

# El sistema de haz de iones enfocados (FIB): la revolución electrónica\*

## Focused ion beam system (FIB): the electronic revolution

Andrés F. Sandoval C<sup>1</sup>. y Mikel F. Hurtado M.<sup>2</sup>

### Resumen

La ingeniería electrónica ha logrado grandes avances a lo largo de su historia, con los cuales ha mejorado la calidad de vida de las personas mediante grandes aportes a la medicina, la industria, la ciencia y el medioambiente. Esto se ha logrado a partir de investigaciones que se han llevado a cabo por décadas, y han abierto múltiples posibilidades para investigaciones futuras y nuevos desarrollos. Uno de los avances modernos más significativos logrados por la electrónica fue la miniaturización de los circuitos integrados, que transformó totalmente este campo de estudio a partir del desarrollo revolucionario del sistema de haz de iones enfocados o FIB (*focused ion beam*). El FIB es un sistema similar al microscopio electrónico de barrido o SEM (*scanning electron microscope*); la principal diferencia es que el sistema SEM permite disparar haces de electrones hacia una superficie, mientras que el sistema FIB dispara tanto haces de electrones como haces de iones de galio. El sistema FIB también es bastante empleado en la industria de los semiconductores para procesos de fabricación —de hecho, esta fue una de

sus primeras aplicaciones—; pero en la actualidad se emplea en otros ámbitos, como en litografía electrónica, micromanipulación de materiales, análisis de elementos y generación de circuitos electrónicos nanoestructurados.

**Palabras clave:** haz de iones, metal líquido, nanomanipulación, circuitos integrados, semiconductores, implantación de iones.

### Abstract

Electronic engineering has made great progress throughout its history, with these developments has improved the people quality of life, making great contributions

\* Este artículo es resultado del proyecto de investigación en estado sólido, micro- y nanoestructuras

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central. Correo: asandovalc1@ucentral.edu.co.

<sup>2</sup> Químico, magíster en Ciencias y Termodinámica, magíster en Ciencia de Materiales y Nanotecnología. Doctor en Química con Posdoctorado en Física de Nanomateriales. Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica y miembro de los grupos de investigación Spin y Maxwell. Correo: mhurtadom1@ucentral.edu.co.

to medicine, science and environment. These advances have been achieved through research that over the years leaves great strides for future research and new developments. One of the moderns advances that electronics achieved was the miniaturization of integrated circuits, and it was an advance that completely revolutionized the development of electronics due to FIB. The Focused ion beam (FIB) system is similar to a scanning electron microscope (SEM) system; but the main difference is that the SEM system shoots beam electrons towards a surface while the FIB system

shoots beam electrons and Gallium ions. Having said that, the FIB system is quite used in the semiconductor industry for manufacturing processes, which was one of its first applications after its creation, but nowadays, it is used for other application such as electron lithography, micromanipulation of materials, element analysis and creation of Nanostructured circuits.

**Keywords:** ion beam, liquid metal ion source, nanomanipulation, integrated circuits, semiconducting materials, ion implantation.

## 1. Introducción

Un haz de iones enfocados o FIB (*focused ion beam*) es un sistema que se basa en el disparo de iones de galio hacia una superficie a una velocidad muy alta con el propósito básico de cortar o agregar material a una superficie o un área de dimensiones en la escala nanométrica.

Esta técnica fue desarrollada en los años setenta, pero el primer desarrollo del sistema FIB fue a finales de los ochenta, gracias al descubrimiento de fuentes de iones de metal líquido (*liquid metal ion source*, LMIS). La principal aplicación del FIB entonces era en la industria de los semiconductores. Gracias a este sistema, se lograron grandes avances en la producción de los microprocesadores.

En la actualidad, el FIB tiene diversas aplicaciones que serán explicadas en este texto, junto con la descripción de su funcionamiento (Menozzi y Gazzadi, 2005).

## 2. Funcionamiento

El sistema FIB emite un haz de iones enfocados a una superficie. Esto lo logra mediante iones de Galio que son extraídos de una fuente de iones de metal líquido o LMIS, y luego son acelerados y enfocados por una serie de aperturas y lentes electromagnéticos. Normalmente, el potencial de aceleración está en los rangos de 5 a 30 kV y depende del tamaño de las aberturas y la resistencia de los lentes. La corriente del haz, que va desde 1 pA hasta 50 000 pA, permite producir puntos de diversos tamaños, de aproximadamente 10 a 500 nm (Langford, Petford-Long, Rommeswinkle y Egelkamp, 2002).

A continuación se presenta una breve descripción de las partes más importantes del dispositivo:

- *Fuente de iones de metal líquido (liquid metal ion source, LMIS)*. Aunque los iones se pueden obtener de otras fuentes, el método de

obtención más común se basa en un sistema con una aguja de tungsteno debajo de un reservorio de galio en estado líquido (figura 1). Debajo de esta aguja se coloca un extractor que mantiene un alto voltaje respecto a la fuente. Así se genera un intenso campo eléctrico que ioniza el galio ( $Ga^+$ ) y lo dirige a la punta de la aguja, donde se producirá la emisión de los iones. La fuente de iones generalmente se acelera a una energía entre 1 y 50 keV (kiloelectrovoltios), y se dirige hacia la muestra a través de lentes electromagnéticas.

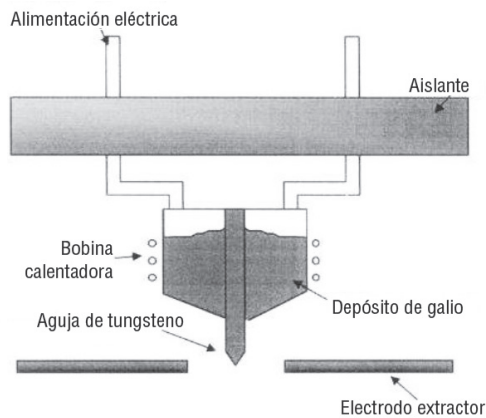


Figura 1. Fuente de iones LMIS.  
Fuente: Suutala (2009).

- *Lentes condensadores.* Guían el haz de iones provenientes de la fuente. Limitan la apertura para el filtrado y escogencia del haz.
- *Lentes objetivo.* Guían el haz de iones acelerados hacia la muestra.
- Cuando los iones acelerados penetran la muestra, hacen una transferencia de energía por colisiones nucleares y electrónicas. Si un ion o electrón llega a tener la suficiente energía como para salir de la muestra, este se emplea para reconstruir una imagen de la muestra (figura 2) (Pea y Maiolo, 2016; Saive y Muller, 2013; Xiao y Fang, 2013).

El FIB puede escribir en una superficie de dos modos: perforando la superficie o fresándola y depositando material en ella (Hemamouche y Morin, 2014).

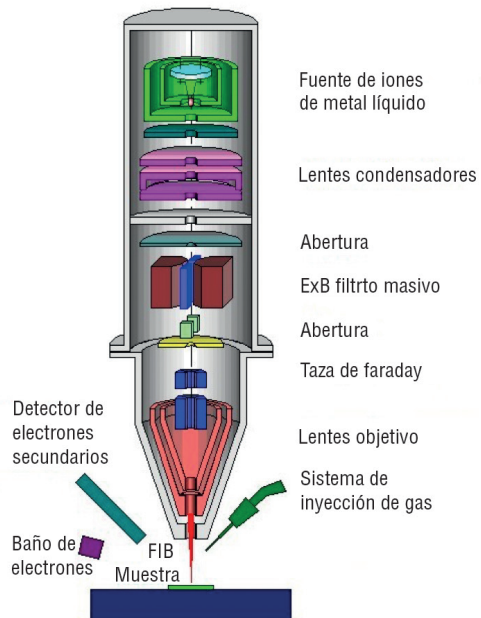
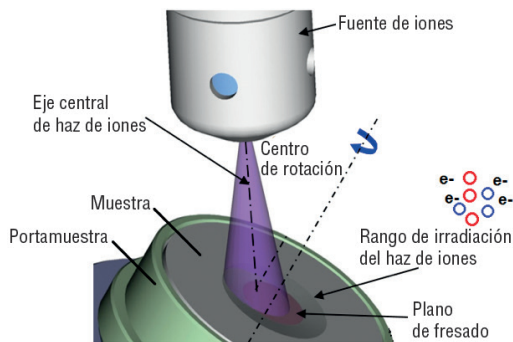


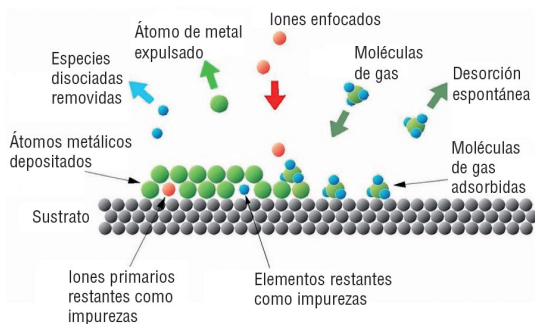
Figura 2. Secciones del sistema FIB.  
Fuente: Günthner (2009).

Para fresar, el FIB produce altas corrientes de iones en el generador principal, gracias a las cuales se puede eliminar material de la muestra por pulverización catódica. La eliminación del material se produce por los choques que se generan entre la muestra y el haz de iones, que es acelerado por el plato ( $E \times B$ ). Una ilustración del proceso de fresado se observa en la figura 3.

En la deposición de materiales, el proceso se da como una absorción de moléculas precursoras o del gas ionizante, luego los iones inducen la disociación del gas y finalmente se produce una deposición de átomos del metal y la eliminación de ligaduras del tipo orgánico. En la figura 4 se observa el proceso (Gallardo, Carvajal y Hernández, 2011).



**Figura 3.** Esquema de fresado mediante FIB.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** Deposición de material mediante FIB.  
Fuente: elaboración propia.

### 3. Evolución

En 1989, Intel introdujo y demostró la funcionalidad del primer microprocesador 80486. Luego se nombró i486DX, el cual era el primer procesador x86, con más de un millón de transistores y una velocidad de reloj de 50 MHz, características impresionantes para esa época. La fabricación de este dispositivo no hubiese sido posible de no ser por el sistema FIB, que gracias a su resolución para modificar circuitos permitió todas las adaptaciones necesarias al microprocesador para hacerlo suficientemente pequeño y eficaz (Livengood, Tan, Hack y Kane, 2011). Como resultado, la técnica FIB se volvió el principal método de depuración de productos semiconductores

de Intel y se extendió al resto de la industria electrónica.

Después de muchos años de su creación, hoy por hoy, el sistema FIB aún sigue siendo empleado en la industria electrónica para el perfilamiento, crecimiento y corte de nuevos nanomateriales y nanoestructuras. A su vez, ha impulsado significativos avances provenientes de la comprensión de técnicas cercanas, como lo son la microscopía de fuerza atómica (AFM) y la microscopía electrónica de barrido (SEM), con la ventaja adicional de que en el solo sistema FIB se pueden acoplar diferentes técnicas modernas de análisis. En el FIB se pueden mecanizar múltiples materiales semiconductores para generar circuitos electrónicos en la escala de 32 a 22 nm, proceso conocido como nanomecanizado de silicio.

### 4. Algunas aplicaciones modernas

Las figuras 5 y 6 muestran la comparación de la reconstrucción de la imagen de una muestra por electrones secundarios e iones secundarios, respectivamente. En las imágenes se observa la misma muestra que presenta corrosión, pero tomada con diferentes métodos. Se puede observar que la imagen tomada con FIB presenta una menor resolución en área, motivo por el cual el SEM es más eficiente.

La técnica FIB puede ser empleada, además, en la fabricación de diferentes estructuras a escala nanométrica, que pueden ser empleadas en la fabricación de nanocircuitos. También sirve para realizar micro- y nanomecanizado de piezas.

En las figuras 7 y 8 se observa la imagen de unos canales de microfluídica obtenidos gracias al FIB. La microfluídica actualmente tiene aplicaciones diversas, pues los fluidos a

escala micro- y nano- tienen comportamientos diferentes debido a su viscosidad. Con el desarrollo de canales de microfluídica a esta escala nanométrica, se pretenden desarrollar proyectos tales como *lab on a chip*, cuyo objetivo es realizar múltiples mediciones como las que hace un laboratorio convencional, pero alojadas en un solo chip. Esta tecnología, por ejemplo, permite detectar múltiples enfermedades o patologías en un volumen muy pequeño de muestra.

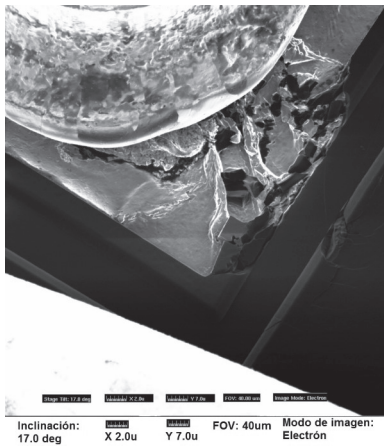


Figura 5. Muestra con corrosión tomada con SEM. Fuente: Fibics (2014).

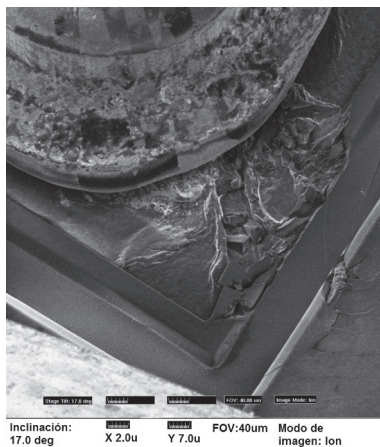


Figura 6. Muestra con corrosión tomada con FIB. Fuente: Fibics (2014).

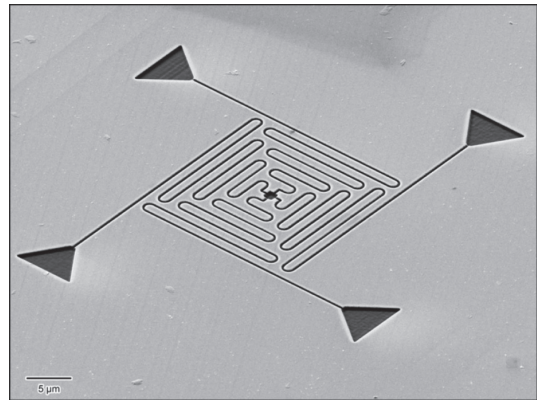


Figura 7. Canales de microfluídica hechos con FIB. Fuente: Fibics (2014).

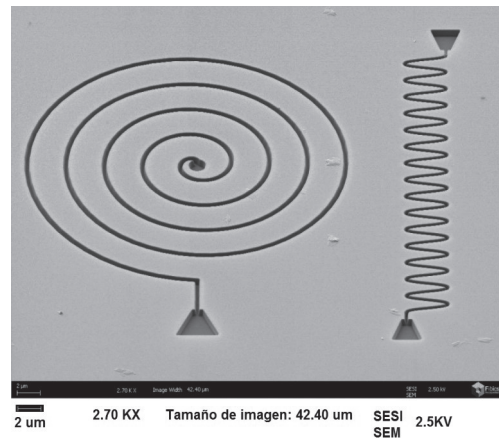


Figura 8. Canales de microfluídica hechos con FIB. Fuente: Fibics (2014).

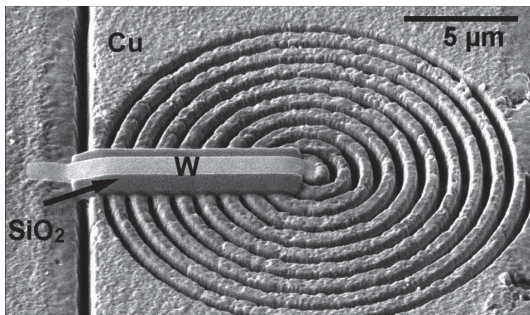
En las imágenes siguientes se pueden distinguir los usos principales del FIB, como el grabado por fresado y la deposición de material (figura 9) y el microinductor (figura 10).

El microscopio de fuerza atómica (AFM) es un dispositivo con la capacidad de generar imágenes superficiales de una muestra a partir de la interacción de fuerzas entre una punta y los átomos de una superficie. La punta de un AFM está fabricada a partir de un piezoelectrico y un semiconductor. Las puntas para generar las imágenes en AFM deben ser muy pequeñas, con el objetivo de ver pequeños cambios en la superficie, llegando incluso

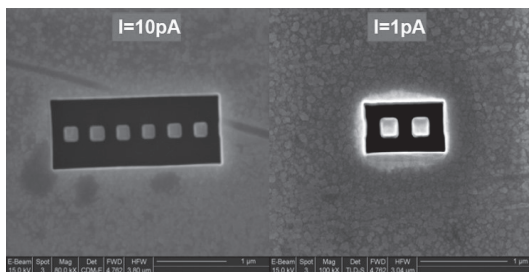
a escalas de Armstrong (figura 11). Así, para poder fabricar puntas tan pequeñas, se emplea el FIB, gracias a su resolución de fresado electrónico (figura 12).



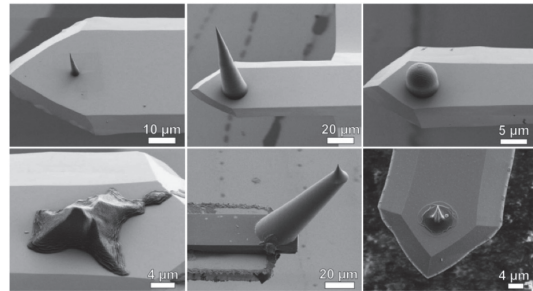
**Figura 9.** Grabado y deposición mediante FIB.  
Fuente: Fibics (2014).



**Figura 10.** Microinductor mediante FIB.  
Fuente: Romano (2007).



**Figura 11.** Diferencia generada por la intensidad de corriente del FIB.  
Fuente: Romano (2007).



**Figura 12.** Diferentes geometrías de puntas para AFM. Las puntas están compuestas de una matriz de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) y, según su aplicación, puede tener diferentes recubrimientos.  
Fuente: Hölscher (2016).

## 5. Conclusiones

La miniaturización de dispositivos electrónicos llevó a la ciencia a adentrarse en la observación y manipulación de materiales a escalas cada vez más pequeñas, en el orden de micrómetros y nanómetros. Para poder manipular elementos a estas escalas se desarrollaron técnicas y sistemas capaces de lograrlo, como, por ejemplo, el FIB.

Al manipular materiales a escalas tan pequeñas, se deben comprender principios físicos y químicos de los materiales, sin olvidar que muchos de estos fenómenos tienen desviaciones significativas en la nanoescala.

En conclusión, el sistema FIB es, en conjunto, una serie de avances tecnológicos que reúne diversos campos de la ciencia, como la física, la química y la electrónica, que interviene en su construcción. El FIB merece ser reconocido como una revolución en la electrónica porque gracias a él, aparte de lograr trabajar en nanoescala, se lograron avances en la construcción de microprocesadores y la fabricación de elementos a nanoescala para otros sistemas, como puntas para el AFM y sondas para la microscopía de efecto túnel (STM).

## Agradecimientos

Agradecemos al Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central por ofrecernos los espacios de discusión referentes a nuevas tecnologías integradas que abarcan distintas disciplinas, a través de la asignatura Estado Sólido, Micro- y Nanosistemas. Agradecemos también al clúster NBIC de la Universidad Central.

## Referencias

- Romano, A. (2007). Dual-beam focused ion beam (FIB): A prototyping tool for micro and nanofabrication. *Microelectronic Engineering*, 84, 789-792.
- Suutala, A. (2009). Focused ion beam technique in nanofabrication. Microelectronics and Materials Physics Laboratories, University of Oulu, Finlandia.
- Fibics Incorporated (2014). FIB (focused ion beam) applications (sitio web). Consultado en <https://bit.ly/2MLZdA0>.
- Gallardo, Á., Carvajal, C. y Hernández, Y. (2011). Resumen de la tecnología Ion Beam y Electron Beam. Universidad Nacional de Colombia.
- Langford, R. M., Petford-Long, A. K., Rommeswinkle, M. y Egelkamp, S. (2002). Application of a focused ion beam system to micro and nanoengineering. *Material Science and Technology*, 18 (7), 743-748.
- Hölscher, H. (2016). Tailored probes for atomic force microscopy fabricated by two-photon polymerization. *App. Phys. Lett.*, 109, 063101.
- Livengood, R., Tan, S., Hack, P. y Kane, M. (2011). Focused ion beam circuit edit. A look into the past, present and future. *Microscopy and Microanalysis*, 17 (52), 672-673.
- Günthner, T. (2009). Focused Ion Beam. Universitat de Barcelona.
- Menozi, C. y Gazzadi, G. (2005). Focused ion beam nanomachined probes for improved electric force microscopy. *Ultramicroscopy*, 104, 200-225.
- Pea, M. y Maiolo, L. (2016). Electrical characterization of FIB processed metal layers for reliable conductive AFM on ZnO microstructures. *Applied Surface Science*, 371, 83-90.
- Saive, R. y Muller, L. (2013). Doping of TIPS-pentacene via focused ion beam (FIB) exposure. *Organic Electronics*, 14, 1570-1576.
- Xiao, Y. J. y Fang, F. Z. (2013). The study of Ga<sup>+</sup> FIB implanting cristal silicon and subsequent annealing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 307, 253-256.
- Hemamouche, A. y Morin, A. (2014). FIB patterning of dielectric, metallized and graphene membranes: A comparative study. *Microelectronic Engineering*, 121, 87-91.