



Asómate a la materia: ¿qué es un semiconductor?





GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
México, la Ciudad de la Esperanza

Gobierno del Distrito Federal

Lic. Alejandro Encinas Rodríguez
Jefe de Gobierno

Lic. Francisco Garduño Yáñez
Secretario de Transportes y Vialidad

Dra. Florencia Serranía Soto
Directora General del Sistema
de Transporte Colectivo

Lic. José Alfonso Suárez del Real y Aguilera
Subdirector General Jurídico y de Seguridad
Institucional del Sistema de Transporte Colectivo



Universidad Nacional Autónoma de México

Juan Ramón de la Fuente
Rector

Enrique del Val Blanco
Secretario General

Daniel Barrera Pérez
Secretario Administrativo

René Drucker Colín
Coordinador de la
Investigación Científica

Julia Tagüña Parga
Directora General de
Divulgación de la Ciencia

Patricia Gómez Cano
Jefe del Departamento de Difusión de la
Coordinación de la Investigación Científica



Asómate a la materia: ¿qué es un semiconductor?

Julia Tagüeña Parga





Dirección General de Divulgación de la Ciencia

Coordinación editorial
Rosanela Álvarez y Juan Tonda

Diseño de la colección
Elizabeth Cruz

Corrección técnica
Martín Bonfil y Javier Crúz

Formación
Elizabeth Cruz y Kenia Salgado

Asistente editorial
Leticia Monroy

Ilustraciones
Emmanuel Vela

Primera edición, 2005

D.R. © Dirección General de Divulgación de la Ciencia
Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio Universum, tercer piso, Circuito Cultural,
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México, D.F.

ISBN 970-32-2071-1



Agradecemos el apoyo otorgado por ISA Corporativo

Impreso y hecho en México

Este libro no puede ser reproducido, total ni parcialmente, por ningún medio electrónico o de otro tipo, sin autorización escrita de los editores.



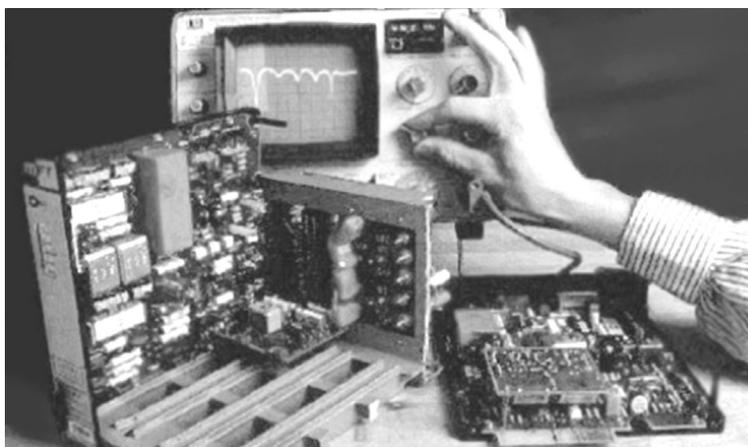
Asómate a la materia: ¿qué es un semiconductor?

“Semi” es un prefijo que viene del latín y quiere decir medio. Hay semicírculos, semiautomáticas, semifinales, seminternados... y también semiconductores.

Se puede decir que nuestra sociedad está marcada en gran parte por la tecnología de los semiconductores. Los sistemas de control, los lectores ópticos, las pantallas con luces y en general toda la electrónica del Sistema Colectivo de Transporte Metro, en el que estás en este momento, utilizan semiconductores. Desde las poderosas computadoras hasta las calculadoras de bolsillo, además de la mayoría de los aparatos domésticos, los equipos de medición de laboratorio, las asombrosas celdas solares, las fotocopiadoras y una larga serie de otras aplicaciones, tienen que ver con los semiconductores. Pero, ¿qué es un semiconductor? ¿Acaso es un “medio conductor”? Para contestar a esta pregunta lee estas páginas.



La revolución tecnológica causada por los semiconductores empieza en diciembre de 1947 cuando John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, de los Laboratorios Bell —centro de investigación de la compañía AT&T, nombrados así en honor de Alexander Graham Bell, inventor del teléfono y fundador de Bell Telephone Co., antecesora de AT&T—, construyeron el primer transistor hecho de un pedazo de germanio (elemento semiconductor) con varios contactos eléctricos sobrepuestos. El transistor mejoró enormemente el funcionamiento de los bulbos al vacío como instrumento de control, amplificación y generación de señales electrónicas. Estos científicos recibieron el Premio Nobel en 1956 y los descendientes de este primer transistor cambiaron la tecnología de nuestro mundo.



Aparatos electrónicos

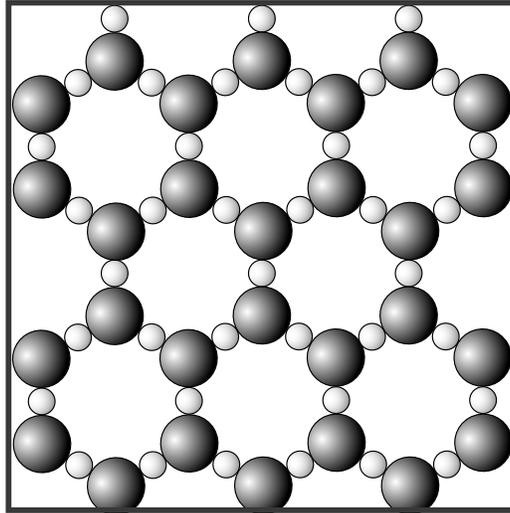
Muchas de las características de los semiconductores se observaron en el siglo XIX pero no pudieron ser interpretadas porque todavía no existía la física adecuada (llamada hoy física del estado sólido). El físico inglés Michael Faraday, pionero en experimentos de electromagnetismo en aquel siglo, tuvo mucho interés en las propiedades de los materiales. Notó con ciertos materiales, como el sulfuro de plata, que aunque sí conducían electricidad, tenían un comportamiento anómalo con la temperatura. Sorprendentemente, sus características conductoras mejoraban a medida que aumentaba la temperatura, a diferencia del comportamiento de los metales, que se vuelven menos conductores cuando están más calientes. Los físicos tardarían un siglo en explicar este hecho. También se observó que estos materiales, intermedios entre los extremos más conocidos de aislantes y conductores, eran muy sensibles a la luz, presentando la llamada *fotoconductividad*: conducían mejor al ser iluminados.

Los estudios hechos en el siglo pasado se hacían en minerales naturales impuros. Pero hacia 1940 las técnicas de crecimiento de cristales y el control del contenido de impurezas ya permitieron entender la importancia de la presencia de impurezas en los semiconductores porque se pudo manipular mejor su estructura interna como sólidos.

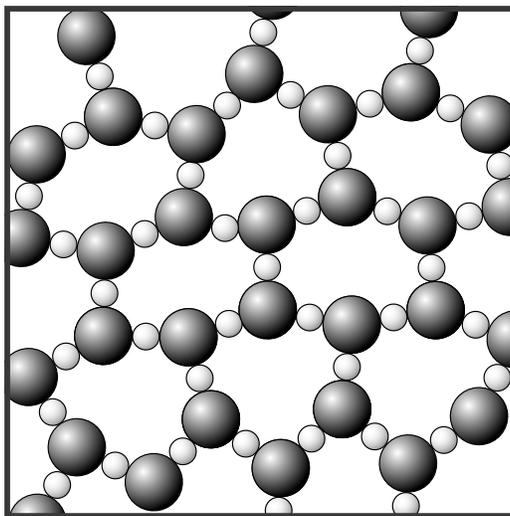
Todos tenemos una idea intuitiva de qué son los sólidos. Sabemos que nos podemos sentar en ellos y

que nos duele el pie si los pateamos. También se conocen hace mucho tiempo algunas leyes que obedecen los sólidos; por ejemplo, cómo caen. Sin embargo, el conocimiento de la naturaleza interna de los sólidos, de su comportamiento molecular, fue un misterio durante muchos siglos. De hecho, la física del estado sólido es una disciplina relativamente nueva, desarrollada en el siglo xx, gracias a los enormes avances de las técnicas experimentales — que han permitido penetrar en la materia — y a la mecánica cuántica que nos ha dado la clave del comportamiento a escalas mucho menores que la escala humana.

Es aún más reciente el interés de la física del estado sólido por estudiar materiales desordenados. Originalmente todo el esfuerzo se dirigió al estudio de los materiales llamados cristalinos, esto es, aquellos en los que los átomos o moléculas se acomodan en sitios regulares del espacio, con una cierta periodicidad, como cuando en un vagón del Metro cada pasajero ocupa un lugar para sentarse y además cada vagón tiene la misma distribución de sitios. En cambio, si los pasajeros no se sientan en estos lugares, forman un arreglo desordenado. En la figura 1 se muestra cómo moléculas de la misma composición pueden formar tanto un arreglo cristalino como uno amorfo. Sin embargo, lo que todos los materiales tienen en común es que las fuerzas responsables de



Arreglo ordenado de átomos: cuarzo.



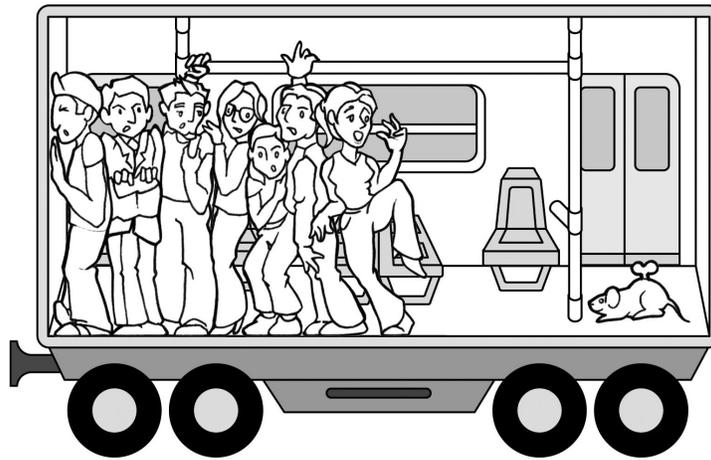
Arreglo desordenado de átomos: vidrio.

Figura 1

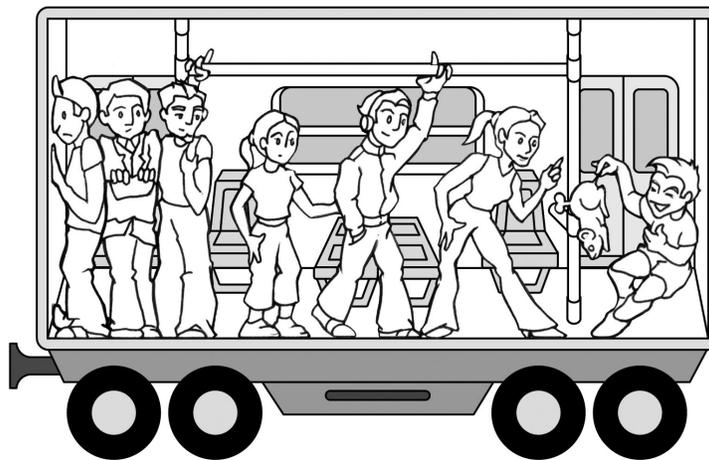
la formación de átomos, moléculas y finalmente sólidos son fuerzas eléctricas.

Es justamente por sus propiedades eléctricas que los sólidos se clasifican como conductores, semiconductores y aislantes. Todos los átomos están constituidos, entre otras cosas, por pequeñas partículas con carga eléctrica negativa, a las que llamamos electrones. Para conducir la electricidad, un material requiere electrones casi libres que puedan moverse. Los electrones en un sólido tienen valores de energía y el moverse implica poder pasar a estados vacíos.

Para entender estos conceptos vamos a utilizar una analogía entre los pasajeros del Metro (tú entre ellos) y los electrones de un sólido. Pensemos en vagones del Metro, detenidos en una estación donde los pasajeros desempeñan el papel de los electrones en sus niveles de energía dentro de un sólido. Un vagón parcialmente lleno de pasajeros representa un material conductor. Vamos a suponer que los pasajeros se asustaron con un ratón de juguete y ocuparon sólo una parte del vagón (véase figura 2). La energía está simulada por el lugar de cada pasajero y la imposibilidad de que dos pasajeros ocupen el mismo sitio reflejaría lo que los físicos llaman el principio de exclusión de Pauli. El borde de los lugares ocupados corresponde al nivel de mayor energía, llamado de Fermi. A un lado de él, los lugares están llenos; a partir de él, vacíos. Si ahora los pasajeros se dan cuenta de que es



Los pasajeros ocupan sólo una parte del vagón.



Los pasajeros pueden moverse en el vagón:
simulación de un conductor.

Figura 2

una broma y que pueden ocupar el resto de los lugares, se moverán primero los del extremo, ya que los que siguen están detenidos por esta primera capa. Al moverse los pasajeros (electrones) “conducen” la electricidad.

En cambio los electrones en un aislante se comportan como un vagón cerrado completamente lleno. Todos los estados energéticos están ocupados y aunque les pidamos que se muevan, no tienen a dónde ir. Aunque aparezca un ratón de juguete, no tienen adónde moverse. Por lo tanto, “no conducen” la electricidad (véase figura 3).

Los semiconductores están a medio camino entre los conductores y los aislantes. Presentan también una

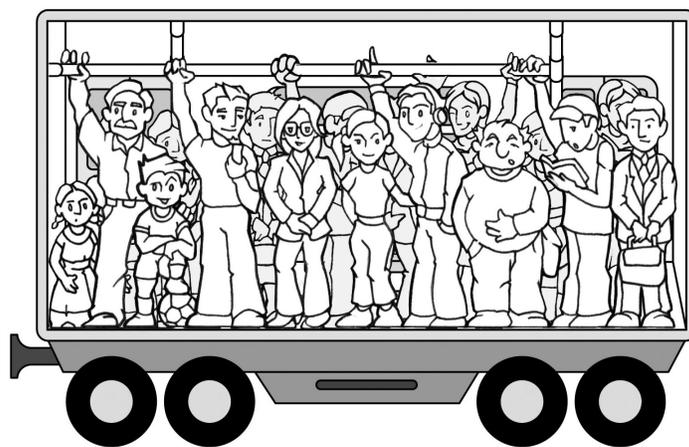


Figura 3. Los pasajeros llenan completamente el vagón. Simulación de un aislante.

conductividad eléctrica, pero diferente a la de los metales (conductores por excelencia). La conductividad metálica aumenta cuando se enfría el metal porque hay menos agitación térmica y por lo tanto menos resistencia. Si, por ejemplo, vas corriendo por los pasillos del Metro y te tropiezas con que hay trabajadores de limpieza trapeando el pasillo, se frena un poco tu carrera. Si fueras un electrón, encontrarías que aumentó la resistencia del material. El aumento de obstáculos es el efecto de la agitación térmica en los conductores. En cambio, los semiconductores se comportan de una manera inesperada: aumentan su conductividad al calentarse, como observó Michael Faraday en el sulfuro de plata en 1833. Este misterio tardó 100 años en ser resuelto, pero ahora ya lo podemos entender con nuestra analogía del Metro. Pensemos en dos vagones, conectados por una puerta estrecha (véase figura 4). El primer vagón está completamente lleno. Sin embargo, de repente se abre la puerta en el vagón vacío (equivalente al efecto de calentar un sólido) y un pasajero se cuelga al vagón donde hay lugares, dejando su “hoyo” en el vagón original. Esta división entre pasajeros y “hoyos” está favorecida por lo estrecho de la separación entre vagones. En otras palabras, gracias a la agitación térmica, apareció un “electrón” en el vagón vacío (*banda de conducción*) y un “hoyo” en el vagón lleno (*banda de valencia*). Estas parejas electrón-hoyo son las que

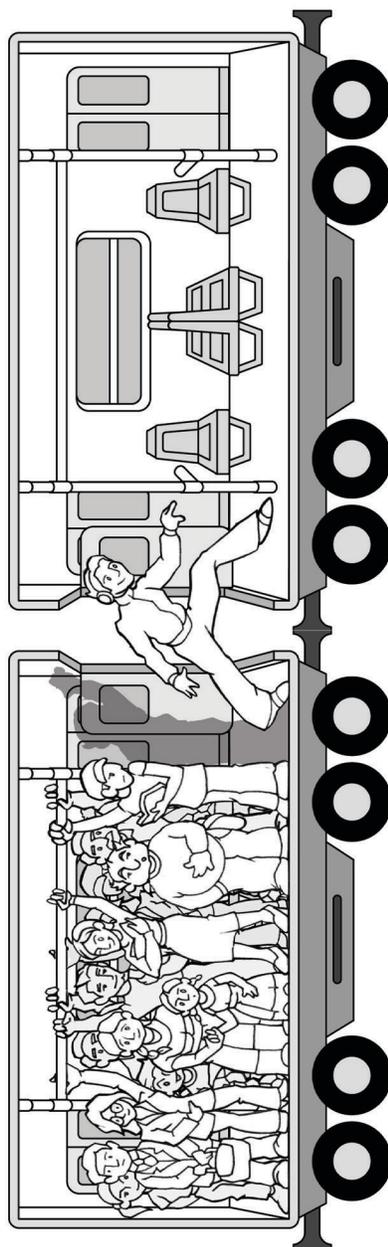


Figura 4. Un pasajero pasa a un vagón vacío dejando un "hoyo" en el vagón de origen.

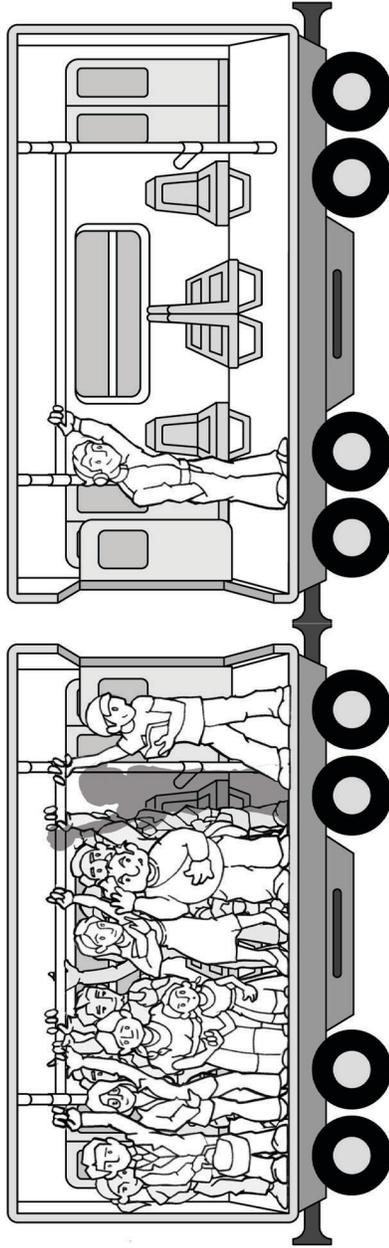


Figura 5. El "hoyo" dejado por un pasajero es ocupado por otro, quien deja un nuevo hueco detrás: los "hoyos" se mueven.

conducen en los semiconductores y como su número aumenta con la temperatura, también aumenta la conductividad del material semiconductor. Aunque un hoyo es la ausencia de carga negativa, se comporta como si fuera una partícula de carga positiva en movimiento. Cuando el pasajero se va del vagón lleno dejando un hueco, ese hoyo es ocupado por otro pasajero, quien a su vez deja un hueco detrás de sí. Es decir, el hueco aparenta moverse, pero son los pasajeros los que realmente se mueven (véase figura 5).

En un lenguaje más formal, la analogía anterior se explica con el llamado *diagrama de bandas*. Vemos ahora que los vagones representan lo que en el diagrama llamamos banda de valencia y banda de conducción. Lo interesante es que, en el caso de los semiconductores y de los aislantes, aparece una brecha prohibida o “gap” entre las bandas que los electrones tienen que saltar. En los semiconductores (puerta entre vagones) esta brecha puede ser saltada. En cambio, en el caso de los aislantes, ni subiendo la temperatura los electrones tienen suficiente energía para llegar a la banda de conducción (véase figura 6).

Poco a poco, a lo largo del siglo xx, se fueron desarrollando diferentes métodos para calcular la estructura de bandas de los diferentes materiales, introduciendo a la física conceptos nuevos. Se requería para estos avances no solamente mejor capacidad de cómputo, sino información experimental

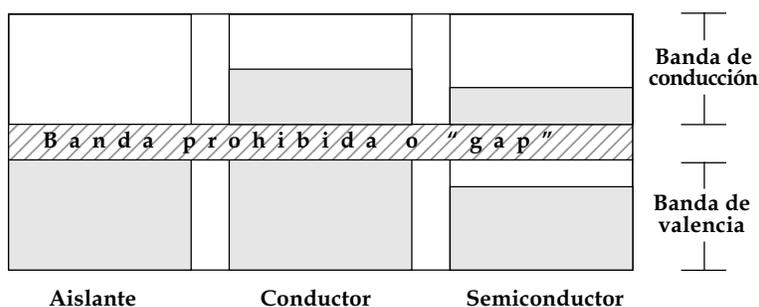


Figura 6. Esquema de "bandas de energía" de diferentes materiales.

que diera la forma de la estructura energética de los electrones.

Las analogías son sin duda importantes no sólo como apoyo al proceso de razonamiento sino para fines didácticos, y sirven para aclarar una explicación. Así, hemos usado los vagones del Metro y sus pasajeros para entender el comportamiento de los electrones. Sin embargo, no hay que olvidar que los argumentos dados se basan en cálculos bastante elaborados dentro del formalismo de la mecánica cuántica y las analogías usadas tienen limitaciones y no sirven para predecir nuevos resultados. Como en cualquier otra rama de la física, se resuelve el problema de la conducción en un sólido a partir de modelos que representan a ciertos materiales. El arte de modelar consiste en buscar la representación más sencilla que contenga las características fundamentales que queremos estudiar y requiere tener siem-

pre claras las limitaciones de nuestra aproximación. Es con la ayuda de las matemáticas que estos modelos alcanzan su capacidad de describir y predecir, y se vuelven teorías científicas.

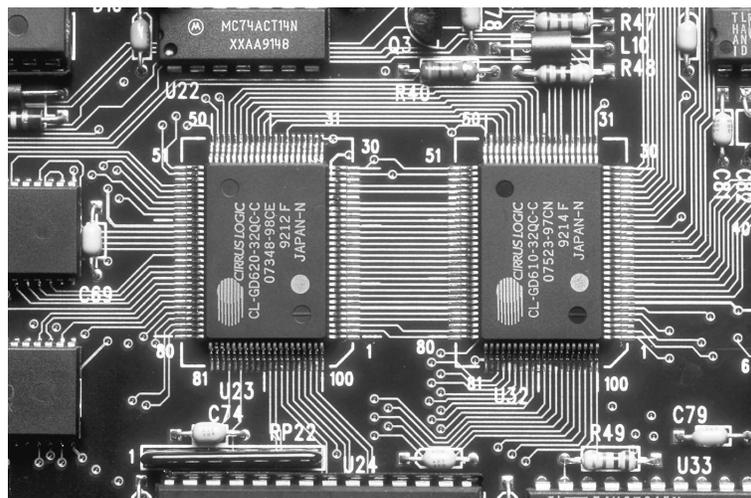
La existencia de electrones y hoyos es la característica fundamental de los semiconductores. Es claro que el hoyo no es realmente una partícula, aunque pueda parecer que se mueve como si lo fuera. Cuando un pasajero de un vagón lleno deja un hueco, inmediatamente ese espacio es tomado por otro pasajero, que deja un hueco detrás de él, con lo cual se crea la apariencia de que su hueco “se movió”. Aprovechando esta ilusión para considerar al hoyo como una partícula de carga positiva, los físicos han podido describir todos los resultados observados experimentalmente.

La primera aplicación de los semiconductores la dieron Guglielmo Marconi y Carl F. Braun, quienes recibieron el Premio Nobel en 1909 por su trabajo en telegrafía inalámbrica. Su dispositivo está formado por la unión de un metal con un semiconductor. A pesar de su éxito, tuvieron que pasar varias décadas para que los semiconductores entraran a la industria electrónica, dominada por los bulbos al vacío.

La aplicación de los semiconductores en electrónica se inicia a partir del descubrimiento de que se les puede introducir impurezas que aumenten el número de hoyos (tipo p, por “positivo”) o el número

de electrones (tipo n, por “negativos”). Estos semiconductores “envenenados” o “dopados”, como se les llama, alcanzan altas conductividades y, al unirlos, forman uniones n-p que presentan propiedades muy útiles. Por ejemplo, una de estas uniones funciona como “rectificador” que permite la corriente eléctrica en una dirección, mas no en la otra.

La investigación tecnológica avanzó lentamente al principio, pero con los experimentos realizados en secreto durante la Segunda Guerra Mundial, entre 1948 y 1949 surgió el transistor que vino a revolucionar la industria electrónica. Un transistor está hecho de combinaciones de uniones p-n-p ó n-p-n y tiene diferentes funciones. Puede amplificar señales de co-



Circuitos integrados

riente o voltaje, puede modular señales o simplemente actuar como interruptor, como en las computadoras. Debido a su tamaño reducido, a su bajo costo y a su enorme eficiencia, su aparición sustituyó en muchos casos a la tecnología de bulbos al vacío.

El uso de los semiconductores ha permitido hacer componentes electrónicos cada vez más pequeños que realizan funciones muy complejas a grandes velocidades y bajo costo. Ésa es la base de los microcircuitos electrónicos integrados. Sus aplicaciones son inmensas. Han aumentado enormemente la potencialidad de las computadoras con el uso de “*chips*” de silicio, donde se coloca un gran número de elementos electrónicos. Aquí el desarrollo tecnológico ha ido acompañado de un efecto económico, pues ha habido una gran reducción de precios.

Sin duda hay que dedicarle un párrafo al semiconductor más socorrido: el silicio, uno de los elementos más abundantes en la Tierra, componente de las arenas. Su nombre en inglés, *silicon*, le dio el nombre a la zona de industria tecnológica más famosa del mundo: el *Silicon Valley* (Valle de silicio), en California. Desde las industrias electrónicas situadas ahí nuestra sociedad se ha ido acostumbrando a las computadoras, los equipos de sonido, los DVD, los láseres semiconductores y todos esos dispositivos que llenan nuestra vida y cuyo funcionamiento analizamos muy poco.

Cuando sobre una unión n-p incide luz, entran en juego otras propiedades importantes. Se crean parejas electrón-hoyo, por un mecanismo de aumento de energía de los electrones, semejante al descrito en los vagones del Metro. Estas parejas son separadas por la barrera de la unión n-p, creándose un fenómeno llamado *efecto fotovoltaico* que sirve de base para la construcción de celdas solares.

Estos dispositivos, que convierten energía solar en electricidad, fueron inventados en 1954; en los años sesenta se empezaron a utilizar en aplicaciones espaciales y actualmente se han vuelto muy importantes en aplicaciones terrestres (véase figura 7).



Figura 7. Las celdas solares se usan en el campo y en las carreteras.

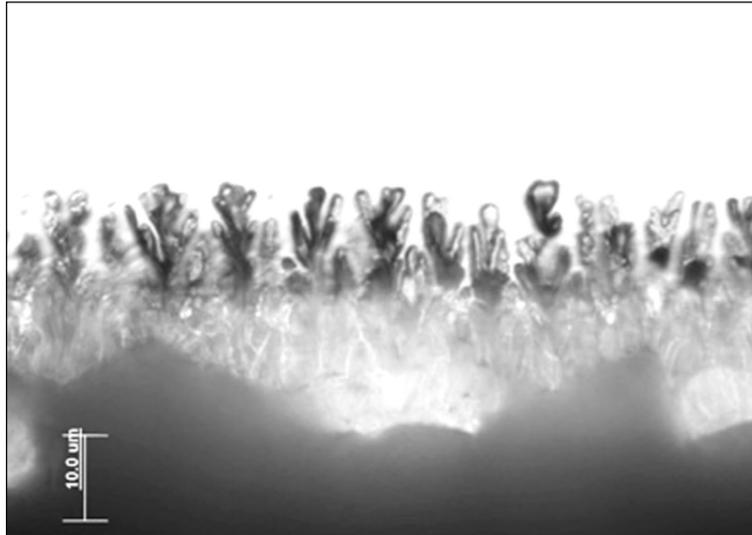


Figura 8. Muestra de silicio poroso preparada en el Centro de Investigación de Energía de la UNAM.

En el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicado en Temixco, Morelos, se realiza investigación en celdas solares utilizando diferentes semiconductores. Se ha priorizado la búsqueda de semiconductores que resulten más económicos y pueden ser colocados en áreas mayores, aunque su eficiencia sea menor.

La tecnología de los semiconductores fue sin duda la revolución tecnológica de principios del siglo anterior. Ahora, en el siglo XXI estamos en las puertas de una nueva revolución: la nanotecnología. En

este mismo Centro de Investigación de la UNAM se está trabajando en semiconductores nanoestructurados, muy pequeñitos (véase figura 8), formados por unos cuantos átomos, de tamaños de 50 a 100 nanómetros (un nanómetro se obtiene al dividir un milímetro en un millón de partes iguales). Pero eso ya es otra historia, que se contará con otro boleto.



Julia Tagüeña Parga

La doctora Julia Tagüeña, con especialidad en física del estado sólido, es investigadora del Centro de Investigación en Energía. Ha impartido clases en secundaria, bachillerato, licenciatura y posgrado. Su labor como divulgadora de la ciencia la ha realizado a través de conferencias, artículos y libros. Diseñó y supervisó la Sala de Energía del museo *Universum*. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, la Academia Mexicana de Ciencias, la Academia de Ciencias de Morelos, la Sociedad Mexicana de Física, la American Physical Society y el Institute of Physics. En 2001 obtuvo la presea Tlacaélel en la categoría de desarrollo científico, y en marzo de 2003 recibió el Premio Juana Ramírez de Asbaje. En la actualidad es directora general de Divulgación de la Ciencia de la UNAM.

