

# Precursores de las nanotecnologías. Unas vacaciones no tomadas que cambiaron al mundo



Desde hace pocas décadas se ha manipulado la materia para producir tecnología a escala submicroscópica. Las computadoras del futuro dependerán en forma decisiva de los exitosos avances que hoy tiene la nanotecnología.

Laura Viana Castrillón y Carlos Villarreal Luján

**E**l pasado fue un siglo en el que se rompieron todos los esquemas y la civilización cambió fundamentalmente sus concepciones del mundo y su relación con éste. Los cambios ocurridos fueron tan profundos que cuesta trabajo siquiera imaginar cómo vivían las personas hace cien años. Este periodo está marcado por un gran avance en el conocimiento científico, aunado a un desarrollo tecnológico sin precedentes, sobre todo durante las últimas décadas, en que las computadoras y las telecomunicaciones pasaron a ser parte fundamental de nuestras vidas. Señala Carlos Fuentes (2002):

Entramos en el siglo XXI con una evidencia: el crecimiento económico depende de la calidad de la información, y ésta de la calidad de la educación. El lugar privilegiado de la modernidad económica la ocupan los creadores y productores de información, más que de productos materiales... Los ricos de antaño producían acero (Carnegie, Krupp, Manchester). Los ricos de hogaño producen equipos electrónicos (Bill Gates, Sony, Silicon Valley).

Significativamente, al iniciar este siglo la Academia Real Sueca de Ciencias decidió otorgar el premio Nobel de física a tres científicos que contribuyeron a sentar las bases que permitirían este sustancial avance tecnológico en la carrera por volver más rápido el envío de información y miniaturizar los componentes electrónicos que lo hacen posible. Además

de constituir el máximo honor a que un científico puede aspirar, el premio incluye una suma correspondiente a 9 millones de coronas suecas (unos 10 millones de pesos, cantidad irrisoria para un futbolista, pero no para un científico), que se repartió de la siguiente forma: el 50 por ciento para el norteamericano Jack S. Kilby, por su contribución a la invención del circuito integrado, mejor conocido como *chip* o *microchip*, y el 50 por ciento restante, dividido por partes iguales, entre el ruso Zhores I. Alferov y el alemán Herbert Kroemer, por el desarrollo de componentes opto y microelectrónicas que utilizan heteroestructuras semiconductoras. A continuación haremos una breve descripción de los trabajos que merecieron tan importante premio.

### EL CIRCUITO INTEGRADO (*CHIP*)

Las ideas de Jack St. Clair Kilby cambiaron radicalmente nuestra forma de vida: el circuito integrado, desarrollado por él, constituye la base de toda la tecnología moderna. Pero ésta no fue su única invención, según lo comprueban más de sesenta patentes registradas por él hasta ahora. También participó en el desarrollo de la primera calculadora de bolsillo y de la impresora térmica, además de haber hecho contribuciones para la tecnología de las celdas solares. Por sus inventos, Kilby fue incluido en el Salón de la Fama de los Inventores Norteamericanos, junto con Tomás Alva Edison, los hermanos Wright y Henry Ford.

Antes de la invención de los transistores, la industria electrónica estaba dominada por el uso de los bulbos (nota para jóvenes: una especie de focos con un filamento en su interior), los cuales eran frágiles, ocupaban mucho espacio, generaban mucho calor y consecuentemente consumían mucha energía eléctrica y podían fallar por sobrecalentamiento. La primera computadora que utilizó bulbos fue llamada ENIAC, y constaba de 19 mil bulbos, mil 500 relevadores o interruptores mecánicos, cientos de miles de capacitores, resistores e inductores, y requería de más de medio millón de conexiones soldadas. Esta computadora consumía 200 kilowatts de potencia, lo cual significa que mantenerla encendida durante una hora costaría aproximadamente 380 pesos más impuestos (de acuerdo con las tarifas vigentes de la Comisión Federal de Electricidad).

Posteriormente, en 1947, William B. Shockley, John Bardeen y Walter H. Brattain inventaron el transistor como sustituto del bulbo (lo cual les valió el premio Nobel de 1956). El transistor es un dispositivo electrónico que se construye a partir de un material semiconductor y que actúa como un interruptor de corriente; es mucho más pequeño y confiable que su

Por sus inventos, Kilby fue incluido en el Salón de la Fama de los Inventores Norteamericanos, junto con Tomás Alva Edison, los hermanos Wright y Henry Ford



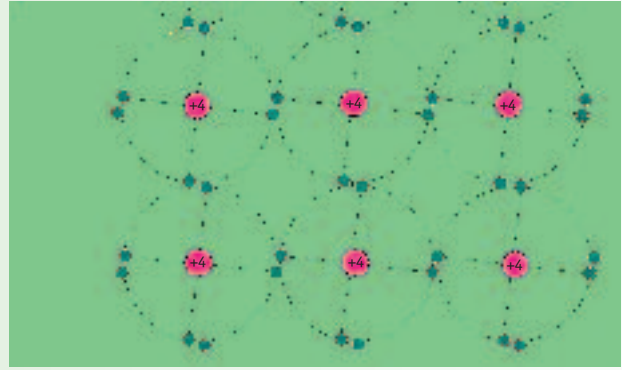
## ¿QUÉ ES UN MATERIAL SEMICONDUCTOR?

Un semiconductor es un material que tiene propiedades intermedias entre un material conductor y un aislante, de manera que si se modifica ligeramente su estructura atómica cristalina, "contaminándolo" con impurezas (es decir, con átomos de otra especie), puede comportarse como uno u otro. El material semiconductor más común es el silicio, que se encuentra en la arena común de la playa, al cual se le pueden agregar impurezas tales como arsénico, boro o aluminio.

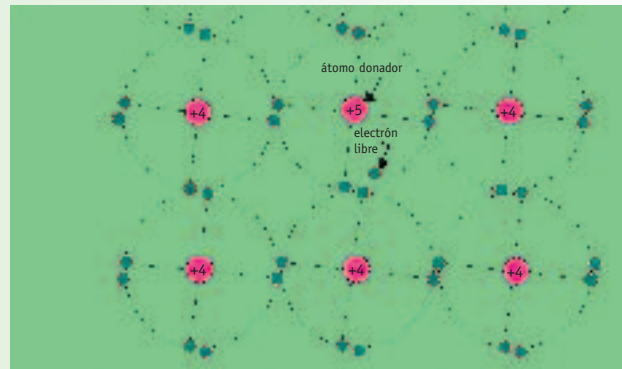
Para entender el comportamiento de un semiconductor hay que recordar que los materiales que son buenos conductores de la electricidad son aquellos elementos que tienen un solo electrón en su última capa atómica, el cual, por estar relativamente libre, puede desprenderse con facilidad y transportar su carga. Los materiales semiconductores, en cambio, están constituidos por átomos con cuatro electrones en su capa externa. Estos átomos forman cristales compartiendo sus electrones por pares con los átomos adyacentes a través de enlaces covalentes, formando una capa externa efectiva de ocho electrones.

Un semiconductor tipo *n* es aquel al que se le han añadido impurezas tales como átomos de arsénico, que tiene cinco electrones en su capa exterior. El electrón en exceso no puede aparearse para formar un enlace covalente y como resultado el material se comportará como un buen conductor.

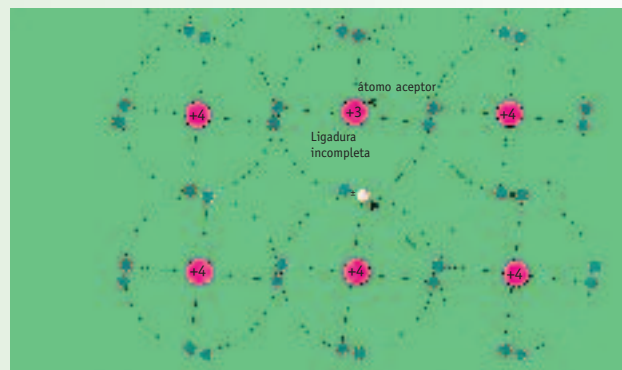
Un semiconductor tipo *p* es aquel al que se le han añadido impurezas tales como átomos de boro, que tiene tres electrones en su capa exterior. Las impurezas pueden aceptar electrones del material que forma la matriz, convirtiéndolo en conductor de la electricidad.



**Figura 1.** Los materiales semiconductores están constituidos por átomos con cuatro electrones en su capa externa. Estos átomos forman cristales compartiendo sus electrones por pares con los átomos adyacentes a través de enlaces covalentes, formando una capa externa efectiva de ocho electrones.



**Figura 2.** Un semiconductor tipo *n* es aquel al que se le han añadido impurezas tales como átomos de arsénico, que tiene cinco electrones en su capa exterior. El electrón en exceso no puede aparearse para formar un enlace covalente y como resultado el material se comportará como un buen conductor.



**Figura 3.** Un semiconductor tipo *p* es aquel al que se le han añadido impurezas tales como átomos de boro, que tiene tres electrones en su capa exterior. Las impurezas pueden aceptar electrones del material que forma la matriz, convirtiéndolo en conductor de la electricidad.

predecesor, y consume considerablemente menos energía. Con esto se inició el desarrollo de circuitos eléctricos más pequeños, en los que los transistores individuales y demás componentes electrónicos debían ser soldados uno por uno. Unos cuantos años más tarde, Kilby concibió la idea de que, dado que todas las componentes de estos circuitos podían elaborarse a partir del mismo material semiconductor, debería ser posible construirlos simultáneamente sobre una sola pieza de material, de manera que se podrían interconectar *in situ* para formar un circuito completo integrado. De esta forma, en 1958 Kilby utilizó un equipo improvisado para construir su primer circuito integrado sobre una pieza de germanio de aproximadamente un centímetro de largo, adherido a una placa de vidrio. Dicho circuito constaba de un transistor y algunos otros componentes. Cuentan que Kilby estaba recién contratado por la empresa Texas Instruments, por lo que no pudo tomar vacaciones durante ese caluroso verano. Mientras trabajaba en un laboratorio prácticamente desierto, concibió e implementó la idea del *microchip*. A partir de entonces, se dedicó a buscar diversas aplicaciones para su invento, incluyendo las comerciales, militares e industriales. El microchip contribuyó a reducir los costos de producción, además de permitir la miniaturización de las componentes electrónicas.

Simultáneamente y sin tener conocimiento del trabajo de Kilby, otro joven ingeniero llamado Robert Noyce logró desarrollar el circuito integrado. Probablemente Noyce sí tomó vacaciones ese verano, de manera que cuando acudió a la oficina de patentes para registrar su invento, se enteró de que ya había sido solicitada una patente para un circuito similar. Aunque actualmente se reconoce a ambos como inventores del circuito integrado, el premio Nobel fue para Kilby, quien logró primero este desarrollo. Kilby falleció el 20 de junio de 2005, en Dallas, Texas (justo durante la escritura de este artículo), después de una breve batalla contra el cáncer.

## LAS HETEROESTRUCTURAS SEMICONDUCTORAS

Más o menos en la misma época en que se inventó el circuito integrado, Herbert Kroemer, quien entonces trabajaba en la compañía RCA en Princeton, publicó la primera propuesta de un transistor basado en heteroestructuras. Este transistor consistía en varias capas delgadas de materiales semiconductores diferentes entre sí (de ahí su nombre: *hetero* significa “diferente”),

## CONSTRUCCIÓN DE LOS CIRCUITOS



La construcción de circuitos integrados se lleva al cabo en un “cuarto limpio”, libre de impurezas y polvo. Es muy importante el control de la contaminación en el área de preparación, debido a que las impurezas, al ser de un tamaño comparable con el de los circuitos, alteran su desempeño.

Los cuartos limpios están miles de veces más limpios que el quirófano de un hospital. Por ejemplo, un cuarto de nivel 1 debe tener menos de una brizna de polvo por pie cúbico. Para ingresar a estos cuartos, los empleados requieren del uso de una vestimenta especial, que es llamada “traje de conejito”, y para ponérsela necesitan llevar al cabo 47 pasos, los cuales incluyen el uso de dos capas de guantes.





## ¿CÓMO SE CONSTRUYE UN CIRCUITO INTEGRADO?

El procedimiento para la elaboración de los circuitos integrados es el siguiente:

1. Se prepara una oblea (*wafer*) de material semiconductor muy puro y sin defectos, sobre la cual se elaborará el circuito. En la actualidad estas obleas pueden tener un grosor hasta del orden de nanómetros o micrómetros.
2. Se cubre la oblea con una película de material fotosensible.
3. Encima de la oblea se coloca una plantilla, que deja expuesto el dibujo del circuito que se desea construir sobre el silicón.
4. Se hace incidir luz ultravioleta sobre la oblea. El uso de luz de longitud de onda corta permite que el circuito dibujado pueda tener dimensiones muy pequeñas.
5. La luz ultravioleta interactúa con la pintura fotosensible en las áreas no cubiertas por la planilla, volviéndola soluble, lo cual permite que sea retirada de la oblea, dejando sin protección el dibujo del circuito que se desea construir.
6. Se bombardea la oblea con iones cargados, muy energéticos, los cuales logran penetrar y “contaminar” al material, únicamente sobre el área descubierta por el procedimiento del punto 5.
7. Se calienta la oblea para que los átomos que se hayan desacomodado por el bombardeo puedan migrar y se reacomoden formando nuevamente una estructura cristalina que incorpore los iones introducidos por el bombardeo.
8. Si así se desea, se cubre el microprocesador con una nueva capa de material semiconductor y se repite el proceso, para construir otro circuito con una plantilla diferente.



**Figura 4.** Jack Kilby examina una oblea de 300 milímetros. El primer circuito integrado de Jack Kilby contenía un único transistor y otros componentes. Decenas de ingenieros en el mundo han trabajado en el invento de Jack, y la industria ha podido desarrollar generaciones de *chips* cada vez más pequeños, poderosos y baratos. Muchos de los circuitos integrados de hoy en día son manufacturados en obleas de 300 milímetros, que son la última novedad, y la industria continúa ofreciendo a los consumidores chips más poderosos a precios más bajos (cortesía de Texas Instruments).

y por tanto con diferentes estructuras cristalinas. El trabajo teórico de Kroemer demostraba que los dispositivos heteroestructurados podrían ofrecer un rendimiento superior al de los transistores convencionales, ya que permitían amplificar corrientes y hacer dispositivos que requerían trabajar a frecuencias altas y con una relación ruido-síñal más baja.

Pocos años después de la introducción de los heterotransistores, se lograron construir láseres basados en materiales heteroestructurados. Estos últimos fueron propuestos de forma independiente en 1963 por Zhores I. Alferov, del Instituto Ioffe de la Academia de Ciencias Rusa, y por Herbert Kroemer, quien entonces trabajaba en Palo Alto, población ubicada en el corazón de lo que ahora se ha dado por llamar el “Valle del Silicio”. A partir de entonces se desarrollaron muchos tipos de componentes mediante el uso de las heteroestructuras, incluyendo el láser llamado “de inyección”, con el cual se logró trabajar a temperatura ambiente alrededor de 1970, haciendo posible el desarrollo de las comunicaciones por medio de fibra óptica. Actualmente, las heteroestructuras son utilizadas para las comunicaciones satelitales, para mejorar la relación señal-ruido en la telefonía móvil, para el almacenamiento óptico de datos (utilizando luz para almacenar y recuperar información en discos compactos y videodiscos (CDs y DVDs), como lectores de códigos de barra, como cabezas lectoras de CDs, etcétera. El funcionamiento de nuestra sociedad contemporánea depende de manera primordial de este tipo de tecnología.

El invento de las heteroestructuras, además de haber permitido un desarrollo tecnológico sorprendente, ha constituido una herramienta de investigación muy importante en el área de la física cuántica, ya que se ha logrado construir heteroestructuras con capas cuyo grosor va desde varios átomos hasta de unos micrómetros. Al ser tan delgadas, las heteroestructuras han permitido el confinamiento de electrones en espacios sumamente pequeños: superficies, canales y en los llamados “puntos cuánticos”, que tienen longitudes características de unos cuantos nanómetros (millonésimas de milímetro).

Un ejemplo interesante de un uso futuro de los materiales heteroestructurados es el control de las fuerzas cuánticas. Por ejemplo, si se colocan dos superficies metálicas paralelas sin carga eléctrica en el vacío, aparecerá una fuerza de atracción entre ellas, la denominada fuerza de Casimir. Esta fuerza se debe a la existencia de fluctuaciones de energía cuántica, y puede ser de una magnitud considerable si las placas se encuentran separadas por distancias de unos cuantos nanómetros. Se ha mostrado que este tipo de fuerzas podría deformar una nanoestructura

La primera computadora que estuvo en operación, llamada ENIAC (1945), ocupaba un cuarto completo, constaba de 19 mil bulbos y podía efectuar del orden de 357 multiplicaciones por segundo. En 1971 Intel introdujo al mercado el primer microprocesador comercial (el 4004). Tenía 2 mil 300 transistores y era capaz de efectuar 60 mil cálculos en un segundo. A mediados de los años 90, los microprocesadores ya tenían del orden de 5.5 millones de transistores y llevaban a cabo cientos de millones de cálculos por segundo.



Figura 5. La computadora ENIAC (1945).



Figura 6. Primer circuito integrado. En 1958, Jack Kilby inventó el primer circuito integrado trabajando en Texas Instruments. Constaba de un solo transistor y otros componentes en una rebanada de germanio de aproximadamente 11 por 1.6 milímetros. El circuito integrado revolucionó la industria electrónica: casi cualquier dispositivo electrónico existente hoy en día tiene sus raíces en Dallas, hace casi 50 años (cortesía de Texas Instruments).

o alterar el funcionamiento de un micromotor (actualmente es posible construir micromotores mucho más pequeños que el grosor de un cabello humano, ¡y realmente funcionan!). Esto ha motivado a uno de los autores de este artículo, en colaboración con otros investigadores, a proponer el uso de heteroestructuras para modular las fuerzas cuánticas que aparecen en este tipo de sistemas, ya sea para aminorarlas, o mejor aún, para emplearlas utilizando sus propiedades ópticas únicas, lo cual permitiría desarrollar micromotores que funcionarían de una manera enteramente distinta a los de nuestra experiencia cotidiana.

### ¿HASTA DÓNDE LLEGAREMOS?

Este tipo de hallazgos han catalizado el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología, las cuales estudian las propiedades de la materia a un nivel intermedio entre las dimensiones atómicas (dominio cuántico) y las dimensiones de la vida cotidiana (dominio macroscópico). En la visión contemporánea, las nanociencias requieren el concurso de varias disciplinas, ya que residen en la frontera entre la física, la química y la biología, y nos ofrecen la posibilidad de crear materiales, dispositivos y sistemas con propiedades y funciones fundamentalmente nuevas.

Se ha predicho que con base en los desarrollos tecnológicos actuales, alrededor del año 2010 se llegará a un límite en la carrera por hacer *chips* más pequeños, más baratos y más rápidos. Entonces se tendrán que diseñar transistores que utilicen otro tipo de principios radicalmente diferentes, basados por ejemplo en las formas operativas de los sistemas vivos. Ya hay quienes investigan acerca de la posibilidad de utilizar el ácido desoxirribonucleico (ADN) como base para el diseño de nanoestructuras, es decir, como una herramienta que tiene la capacidad de seguir instrucciones muy precisas a fin construir este tipo de sistemas. También se investiga la posibilidad de utilizar proteínas

como nanomáquinas. Actualmente, los transistores más pequeños miden 180 nanómetros (la quinientava parte del grosor de un cabello humano); los 28 millones de transistores del procesador Intel Pentium III caben en un espacio menor que una estampilla de correo, y se piensa que el límite de tamaño que permiten las leyes de la física es cercano a 25 nanómetros. Sin embargo, también se supuso alguna vez que un tren jamás rebasaría los 60 kilómetros por hora.

Según los expertos, las nanociencias y las nanotecnologías, basadas en trabajos como los de Kilby, Alferov y Kroemer, son la puerta de entrada hacia una nueva revolución industrial. Y los países desarrollados están invirtiendo ahora miles de millones de dólares en ello. Mientras tanto, nuestras autoridades gubernamentales siguen ensimismadas en sus sueños de ingresar al primer mundo, pero sin decidirse a invertir de manera sustancial y comprometida en el desarrollo científico. Ni en mejorar la calidad de la educación.

### Bibliografía

- Fuentes, Carlos (2002), *En esto creo*, México, Seix Barral.  
<http://www.nobelprizes.com/nobel/physics/physics.html>  
<http://www.nobel.se>  
 Museo intel: <http://www.intel.com/intel/intelis/museum>  
 Esquivel-Sirvent R., C. Villarreal y G. H. Cocolletzi (2001), "Superlattice-mediated tuning of the Casimir forces", *Physical Review A* 64, 052108.  
 Esquivel-Sirvent R., C. Villarreal y L. Mochan (2002), "Casimir forces in nanostructures", *Physica Status Solidi b* 230, 409.

---

**Laura Viana** es egresada de la carrera de física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Obtuvo el doctorado en la Universidad de Manchester, donde se especializó en física estadística de sistemas desordenados. Ha realizado estudios de la teoría de vidrios de espín, redes neuronales y procesos estocásticos. Actualmente es investigadora del Centro de Ciencias de la Materia Condensada, en Ensenada, Baja California, y es madre de dos excelentes gimnastas.  
[laura@ccmc.unam.mx](mailto:laura@ccmc.unam.mx)

**Carlos Villarreal** obtuvo el doctorado en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Posteriormente realizó una estancia posdoctoral en la Duke University (Estados Unidos). Desde 1989 es investigador del Instituto de Física de la UNAM, especializado en teorías de campos cuánticos. Ha publicado trabajos relacionados con la estructura del vacío cuántico, el efecto Casimir, las interacciones entre los cuarks y la sonoluminiscencia. También realiza investigaciones en biomedicina.  
[carlos@fisica.unam.mx](mailto:carlos@fisica.unam.mx)