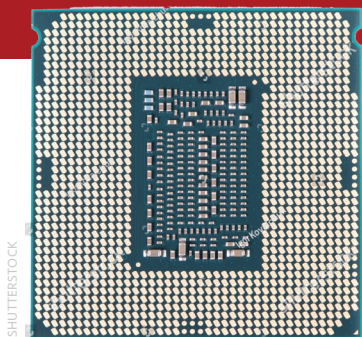


Es un mundo pequeño, muy pequeño

La química de la fabricación de microchips

Por Brian Rohrig



SHUTTERSTOCK

Su amado perro tiene tendencia a escaparse. Es hora de hacer una visita al veterinario para que le coloquen un microchip.

La mañana de su cita, la alarma de su teléfono inteligente lo despierta. La casa está helada, así que antes de salir de la cama, usa su teléfono para subir el termostato. Una taza de café humeante—perfectamente preparada según sus especificaciones—lo espera cuando baja las escaleras. Coge a su cachorro y se dirige al auto, insertando una llave con cabeza gorda—una llave con chip—en el encendido. Un satélite GPS proporciona direcciones.

El veterinario usa una aguja hipodérmica para implantar sin dolor un microchip—del tamaño de un grano de arroz, justo debajo de la piel de su perro, generalmente entre los omoplatos. Pagas con una tarjeta de crédito, con un chip incorporado, por supuesto. Ahora, si tu perro vuelve a escaparse, un simple escaneo del microchip revelará tu información de contacto.

Vivimos en la era de la "Internet de las cosas". Cada vez más nuestros dispositivos electrónicos están conectados digitalmente. En el corazón de todo se encuentra el microchip. Para entender cómo funcionan los microchips, primero debemos hacer un rápido recorrido por la tecnología que hizo posible tal cosa.

ALFABETO BINARIO DE 8 BITS ASCII II

A	01000001	N	01001110
B	01000010	O	01001111
C	01000011	P	01010000
D	01000100	Q	01010001
E	01000101	R	01010010
F	01000110	S	01010011
G	01000110	T	01010100
H	01001000	U	01010101
I	01001001	V	01010110
J	01001010	W	01010111
K	01001011	X	01011000
L	01001100	Y	01011000
M	01001101	Z	01011010

PALABRAS COMUNES EN INGLÉS EN BINARIO

HOLA

01001000 01000101 01001100 01001100
01001111 00001010

ADIÓS

01000111 01001111 01001111 01000100
01000010 01011001 01000101 00001010

GRACIAS

01010100 01001000 01000001 01001110
01001011 01010011

BIENVENIDA

01010111 01000101 01001100 01000011
01001111 01001101 01000101

TRANSISTORES

En 1947, los investigadores de los laboratorios Bell lograron un gran avance: inventaron el transistor, que reemplazó a los voluminosos y poco confiables tubos de vacío de las computadoras de primera generación. El transistor es ampliamente considerado como el mayor invento del siglo XX.

Los transistores son los componentes básicos de todas las computadoras. Al igual que el cuerpo humano contiene miles de millones de células, una computadora moderna contiene miles de millones de transistores.

La palabra transistor es una amalgama de las palabras transmisor y resistencia— pueden transmitir corriente o resistirla. Los transistores a menudo se denominan interruptores electrónicos. Los transistores no solo controlan el flujo de corriente, sino que también lo amplifican.

Al utilizar un transistor, una pequeña corriente de entrada puede crear una corriente de salida mucho mayor. Un transistor es como poner el dedo sobre el extremo de una manguera de agua, donde el agua representa los electrones en el transistor. Si cubres completamente el extremo de la manguera, no sale agua, pero si lo cubres parcialmente, el agua sale con un flujo mucho más fuerte.

Los transistores actúan como pequeños interruptores de encendido y apagado y se pueden utilizar para generar datos binarios—una compuerta abierta en un transistor puede ser “1” y una compuerta cerrada “0”. A medida que estos pequeños interruptores oscilan, pueden realizar una multitud de operaciones.

Las computadoras utilizan código binario, representando cada bit de datos como un 0 o un 1. Cualquier número o letra puede representarse con una cadena de 0 y 1. El artículo que estás leyendo se almacena en una computadora de esta manera—¡incluso las imágenes!

SEMICONDUCTORES

Los transistores están hechos de semiconductores, que pueden tener propiedades similares a las de los conductores o aislantes. La

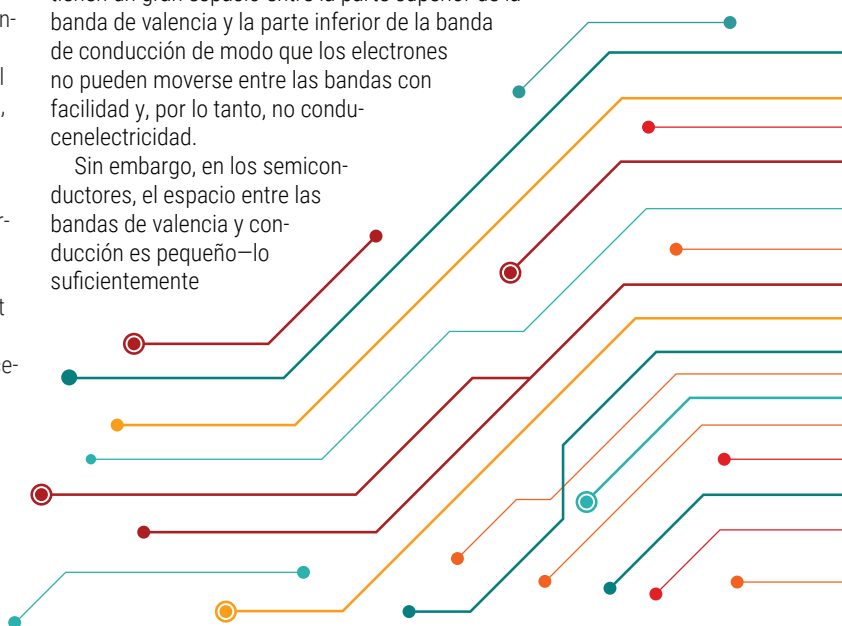
conductividad se explica mejor por la teoría de bandas. En un material sólido, los orbitales de energía similar pueden superponerse y formar una banda.

La superposición de orbitales que forman enlaces entre átomos crea una banda de energía conocida como banda de valencia. Los electrones en la capa más externa de un átomo se conocen como electrones de valencia y comprenden la banda de valencia. Como esta banda representa orbitales de enlace, tiene menor energía.

Los electrones necesitan moverse entre orbitales sin perder demasiada energía para conducir electricidad. En los metales, las bandas de valencia y conducción se superponen, lo que permite el libre movimiento de electrones entre las bandas.

La mayoría de los metales son conductores, mientras que la mayoría de los no metales son aislantes. Los aislantes tienen un gran espacio entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción de modo que los electrones no pueden moverse entre las bandas con facilidad y, por lo tanto, no conducen electricidad.

Sin embargo, en los semiconductores, el espacio entre las bandas de valencia y conducción es pequeño—lo suficientemente



pequeño en algunos semiconductores para que, cuando se calientan, los electrones de valencia puedan soltarse y permitir que los electrones se muevan entre las bandas de valencia y conducción.

PERSONALIZACIÓN DEL ESPACIO: DOPAJE

El primer transistor usaba germanio, pero hoy el semiconductor preferido es el silicio. No es casualidad que el lugar de nacimiento de la computadora moderna—el área de la bahía de San Francisco en California—se haya llamado Silicon Valley.

Sin embargo, si se aplica voltaje al silicio puro, no sucede gran cosa—a temperatura ambiente, el silicio puro es un aislante. Antes de que pueda conducir electricidad, debe ser dopado. Dopar significa agregar una impureza a la red de silicio.

Añadir un elemento al silicio que tenga más electrones de valencia que el silicio, como el fósforo o el arsénico, añade electrones adicionales a la red de silicio. Este tipo de dopaje se denomina dopaje de tipo n.

Por el contrario, dopar con un elemento con menos de cuatro electrones de valencia, como el boro o el aluminio, significa que hay un electrón menos en la banda de valencia; esta vacante de

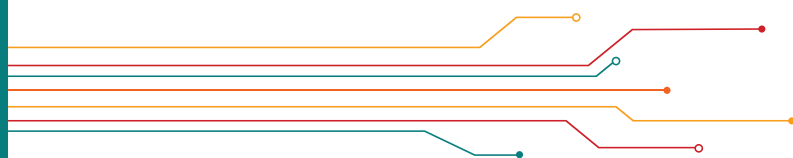
electrones se denomina "hueco". Este tipo de dopaje se denomina dopaje de tipo p.

MICROCHIPS

Los cables, una fuente de energía y un dispositivo constituyen un circuito. Los circuitos permiten que los electrones fluyan en una trayectoria controlada para que puedan realizar un trabajo útil. Si se reduce el tamaño de un montón de circuitos en una oblea muy fina de silicio, se obtiene un microchip. Una pieza clave de este circuito electrónico es el transistor.

Más transistores significa mayor velocidad de procesamiento. El mejor chip de Intel en 1985 contenía 250,000 transistores y tardaba más de cuatro horas en hacer lo que el chip actual—que contiene miles de millones de transistores—puede hacer en un segundo.

Meter esta asombrosa cantidad de transistores en un espacio tan pequeño—la mayoría de los microchips cabrían cómodamente en la uña—parece cosa de ciencia ficción. La magia tecnológica necesaria para construir un chip es tan maravillosa como ardua, y requiere cientos de pasos durante un período de tres meses.



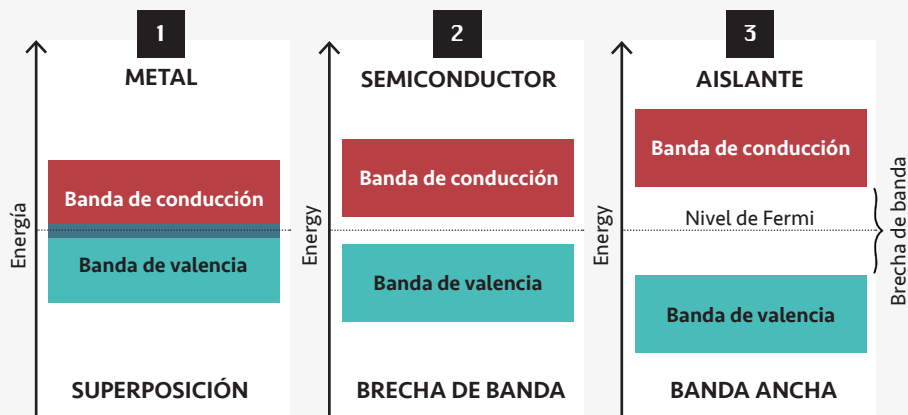
TEORÍA DE BANDAS

Nuestro concepto del átomo ha cambiado con el tiempo. Antes se pensaba que los átomos eran esferas duras e indivisibles. El modelo de Bohr mostraba a los electrones viajando en niveles de energía discretos alrededor del núcleo, como planetas girando alrededor del sol. La mecánica cuántica moderna nos enseña que los electrones existen alrededor del núcleo en orbitales. Un orbital es una descripción tridimensional de la ubicación más probable de un electrón alrededor de un átomo.

En los sólidos, los orbitales de los átomos vecinos interactúan entre sí. Esas interacciones pueden ser favorables, reduciendo la energía de la combinación de orbitales, o desfavorables, aumentando la energía de la combinación de orbitales.

Como hay muchas formas posibles en que los orbitales pueden combinarse, todas ligeramente diferentes, los orbitales idénticos discretos característicos de los átomos aislados se dispersan en bandas que consisten en muchos orbitales diferentes de energía similar.

Si la energía de estas bandas es similar, el sólido se clasificaría como conductor. Si las bandas están separadas por una pequeña cantidad de energía, se clasifican como semiconductores. Las grandes diferencias de energía en las dos bandas crean un aislante.



Imagínese una autopista dividida en carriles. Si el tráfico aumenta hasta el punto de un atasco, entonces nadie va a ninguna parte; todos los autos avanzan a paso lento prácticamente al mismo ritmo. De manera similar, a medida que los niveles de energía vecinos se llenan, los electrones dentro de todos los niveles de energía tienen una movilidad limitada dentro del sólido.

Si se abre un carril desocupado, los autos, por supuesto, se incorporarían libremente a él. En un conductor, ese carril desocupado siempre está disponible y los electrones fluyen libremente. Pero si el carril desocupado está separado de los carriles congestionados por una franja intermedia con césped, entonces los autos no pueden incorporarse libremente.

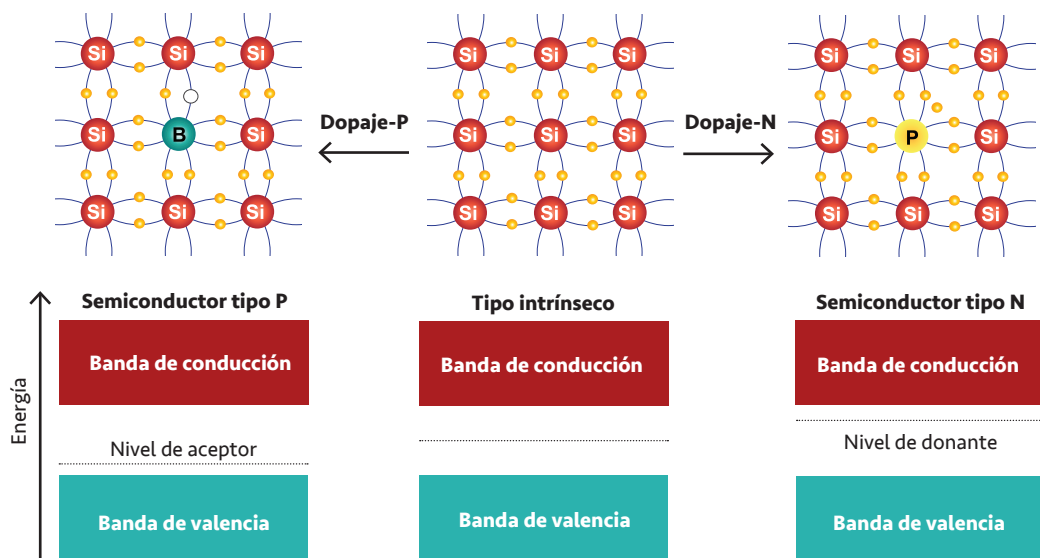
De manera similar a cómo los autos no pueden circular en esta "zona prohibida", los electrones no pueden superar la brecha entre la banda de valencia y la banda de conducción en un aislante.

Sin embargo, en los semiconductores, la brecha entre la banda de valencia y la banda de conducción es muy pequeña.

En nuestra analogía de la carretera, esta brecha podría ser análoga a una estrecha franja de pavimento que los autos pueden atravesar fácilmente. Si se les da suficiente energía, se puede hacer que los electrones salten de la banda de valencia a la banda de conducción en un semiconductor y, de esta manera, conduzcan electricidad.

DOPAJE DE SEMICONDUCTORES

La adición de un átomo con menos electrones de valencia que el silicio, como el boro, crea huecos, electrones que faltan en la banda de valencia. Esto se llama dopaje de tipo p. La adición de un átomo con más electrones de valencia que el silicio, como el fósforo, agrega electrones a la banda de conducción, creando un semiconductor de tipo n. En ambos semiconductores de tipo p y n, hay electrones con energías cercanas a las de los orbitales vacíos, lo que aumenta la conductividad.



Pero el primer paso es bastante simple: conseguir arena, y mucha. La arena (SiO_2) es la fuente del silicio en la electrónica. La arena se procesa física y químicamente hasta que se refina en lingotes de silicio que tienen una pureza de 99,9999999% de silicio—"nueve nueves" en la jerga industrial. Incluso la impureza más pequeña puede causar estragos en un sistema.

FABRICACIÓN DE UN MICROCHIP

La fabricación de un microchip es un proceso de varios pasos. Primero, el lingote de silicio se corta en obleas, que luego se limpian y se calientan para crear un recubrimiento duradero de dióxido de silicio. Luego, las obleas delgadas se recubren con un polímero sensible a la luz.

Se utiliza fotolitografía para crear un patrón que se puede grabar químicamente en el recubrimiento de dióxido de silicio para exponer el silicio puro, de modo que se pueda dopar con n o p, según sea necesario.

Este mismo proceso se repite una y otra vez en la oblea, que eventualmente se cortará en cientos o incluso miles de chips individuales. Los chips suelen tener un tamaño que va desde un milímetro cuadrado hasta un centímetro cuadrado. Una unidad central de procesamiento (CPU), que es esencialmente un microchip gigante, será más grande.

Aunque los transistores son una parte integral de un microchip, también se deben incorporar en la oblea una serie de otros componentes electrónicos, como resistencias, diodos y condensadores. Cada una de estas estructuras está grabada en el sustrato de silicio. Sin embargo, en los transistores es donde ocurre la magia: ¡un solo microchip puede contener 160 mil millones de transistores!

MAXIMIZACIÓN DEL ESPACIO

Incluso con transistores de tamaño nanométrico, solo hay un espacio limitado en una oblea de silicio. Considere lo que hacen los constructores de las grandes ciudades cuando se quedan sin espacio: construyen hacia arriba. Los microchips actuales se parecen más a rascacielos tridimensionales que a placas de circuitos bidimensionales: ¡un solo chip puede contener más de cien capas!

Todas estas capas deben conectarse entre sí, a menudo utilizando cables de cobre de un nm de espesor, pero a pesar de que el cobre es un excelente conductor, los electrones aún encuentran resistencia. Cuanto más fino sea el cable, mayor será la resistencia. La resistencia produce calor, y el calor consume energía.

En la actualidad, la investigación está pasando de hacer chips más pequeños a hacerlos más eficientes energéticamente. El uso de nanotubos de carbono en lugar de cobre ha demostrado ser prometedor; son más livianos y ofrecen menos resistencia.

Un suministro sólido de microchips presenta un problema de seguridad nacional, ya que una gran cantidad de tecnologías cruciales—piense en misiles, aviones y radares, por nombrar algunos—dependen de ellos. Desde granjas hasta fábricas, los microchips están firmemente arraigados en nuestro mundo. Sin ellos, la vida tal como la conocemos se detendría por completo y es posible que nunca encontremos a su perro.

Brian Rohrig es profesor de química y vive en Columbus, Ohio.

REFERENCIAS

- Tremblay, J. F. La química es importante para los fabricantes de chips. *Chemical & Engineering News*. <https://cen.acs.org/articles/88/i28/Chemistry-Matters-Chip-Makers.html> (consultado el 29 de abril de 2024).
- Whalen, J. Three Months, 700 Steps: ¿Por qué se tarda tanto en fabricar un chip de ordenador? *The Seattle Times*. <https://www.seattletimes.com/business/technology/three-months-700-steps-why-it-takes-so-long-to-produce-a-computer-chip/> (consultado el 29 de abril de 2024).
- Shkeer, S. Transistors: El mayor invento del siglo XX. La puesta en marcha. <https://medium.com/swlh/transistores-la-mayor-invencion-del-siglo-xx-31dbf9c2871b> (consultado el 29 de abril de 2024).
- Kilby, J. St. C. Convertir el potencial en realidades: la invención del circuito integrado (Conferencia Nobel). *ChemPhysChem* 2001, 2 (8–9), 482–489. [https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14397641\(20010917\)2:8<9%3C482::AID-PHC482>3E3.0.CO;2-Y](https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14397641(20010917)2:8<9%3C482::AID-PHC482>3E3.0.CO;2-Y)