funciona un microscopio electrónico de barrido

### INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido (MEB) se basa en la utilización de un fino haz de electrones que se hace impactar contra una muestra llevando a cabo un barrido sobre la misma. Como consecuencia de esta interacción emergen de la muestra varios tipos de señales: fotones de bajas energías, rayos X, electrones Auger, electrones retrodispersados y electrones secundarios. Cada una de estas señales puede ser recogida por un detector adecuado con el fin de obtener imágenes o llevar a cabo un análisis de la composición elemental de la muestra. Para la obtención de imágenes de alta resolución se utilizan los electrones secundarios, los cuales son colectados por un detector, obteniendo,

después del procesamiento de las señales, una imagen en un tubo de rayos catódicos.

### ACERCA DE LOS ELECTRONES SECUNDARIOS

La señal que se utiliza para obtener una imagen de alta resolución en un microscopio electrónico de barrido son los electrones secundarios. Son denominados así para distinguirlos de los del haz incidente o primarios. Los electrones secundarios se originan cuando los electrones del haz incidente colisionan de forma inelástica con electrones de los átomos de la muestra. Si el electrón incidente lleva una energía superior a la energía de ligadura del electrón atómico, entonces, como resultado de dicha colisión, el electrón atómico será expulsado del átomo quedando este último ionizado. Son varios los tipos de interacciones inelásticas entre

los electrones del haz incidente y los átomos de la muestra que pueden dar lugar a electrones secundarios:

- Interacciones con electrones de la banda de conducción.
- Ionización de electrones de capas interiores del átomo, con la subsiguiente emisión de fotones de rayos X.
- Destrucción de plasmones excitados por el haz.

El proceso que genera la mayor parte de los electrones secundarios en los materiales metálicos es la interacción con los electrones de la banda de conducción. Estos electrones se encuentran débilmente ligados al átomo y es suficiente una energía de entre 1 eV y 50 eV para desligarlos.

No todos los electrones secundarios generados en el volumen de interacción son capaces de escapar de la muestra para formar la imagen. Así, una vez desligado el electrón secundario del átomo, para poder llegar a la superficie de la muestra, tiene que haber sido excitado en dirección a la misma o sufrir alguna colisión elástica que lo dirija hacia ella. Además, el electrón a lo largo de su camino sufrirá interacciones inelásticas con los electrones atómicos, consecuencia de las cuales irá perdiendo energía y frenándose. Una vez en la superficie, para salir al exterior el electrón debe superar la barrera de potencial existente en la misma, para lo cual ha de llegar con energía superior a la de dicha barrera y llevar un ángulo suficiente para que no se produzca reflexión. Como consecuencia de estas limitaciones energéticas, es decir, interacciones con electrones atómicos y el obstáculo de la barrera de potencial, los electrones secundarios emergentes poseen energías por debajo de 50 eV y, por tanto, únicamente pueden proceder de una estrecha franja de volumen cercana a la superficie de unos pocos nanómetros de espesor.

## ELEMENTOS DE UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Los elementos esenciales de los que consta un microscopio electrónico de barrido son (ver figura 1):

- Un cañón de electrones.
- Un conjunto de lentes electromagnéticas y diafragmas para enfocar el haz de electrones.
- Un sistema generador de barrido para explorar la muestra.
- Una platina portamuestras con libertad de movimientos en los ejes x, y, z.
- Un tubo de rayos catódicos donde se produce la imagen.
- Un sistema generador de vacío para evitar interacciones de los electrones con moléculas gaseosas.

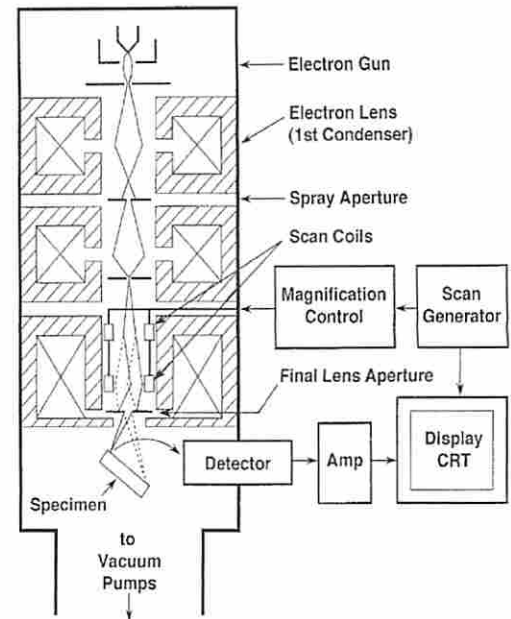


Figura 1. Esquema de un microscopio electrónico de barrido.

Los electrones son producidos en el cañón electrónico por emisión termoiónica a partir de un filamento de wolframio. Posteriormente, son acelerados por un campo eléctrico generado entre el cañón de electrones y una placa con un orificio central, que se conoce como placa anódica. El cañón de electrones se encuentra conectado al polo negativo de una fuente de alto voltaje, mientras que la placa anódica está conectada al polo positivo. En este recorrido los electrones adquieren una energía cinética, cuyo valor depende de la diferencia de potencial aplicada entre cátodo y ánodo ( $E_c = q\Delta V$ ), valor que puede variarse entre 0,1 kV y 30 kV.

Los electrones que emergen del orificio de la placa anódica recorren la columna del microscopio hasta interactuar con la muestra. En la columna existe un alto vacío para evitar que los electrones colisionen con moléculas de aire, lo cual produciría ionizaciones que causarían importantes pérdidas en el haz electrónico, así como descargas entre ánodo y cátodo que impedirían la formación de dicho haz. Del mismo modo, los electrones secundarios emergentes de la muestra podrían colisionar elásticamente con las moléculas de aire no evacuadas con lo que no llegarían al detector.

En el interior de la columna existe un sistema de lentes magnéticas y diafragmas cuyo objetivo es reducir el diámetro del haz incidente desde 5-50  $\mu\text{m}$  cuando emerge del diafragma de la placa anódica hasta 2-20 nm en el punto de exploración de la muestra. Posee para este fin, dos lentes condensadoras, que disminuyen el diámetro del haz, y varios diafragmas metálicos, cuya misión es no dejar pasar los electrones que están fuera del haz haciéndolo más homogéneo. Existe también un sistema de barrido del haz electrónico basado en la interacción de campos magnéticos y eléctricos con el haz, cuya velocidad de barrido puede modificarse a voluntad.

Una vez el haz ha interactuado con la muestra, los electrones secundarios originados son colectados por el detector. El sistema más utilizado es el escintilador-fotomultiplicador de Everhart-Thornley. Está constituido por un colector, conectado a un terminal positivo (200 V – 400 V) con el fin de atraer a los electrones secundarios con energías en torno a 50 eV y no causar desviaciones a los electrones del haz incidente, cuyas energías son del orden de kiloelectronvoltios. Los electrones son, por tanto, colectados con independencia de la dirección de salida de la muestra. Como este potencial atractivo es muy bajo, no va a coleccionar a los electrones retrodispersados con energías del orden de las del haz incidente, que no sufrirán desviación de su trayectoria recta.

A continuación del colector se encuentran: una pieza intercambiadora, que transforma la energía de los electrones secundarios colectados en energía luminosa (fotones); una guía óptica (barra de plástico, cuarzo o vidrio); y un fotomultiplicador como sistema de amplificación de la señal.

Finalmente, la señal generada a la salida del fotomultiplicador tiene una amplia longitud de onda, compatible con la frecuencia de barrido de televisión de modo que pasa al tubo de rayos catódicos, donde se modula su brillo. El barrido del haz electrónico y el barrido del tubo de rayos catódicos están sincronizados de modo que se produce una representación en la pantalla punto a punto del área explorada por el haz.

### FORMACIÓN DE LA IMAGEN A PARTIR DE LOS ELECTRONES SECUNDARIOS: CONTRASTE TOPOGRÁFICO

La aplicación más usual de la microscopía electrónica de barrido es la obtención de imágenes por contraste topográfico. Se trata de distinguir entre zonas brillantes y oscuras de la muestra aprovechando la diferente captación de electrones secundarios por el detector debido a los relieves presentes en la muestra.

En una imagen de microscopía electrónica de barrido lo que interesa es el contraste, es decir, el brillo relativo entre los diferentes puntos que forman la imagen. El brillo de la imagen de un punto de la muestra depende del número de electrones secundarios colectados por el detector. Si al detector llegan muchos electrones secundarios entonces la imagen del punto será muy brillante, en cambio, si llegan pocos, la imagen será oscura. Se obtiene de esta forma una escala de grises que conforma la imagen que se observa en la pantalla.

El número de electrones que alcanzan el detector procedentes de cada punto de la muestra depende de dos factores:

- El ángulo de incidencia del haz con respecto a la superficie de exploración.
- La orientación relativa entre el detector y la zona de exploración.

Como se ha mencionado anteriormente, la zona de producción de electrones secundarios se restringe a una estrecha franja de unos pocos nanómetros de espesor bajo la superficie. Si el haz incide en esta zona con cierto ángulo respecto a la normal, recorrerá un camino mayor y producirá por tanto más electrones secundarios que para incidencia normal (ver figura 2).

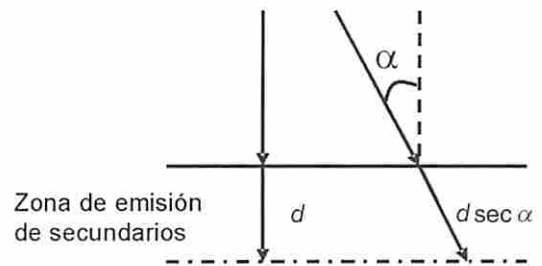


Figura 2. Diferencia en la longitud de camino del haz incidente al atravesar la zona de producción de secundarios en dirección normal a la superficie y con un ángulo  $\alpha$ .

En el caso de muestras con relieves, la incidencia del haz será distinta de la normal en zonas de pendiente, lo cual dará lugar a una mayor emisión de secundarios y por tanto una imagen de esos puntos más brillante con respecto a zonas planas, donde el haz incide perpendicularmente a la superficie (ver figura 3).

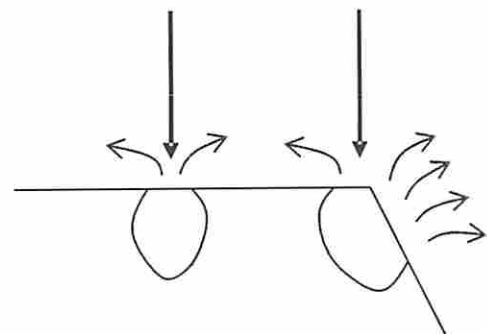


Figura 3. Emisión de electrones secundarios según el ángulo de incidencia.

Por otra parte, como puede observarse en la figura 4a, tiene gran influencia en la recepción de secundarios la orientación de la muestra respecto al detector. Así, la mayoría de los electrones que emergen de zonas orientadas hacia el detector serán fácilmente colectados por el potencial atractivo del mismo y darán lugar a imágenes más brillantes. Por el contrario, los electrones que emergen de superficies no orientadas hacia el detector no llegan a ser colectados, bien porque emergen en sentido opuesto o bien por encontrar como barrera en su camino los propios relieves de la muestra (figura 4b) y originan por tanto zonas menos brillantes.

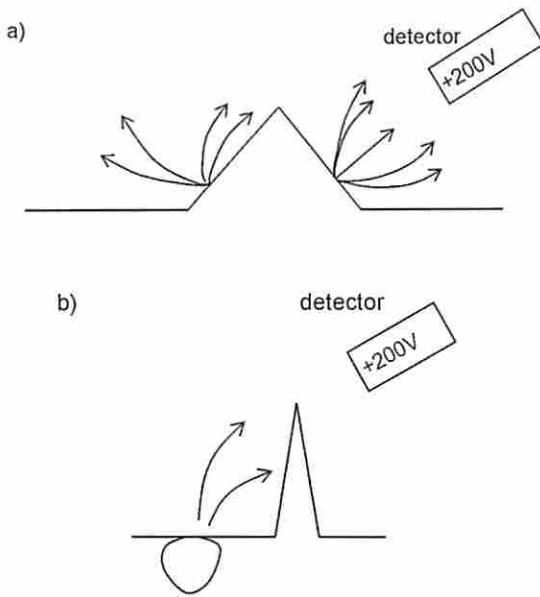


Figura 4. a) Captación de electrones secundarios según la orientación del detector. b) Efecto del relieve en la captación de electrones.

## VENTAJAS DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO SOBRE EL MICROSCOPIO ÓPTICO

Entre las grandes ventajas del microscopio electrónico frente al microscopio óptico está, por un lado, el mayor *poder de resolución* y, por otro, la mayor *profundidad de campo*.

El poder de resolución de un microscopio (óptico o electrónico) se define como la distancia más pequeña que ha de existir entre dos puntos para que puedan ser observados como dos entidades distintas.

De la teoría de la difracción se obtiene la siguiente expresión para el poder de resolución:

$$d = \frac{0,612 \lambda}{n \operatorname{sen} \alpha}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del fotón o electrón,  $n$  es el índice de refracción del medio por el que se propaga la onda y  $\alpha$  es el semiángulo subtendido entre la apertura que atraviesa la onda y el punto de exploración.

En la ecuación anterior, el factor decisivo que pone en clara ventaja el uso de electrones en lugar de fotones es la longitud de onda.

La longitud de onda asociada a los electrones, teniendo en cuenta la corrección relativista, viene expresada como:

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{2m_0c^2eV + e^2V^2}}$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $e$  la carga del electrón,  $c$  es la velocidad de la luz,  $m_0$  la masa en reposo del

electrón y  $V$  la diferencia de potencial que acelera a los electrones. Como puede observarse,  $\lambda$  varía únicamente con el potencial aplicado a los electrones, ya que los demás parámetros son constantes. Este potencial puede variarse entre 0,1 kV y 30 kV en la mayoría de los equipos, lo cual significa que la longitud de onda estará comprendida entre 0,007 nm y 0,1 nm.

En un microscopio óptico, la longitud de onda de la luz puede ir desde los 200 nm para luz ultravioleta hasta los 780 nm del inicio del infrarrojo. Por tanto, en el intervalo de energías usado en microscopía electrónica, los electrones poseen longitudes de onda mucho más pequeñas que los fotones de luz natural o ultravioleta utilizados en microscopía óptica. Como se aprecia en la expresión de la resolución, ésta es mayor (capaz de separar puntos más cercanos) cuanto menor es la longitud de onda  $\lambda$ , luego el poder de resolución será mucho mayor en el microscopio electrónico que en el óptico.

El otro factor que marca claras diferencias entre el microscopio electrónico y el microscopio óptico es la profundidad de campo.

Se define la profundidad de campo como la diferencia de altura ( $h$  en la figura 5) entre dos planos que presentan la misma calidad de foco, es decir, el rango de posiciones del objeto para las cuales el ojo no detecta ningún cambio en la definición de la imagen. Esto significa que al observar una muestra con relieves profundos tendremos enfocadas al mismo tiempo todas las estructuras  $h/2$  por encima del plano de foco óptico y  $h/2$  por debajo del mismo.

Sobrepasar esta distancia, ya sea por encima o por debajo, significa que el diámetro del haz explorador ( $d$  en la figura 5) se ha hecho mayor que el tamaño de las estructuras que se quieren resolver y, por lo tanto, se observarán borrosas.

Como ya se ha señalado, los electrones en microscopía electrónica poseen longitudes de onda mucho me-

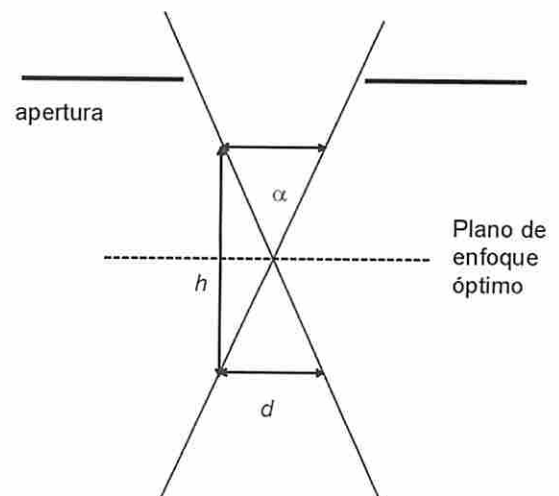


Figura 5. Profundidad de campo. Por encima de  $h/2$  y por debajo de  $h/2$  respecto al plano de enfoque óptico, la imagen se vuelve borrosa, pues el diámetro del haz explorador  $d$  es mayor que la longitud de los detalles a resolver.



nores que la de los fotones usados en microscopía óptica. Entonces se puede hacer pasar a los electrones por aperturas de diámetro mucho menor que los fotones. Por lo tanto, si la apertura es de diámetro menor, para conseguir el mismo diámetro de haz explorador  $d$ , será necesario un ángulo  $\alpha$  menor (ver figura 5) y por lo tanto la altura  $h$ , es decir la profundidad de campo, será mayor. Esto se traduce en que el microscopio electrónico puede alcanzar una muy superior profundidad de campo con respecto al óptico.

### APLICACIONES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Son numerosas las aplicaciones del MEB y en muy diferentes campos. Dentro de dichas aplicaciones cabe destacar las siguientes:

- En metalurgia se emplea para la caracterización de materiales metálicos, estudio de sus transformaciones, análisis de fallos, fractografía, etc.
- En petrología y mineralogía, para caracterización de minerales, estudio de fenómenos de zonación, intercrecimiento, desmezcla, etc.
- En la construcción se utiliza para el estudio del cemento y de las reacciones árido-hormigón.
- En cristalografía, para la caracterización de vidrios y materiales cerámicos mediante el estudio de las fases, la estructura cristalina, poros, bordes de grano, etc.

- En electrónica, para el estudio tanto de materiales semiconductores como de dispositivos (control de calidad de circuitos integrados).
- En biología, para la identificación de estructuras biológicas, complejos moleculares e incluso moléculas.
- En botánica, como ayuda para la clasificación de los diferentes grupos vegetales en sus distintas categorías taxonómicas mediante el estudio morfológico de esporas, pared celular, estomas, etc.

### BIBLIOGRAFÍA

1. Goodhew, P.J., Humphreys, J. and Beanland, R. "Electron microscopy and analysis" (third edition). Ed. Taylor & Francis, London, 2001.
2. Watt, I.M. "The principles and practice of electron microscopy" (second edition). Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
3. Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L. and Michael, J. "Scanning electron microscopy and X-Ray microanalysis" (third edition). Ed. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2003.
4. Aballe, M., López, J., Badía, J.M. y Adeva, P. "Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X". Ed. Rueda, Madrid, 1996.

Santiago Martín Fernández

Dpto. de Física Matemática y de Fluidos

## TALLER Y LABORATORIO

### Experimento casero:

### Difracción de la luz: comparación experimental de la capacidad de almacenamiento de un CD y de un DVD

#### INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la difracción consiste, básicamente, en una desviación de las ondas al rodear los bordes de un obstáculo que se interpone en su propagación. Posteriormente, las ondas difractadas interfieren unas con otras, pudiéndose originar regiones de reforzamiento (interferencia constructiva) o debilitamiento (interferencia destructiva) mutuos. Se trata de un fenómeno ondulatorio, que también puede observarse con haces de par-



Photograph of the beach at Tel Aviv, Israel, dramatically shows single-slit diffraction of ocean waves through the barrier openings. Note that the beach has been shaped by the circular wave fronts.

Photo taken by Sabina Zigman, a sophomore in physics honors class at Benjamin N. Cardozo High School, Bayside, New York. Photo submitted by her teacher, Sheldon Wirtzman.

Figura 1. Difracción de las olas del mar en una barrera artificial situada frente a una playa.