

Caída libre

JOHN BARDEEN Y EL NACIMIENTO DE LAS “NUEVAS TECNOLOGÍAS”

Juan Antonio López Villanueva

*Catedrático en el área de conocimiento “electrónica”
de la Universidad de Granada*

Con el fin de mantener vigente la Sección “Caída Libre” de la revista *Contraluz*, dedicada a la divulgación científica, dedico mi artículo de este número al profesor John Bardeen, aprovechando que este año celebramos el centenario de su nacimiento, y a los albores de lo que se ha venido a llamar “Nuevas Tecnologías”, en los cuales este científico participó de forma esencial.

No es John Bardeen uno de los investigadores más populares, y posiblemente sus aportaciones no han sido tan revolucionarias como las de los grandes nombres universalmente conocidos como Isaac Newton o Albert Einstein. Recuerdo las escasas noticias que se pudieron encontrar en la prensa el día de su fallecimiento, en 1991, con la excepción del programa radiofónico “Protagonistas”, cuyo director, Luis del Olmo, le dedicó una edición especial en honor a las repercusiones de su trabajo en el desarrollo de la radio. Sin embargo, el avance científico y tecnológico se debe a la participación de muchos investigadores que también contribuyen con sus pequeñas aportaciones, mereciendo por ello algo de reconocimiento. En cualquier caso, no se puede decir que el profesor Bardeen haya sido un científico de segunda división: como muestra de sus méritos, baste con mencionar que ha sido el único galardonado dos veces con el premio Nobel de Física.

ALGUNAS NOTAS BIOGRÁFICAS

John Bardeen (1908-1991) nació en Madison (Wisconsin, U.S.A.), el 23 de mayo de 1908, hace ahora 100 años. Su padre era profesor de Anatomía y Decano de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin, en Madison. Su madre falleció cuando John tenía sólo doce años. Después de completar sus estudios de educación secundaria en la Escuela Central de Madison, en 1923, John Bardeen se matriculó en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Wisconsin, en la cual cursó múltiples asignaturas extra de Matemáticas

y Física. Tras un periodo de trabajo en el departamento de Ingeniería de la Western Electric Company, en Chicago, se graduó en Ingeniería Eléctrica en 1928. Continuó entonces como ayudante de investigación durante dos años, trabajando en la solución de problemas matemáticos en geofísica aplicada y en radiación desde antenas. Durante este periodo recibió su primera introducción a la Teoría Cuántica por parte del Profesor J.H. Van Vleck.

Bardeen se desplazó a los Gulf Research Laboratories, en Pittsburgh, Pennsylvania, durante los años 1930-1933, siguiendo al profesor Leo J. Peters, su director entonces en los trabajos sobre geofísica, que había obtenido un puesto en esos laboratorios. Durante esos años se dedicó al desarrollo de métodos para la interpretación de sondeos magnéticos y gravitatorios, en una época en la que estas técnicas se aplicaban por primera vez en las prospecciones petrolíferas. Pero esta labor no debía satisfacer plenamente su interés, y la dejó para graduarse en Física Matemática en la Universidad de Princeton, la misma en la que fue profesor Albert Einstein, y donde enseñaba el profesor E.P. Wigner, gran pionero en la física de los materiales sólidos. De 1935 a 1938, John Bardeen obtuvo un puesto en la Universidad de Harvard, donde trabajó en problemas sobre cohesión y conducción eléctrica en metales. Mientras tanto, defendió su tesis doctoral en Princeton, en 1936.

Bardeen se casó en 1938, y desde ese año hasta 1941 fue profesor ayudante de Física en la Universidad de Minnesota. Con motivo de la participación americana en la segunda guerra mundial, se incorporó como físico al Laboratorio de Artillería Naval, en Washington, donde permaneció desde 1941 hasta 1945. Durante este periodo de guerra estudió los campos de influencia de los barcos para aplicaciones en artillería submarina y barrido de minas. Después de la guerra, a finales de 1945, se unió al grupo de investigación en materiales sólidos de los laboratorios de la Bell Telephone, comenzando una etapa central para este artículo, y en la que me detendré más adelante.

LA ELECTRÓNICA, ANTES DE 1947

En la época en la que Bardeen se incorporó a los laboratorios Bell, la electrónica había experimentado ya un desarrollo importante. Un dispositivo esencial en este avance previo fue el triodo, inventado por Lee de Forest en 1906. Consiste este elemento en una ampolla de vidrio, herméticamente cerrada, en la cual se habían introducido varios electrodos y se había hecho el vacío. Los electrodos principales eran tres: el cátodo, el ánodo y la rejilla. El cátodo emitía electrones cuando se calentaba. Estos electrones que podían desplazarse hasta ser recogidos por otro de los electrodos, llamado ánodo, que se polarizaba a un potencial eléctrico más positivo, transmitiendo así una corriente eléctrica entre ambos. El tercer electrodo, llamado rejilla, se situaba entre el cátodo y el ánodo y actuaba como elemento de control: variando el potencial eléctrico de la rejilla se podía



Figura 1: Fotografía de un tubo de vacío

modular la corriente principal que fluía entre ánodo y cátodo. De esta manera, una señal débil que actuara sobre la rejilla, procedente por ejemplo de un micrófono, podía modular una corriente importante entre ánodo y cátodo cuyos efectos se podían recoger actuando sobre un altavoz. El resultado era un circuito amplificador, que resultó básico para el desarrollo de la radio y de la televisión. Quizá algunos de los lectores recuerden aquellos receptores con tubos de vacío, también llamados válvulas o “lámparas”, que necesitaban un periodo de calentamiento después de conectarlos antes de que apareciera la imagen, precisamente para calentar el cátodo del que he hablado antes. También podrán recordar la vida relativamente corta de esas “lámparas” (triodos, o elementos similares un poco más avanzados, llamados pentodos), que obligaban a recurrir al técnico varias veces durante la vida del aparato para reemplazarlas.

Pero no sólo se podía usar el triodo para construir amplificadores. Con un potencial eléctrico suficientemente alto aplicado a la rejilla se podía interrumpir la corriente eléctrica entre ánodo y cátodo, mientras que con un potencial bajo se permitía el paso de una corriente elevada. El resultado era un interruptor o conmutador electrónico, cuya apertura y cierre se controlaban también electrónicamente. Un conmutador electrónico era el elemento básico que se necesitaba para construir sistemas electrónicos digitales, por ejemplo, ordenadores.

Precisamente el primer ordenador digital electrónico se construyó con estas válvulas o tubos de vacío. Se trataba del ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer). Este equipo fue ensamblado en 1945 en la universidad de Pensilvania (U.S.A.), como resultado de un contrato firmado con el Gobierno en 1943 para realizar cálculos de trayectorias de proyectiles. Constaba de 30 unidades separadas, además de un sistema de gran potencia para alimentar a esas unidades y de un sistema de aire forzado para su refrigeración. Incluía 19.000 tubos de vacío, 1.500 relés y casi un millón de componentes pasivos (resistencias, condensadores, ...), consumía casi 200 kilowatios de potencia (equivalente a la contratada hoy por más de 40 viviendas), y podía realizar unas 5000 sumas y 300 multiplicaciones por segundo, es decir, tenía una velocidad de cálculo un millón de veces inferior a la de un ordenador portátil actual.



Figura 2: El ENIAC, primer ordenador electrónico digital. Incluía 19.000 tubos de vacío y ocupaba una sala de 100 m²

Paralelamente al desarrollo de los tubos de vacío y de los sistemas contruidos con ellos, también se fue avanzando en la comprensión de las propiedades de los materiales semiconductores, que iban a ganar protagonismo en la segunda mitad del siglo XX. Se trataba de materiales en muchos casos de apariencia metálica, aunque mostraban notables diferencias con los metales en su comportamiento eléctrico. Por una parte, si se conseguían fabricar con muy alto grado de pureza, solían presentar una conductividad eléctrica muy baja a temperatura ambiente, que crecía rápidamente al elevarse la temperatura, a diferencia de los metales cuya conductividad eléctrica es muy alta y desciende ligeramente conforme la temperatura crece. Pero desde el punto de vista de sus aplicaciones tecnológicas, la propiedad determinante de los semiconductores es la facilidad con la que se puede controlar la conductividad eléctrica mediante la adición de impurezas apropiadas. Si tomamos como ejemplo el silicio, semiconductor más utilizado en la actualidad, podemos multiplicar su conductividad diez millones de veces con añadir tan solo un átomo de fósforo por cada cien mil átomos de silicio, es decir, en una proporción insignificante. Además, los semiconductores pueden presentar dos tipos de conductividad. Si se añaden al silicio impurezas de fósforo o de arsénico, átomos que tienen un electrón extra con respecto a los del silicio, estos electrones adicionales se pueden mover con mucha facilidad en el material dando lugar a una corriente eléctrica formada por el desplazamiento de cargas negativas. Por otra parte, si las impurezas que se añaden son de boro o de aluminio, átomos que tienen un electrón de valencia menos que los de silicio, cada impureza resta un electrón de los que forman los enlaces químicos en el material dejando una especie de burbuja en el mar de electrones denominada "hueco". Los huecos se mueven como si tuvieran carga eléctrica positiva, de la misma manera que la acción de la gravedad empuja hacia arriba a las burbujas de gas en una copa de cava, como si se tratara de bolitas de masa efectiva negativa. Controlando la cantidad y el tipo de impurezas que añadimos al semiconductor podemos controlar no sólo la magnitud de la conductividad, sino también su tipo, es decir si se debe a partículas de carga negativa o de carga positiva. Estas propiedades se comenzaron a entender bien mediante la teoría cuántica de los sólidos, desarrollada a partir de 1930.

Podemos concluir que desde principios del siglo XX se habían ido asentando muchas de las bases del desarrollo de la electrónica, pero aún faltaba el elemento apropiado para propiciar el gran despegue. Ese elemento iba a ser el transistor.

EL NACIMIENTO DEL TRANSISTOR

John Bardeen fue contratado por los laboratorios Bell en 1945, a propuesta de William Shockley, que estaba formando un nuevo equipo de investigación en esa compañía. Bardeen aceptó rápidamente la propuesta, entre otros factores porque se le ofreció el doble del salario que percibía en la Universidad de Minesotta, y se desplazó a New Jersey con su familia. Allí se reencontró con otro miembro del grupo, Walter Brattain, algo mayor que él, con quién sintonizó de forma perfecta en el aspecto personal, fraguándose entre ellos una amistad que duraría muchos años, y también en el laboral, formando una pareja

perfectamente complementada en la cual Brattain llevaba a cabo los experimentos y Bardeen elaboraba teorías para explicar los resultados.

En la primavera de 1947, Shockley les pidió a Bardeen y Brattain que explicaran por qué no funcionaba un amplificador basado en un material semiconductor que él había ideado. Bardeen aprovechó los conocimientos sobre las propiedades cuánticas de los semiconductores que había adquirido en Princeton para elaborar nuevas teorías sobre ese dispositivo. Observando los resultados de los experimentos de Brattain, comprendió el importante papel que estaba desempeñando la superficie del material, y la necesidad de controlar las propiedades de conducción en la región próxima a esa superficie. El 23 de diciembre de 1947 consiguieron modular la corriente entre dos electrodos muy próximos apoyados sobre una base semiconductor mediante el potencial eléctrico aplicado a esa base. Se trataba del primer dispositivo amplificador de estado sólido de la historia, conocido como transistor de puntas de contacto, cuya operación pudo demostrarse experimentalmente. Este primer prototipo se muestra en la figura 3 (izquierda): para conseguir los dos contactos próximos adherieron una lámina de oro alrededor de la punta de un soporte aislante triangular y separaron los dos contactos haciendo una ranura a esa lámina mediante una hoja de afeitar. Las dos tiras laterales en las que quedó dividida se conectaron al circuito externo mediante hilos eléctricos. A la derecha de la figura 3 se muestra a William Shockley (sentado), John Bardeen (al lado) y Walter Brattain (detrás) observando el dispositivo.

Rápidamente se desarrolló otra versión del transistor: Shockley, que a pesar de dirigir el grupo y haber sugerido la idea, se había quedado fuera de la patente, se dedicó a trabajar por su cuenta con algo de resentimiento e ideó una nueva versión del transistor más robusta y estable. En este caso tanto el contacto que actuaba como emisor de la corriente eléctrica como el que la recogía (llamado colector), así como el trozo de material que controlaba ese flujo de corriente (llamado “base”, por analogía con el transistor de puntas de contacto), se fabricaban dentro del mismo bloque semiconductor simplemente cambiando el tipo de impurezas entre ellos, y la corriente fluía en el volumen y no cerca de la superficie, de forma mucho más estable y controlada. Se conoce a este dispositivo como transistor bipolar de unión, y fue el primero que terminaría comercializándose.



Figura 3: Fotografía del primer prototipo de transistor (izquierda). William Shockley (sentado), John Bardeen (en pie, al fondo), y Walter Brattain (en pie, detrás), observando el dispositivo

Se había conseguido un dispositivo que podía sustituir a los tubos de vacío (el triodo o el pentodo) con varias ventajas: era más pequeño, mucho más robusto y fiable, al estar fabricado todo él en un material de propiedades casi metálicas, y con una vida mucho más larga. Los laboratorios Bell lo dieron a conocer con prontitud, y permitieron a otras compañías su fabricación, de manera que en los años 50 ya eran comercializados por diversas firmas, como General Electric, RCA, Transitron, Texas Instruments y Sony. El semiconductor utilizado inicialmente fue el germanio, aunque pronto fue sustituido por el silicio: los primeros transistores comerciales de silicio fueron producidos por Texas Instruments en 1954.

Además de las ventajas que aportaban los transistores como sustitutos de los tubos de vacío, la compañía japonesa Sony pronto les encontró una aplicación específica, en la que las válvulas no eran útiles: la radio de "bolsillo", comercializada en 1955. Al ser más pequeños que los tubos de vacío, requerir menor tensión de alimentación y no necesitar calentamiento previo, los transistores podían utilizarse como amplificadores en sistemas de dimensiones reducidas alimentados mediante pilas. El éxito de estas radios pequeñas fue enorme, y en España se las comenzó a denominar por el nombre del componente que las había hecho posibles, de manera que incluso hoy día, cincuenta años después, todavía hay mucha gente que piensa en una radio a pilas cuando oye la palabra transistor.

Debido a este gran éxito inicial, y mucho antes de que se comenzaran a vislumbrar las grandes consecuencias que el transistor iba a traer al desarrollo tecnológico en la segunda mitad del siglo XX, William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain obtuvieron el Premio Nobel de Física en 1956, el primero que se concedía por la invención de un dispositivo de ingeniería.

EL DESARROLLO POSTERIOR

A partir de la obtención del transistor, la vida de sus inventores siguió rumbos muy diferentes. El primero que dejó los Laboratorios Bell fue precisamente John Bardeen. William Shockley, que seguía sin perdonar el haberse quedado fuera de la patente del transistor de puntas de contacto, comenzó a bloquear su participación en aquellos proyectos que más podían interesarle, de manera que cuando John Bardeen recibió una muy suculenta oferta para incorporarse a la Universidad de Illinois, en 1951, no dudó en aceptarla.

Tampoco William Shockley permaneció muchos años más en la Bell Telephone. En 1955 aceptó una oferta de la compañía Beckman para crear una empresa de fabricación de transistores en California, de manera que se desplazó de costa a costa para fundar el Shockley Semiconductor Laboratory, en Palo Alto, California, precisamente de donde era originario. Shockley reclutó personalmente y formó a un equipo joven y multidisciplinar, entre los que se contaban Robert Noyce, Gordon Moore y Jean Hoerni, de quienes hablaré más adelante. Sin embargo, tal y como reconoce Gordon Moore en un artículo reciente, a pesar de su excepcional intuición física y de la enorme facilidad con la que podía entender

e idear los dispositivos electrónicos, Shockley no era muy afortunado en la dirección de equipos humanos, y sus decisiones pronto comenzaron a generar cierto malestar. Sólo dos años después de su incorporación, ocho miembros del grupo, Noyce, Moore y Hoerni incluidos, comenzaron a pensar que Shockley era un obstáculo para el desarrollo de la compañía y decidieron fundar su propia empresa. Así nacería Fairchild Semiconductor, en 1957. Shockley se refirió a ellos como “los ocho traidores”.



Figura 4: Los ocho fundadores de Fairchild Semiconductor, en 1959.
De izquierda a derecha: Gordon Moore, Sheldon Roberts, Eugene Kleiner,
Bob Noyce, Victor Grinich, Julius Blank, Jean Hoerni, y Jay Last

La fundación de Fairchild es un ejemplo interesante que merece la pena detallar. Uno de los miembros del grupo contactó con Hayden Stone, una sociedad inversora de Nueva York, y le propuso la idea. Dos de los socios les ayudaron a buscar inversores, y contactaron con Sherman Fairchild, que parecía ser un enamorado de la nueva tecnología y les presentó al director de Fairchild Camera and Instruments, que aceptó apoyar la nueva compañía. Cada uno de los ocho miembros del Shockley Semiconductor Laboratory tendría que aportar 500 \$ (aproximadamente el sueldo de un mes) y Fairchild pondría 1,3 millones de dólares. La empresa se llamaría Fairchild Semiconductor Corporation. En ella aprendieron sus fundadores lo que significa pasar de las tareas de investigación a la fabricación y a la puesta de un producto en el mercado, y también sufrieron sus propias traiciones o deserciones, como la del primer director que habían contratado, que al poco tiempo se marcharía para fundar otra empresa similar junto con algunos de los empleados que habían ido contratando. Con todas estas empresas asentadas en Palo Alto se fue configurando lo que más tarde se llamaría el Silicon Valley (Valle del Silicio).

En Fairchild Semiconductor se consiguió otro gran avance en el desarrollo de la electrónica: la tecnología planal, desarrollada por Jean Hoerni. La idea era la siguiente: en lugar de eliminar el óxido de silicio que aparecía sobre la superficie, se aprovechaba este óxido con varios propósitos. Por una parte, protegía la superficie e impedía la formación de defectos superficiales que afectarían negativamente a la conducción eléctrica. Por otra parte, si se abrían múltiples agujeros o "ventanas" en el óxido, y se introducían las impurezas a través de esas ventanas, debajo de cada una de ellas se fabricaba un dispositivo distinto, por lo que se podían construir muchos transistores simultáneamente sobre la misma lámina de silicio, separándolos después y encapsulándolos como dispositivos independientes. Esto permitía aumentar de forma muy importante los rendimientos de producción. Pero la tecnología planal tendría inmediatamente una consecuencia de mayor trascendencia: siguiendo la idea de Robert Noyce, en lugar de fabricar transistores idénticos para separarlos posteriormente mediante una sierra, se podrían fabricar simultáneamente y en el mismo trozo de silicio los distintos transistores y resistencias que constituyen un circuito electrónico completo, interconectándolos después mediante tiras metálicas depositadas sobre la superficie. Esta idea, presentada en enero de 1959, constituía la invención del circuito integrado planal.

Realmente la idea de fabricar un circuito completo dentro de un mismo encapsulado ya había sido propuesta por Jack S. Kilby, de Texas Instruments, en julio de 1958, por lo que Fairchild y Texas comenzaron un litigio judicial demandando la adjudicación de la patente del circuito integrado. La justicia resolvió a favor de ambos, adjudicándoles la patente de forma compartida, y tanto Texas Instruments como Fairchild Semiconductor comenzaron a fabricar circuitos integrados comerciales en 1961. En la figura 5-(a) se presenta el primer prototipo presentado por Kilby, y en la figura 5-(b) se muestra el de Noyce.

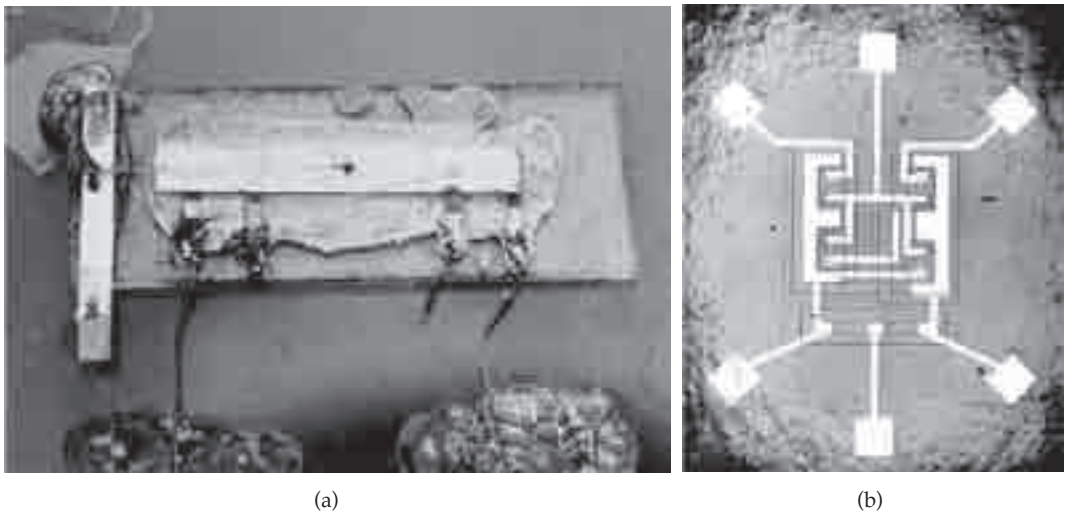


Figura 5: Primeros circuitos integrados. a) Prototipo presentado por Kilby, en Texas Instruments.
b) Circuito integrado planar, propuesto por Noyce, en Fairchild Semiconductor

El número de transistores que se incluían en los circuitos integrados fue creciendo rápidamente. Una de las razones que condujeron a ese incremento fue la reducción del tamaño de los transistores. Con los transistores más pequeños se conseguían ciertas ventajas: mayor velocidad, menor consumo de potencia y mayor número de dispositivos en un mismo circuito integrado, llamado "chip". El aumento inicial de la cantidad de transistores que se integraban en un chip, aunque todavía era un número muy reducido, llevó a Gordon Moore a enunciar una predicción el 19 de abril de 1965: "La complejidad de los circuitos integrados ha crecido a un ritmo de un factor dos por año. Este ritmo se va a mantener durante los próximos 10 años, llegando a 65000 transistores por chip en 1975". A este enunciado se le conoce como Ley de Moore.

La tecnología planal también tuvo otra consecuencia: favoreció la puesta en práctica del transistor MOS (Metal-Óxido Semiconductor). En este modelo de transistor, la conducción eléctrica entre la región emisora de los electrones (o huecos), llamada fuente, y la región receptora, llamada drenador, se produce a través de una región del mismo semiconductor pero de tipo distinto de conductividad, justo debajo de la superficie. El electrodo de control que modula la corriente, llamado puerta, se separa de la superficie del semiconductor mediante una lámina muy delgada de óxido de silicio que actúa como aislante eléctrico. Para que este dispositivo fuera viable se hizo necesario mejorar la calidad de la superficie, de manera que quedara libre de defectos. Este transistor aporta importantes ventajas: el electrodo de control está aislado eléctricamente del semiconductor, reduciendo la corriente de control, y su tamaño puede hacerse considerablemente menor que el de los transistores previos, permitiendo seguir con la miniaturización y mantener la ley de Moore. Además, cuando se usa como conmutador para aplicaciones digitales, cada transistor se puede combinar con otro de tipo de conductividad diferente, formando una estructura MOS complementaria o CMOS. Sin entrar en más detalles, los conmutadores se disponen en parejas de elementos que actúan de forma complementaria: cuando uno está cerrado el otro está abierto, y viceversa, haciendo que sólo pueda fluir corriente por la pareja durante los cambios de estado, y disminuyendo así considerablemente el consumo de potencia.

A mediados de los 60, Fairchild Semiconductor había crecido hasta alcanzar un gran volumen de negocio y empleaba a varios miles de trabajadores. Muchos de esos empleados habían dejado la compañía para fundar otras empresas, de manera que, sin pretenderlo, Fairchild se había convertido en el germen de la industria de semiconductores del Valle del Silicio. No obstante, como aún estaba controlada por la empresa matriz de la Costa Este, surgieron problemas en la gestión y dos de sus fundadores, Robert Noyce y Gordon Moore, decidieron en 1968 fundar una nueva empresa para desarrollar circuitos integrados basados en transistores MOS: la compañía Intel.

Intel no sólo consiguió fabricar con éxito circuitos integrados en tecnología MOS. Además introdujo en el mercado otro producto de gran relevancia para el desarrollo tecnológico posterior: el microprocesador.

Al primer microprocesador desarrollado en Intel en 1971 se le asignó el nombre 4004 y se muestra en la figura 6. Incluía unos 2250 transistores, era un microprocesador de 4 bits y direccionaba 9,2 kilobits de memoria, integrada en otro chip. Con estos microprocesadores y los modelos sucesivos de 8 y 16 bits comenzaron a desarrollarse los ordenadores personales, que han conseguido instalarse en todos nuestros hogares.

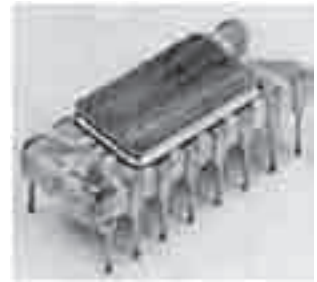


Figura 6: El 4004, primer microprocesador, fabricado en Intel en 1971.

El número de transistores que se integraban en los siguientes modelos de microprocesador creció rápidamente, y Gordon Moore revisó su ley en 1975, afirmando que la densidad de integración seguiría creciendo de forma exponencial, aunque se duplicaría a partir de entonces cada dieciocho meses. En 1993 aparecería el microprocesador Pentium, con más de 3 millones de transistores. A finales del siglo XX, el Pentium IV, comercializado en el año 2000, ya estaba constituido por 42 millones de transistores.

En la figura 7 se muestra una fotografía tomada con un microscopio electrónico de un transistor de las generaciones más recientes. La longitud del canal conductor, controlado mediante el electrodo de puerta (zona central más oscura), que conecta la fuente y el drenador, es de sólo 16 nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro). Estos transistores tan pequeños aún no están integrados en los microprocesadores comerciales, y se incorporarán en nuevas generaciones de microchips, más potentes y más rápidos.

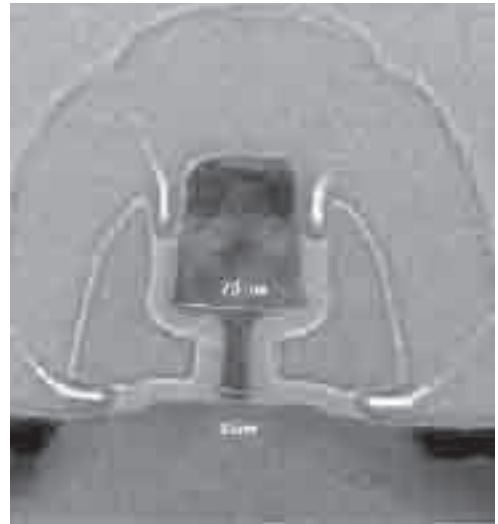


Figura 7: Fotografía mediante microscopía electrónica de un transistor MOS experimental de las últimas generaciones.

Recientemente, en el año 2000, una vez que se han demostrado las enormes consecuencias que ha tenido la invención del circuito integrado en las tecnologías de la información y las comunicaciones, y ya fallecido Robert Noyce, se ha concedido el Premio Nobel de Física a Jack Kilby.

BARDEEN Y LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Como he mencionado anteriormente, a diferencia de William Shockley, que se trasladó al mundo empresarial, aunque su actividad como empresario tuviera una vida corta, John Bardeen se había incorporado a la Universidad de Illinois en 1951, como profesor de

Ingeniería Eléctrica y de Física, donde siguió ocupándose en la investigación de fenómenos fundamentales. Uno de estos fenómenos, que todavía presentaba aspectos oscuros a la comunidad científica, era la superconductividad.

El fenómeno de la superconductividad había sido descubierto por Kamerling Onnes ya en 1911: si se bajaba la temperatura de ciertos metales a valores próximos a 270 grados centígrados bajo cero, se observaba la desaparición casi completa de la resistencia eléctrica. Este hecho se utiliza hoy día, entre otras aplicaciones, para conseguir enormes campos magnéticos. Se comenzó a considerar a esta situación como un estado fundamentalmente nuevo de la materia. Aunque se habían descubierto muchas propiedades nuevas de los superconductores en las décadas siguientes, todavía quedaba por resolver el problema central: el mecanismo físico responsable de la superconductividad.

Ya en Illinois, John Bardeen comenzó a indagar en las raíces de este fenómeno en colaboración con dos investigadores más de veinte años más jóvenes que él: Leon N. Cooper y John Robert Schrieffer. Estos tres investigadores proporcionaron una explicación completa en 1957. La nueva teoría proponía que la interacción entre los electrones y las vibraciones de los átomos del metal hacía que los electrones se asociaran en parejas formando pares ligados, llamados pares de Cooper. Los diferentes pares se acoplan fuertemente entre ellos produciéndose un comportamiento colectivo que hace que no se pueda romper un par determinado sin perturbar a todos los demás. Esto requeriría una cantidad de energía que puede exceder un valor crítico, y que no se puede obtener de la energía térmica del material si su temperatura es suficientemente baja. Con este estado de muchos electrones correlacionados se pueden entender muchas de las propiedades más importantes de los superconductores.

Esta teoría fue aceptada, publicándose en los años siguientes muchas extensiones y refinamientos. La teoría también fue capaz de predecir nuevos efectos y motivó una gran actividad en este campo. En reconocimiento a estos trabajos, Bardeen, Cooper y Schrieffer obtuvieron el premio Nobel de Física de 1972, que suponía el segundo Premio Nobel de Física para John Bardeen, convirtiéndose así en el único científico que lo ha conseguido. (Marie Curie obtuvo también dos Premios Nobel, pero uno fue de Física en 1903, y el otro de Química en 1911).

Bardeen continuó el resto de sus días en Urbana, Illinois, dedicado a la docencia, a la investigación y a la práctica de su deporte favorito, el golf, con el que había compartido también gratos momentos con Walter Brattain. Murió en 1991 a la edad de ochenta y dos años.

A través de la figura de John Bardeen, he pretendido relatar de forma breve lo que ha sido el desarrollo de la tecnología electrónica a lo largo del siglo XX. He hecho mención a los nombres de los que han podido ser sus protagonistas más relevantes, aunque sin duda han participado muchos más, tanto en los laboratorios de las universidades y centros públicos de investigación como de las empresas. Son miles las patentes presentadas en este



Figura 11: Fotografía de John Bardeen en la fecha de obtención de su segundo premio Nobel en Física.

campo, y están surgiendo nuevos dispositivos y nuevas aplicaciones cada día, de manera que el crecimiento continuará al mismo ritmo durante unos cuantos años más, o puede que muchos años si surgen nuevos dispositivos que produzcan saltos significativos comparables a los que significaron la invención del transistor, el circuito integrado o el microprocesador. Todavía queda mucho espacio para la sorpresa, siguiendo al título de la conferencia memorable pronunciada en diciembre de 1959 por Richard P. Feynman, premio Nobel de Física en 1965: "Hay mucho sitio al fondo. Una invitación para entrar en un nuevo campo de la Física", en la que predijo gran parte de los avances que se han ido produciendo y algunos que aún están por venir.