

75 aniversario del transistor

Chumin **Wang**
Vicenta **Sánchez**

ELECTRÓNICA BASADA EN TUBOS DE VACÍO

A inicios del siglo XX, después del descubrimiento de los electrones por Joseph John Thompson en 1897, las áreas de la ciencia que darían lugar a lo que hoy conocemos como electrónica experimentaron un vertiginoso crecimiento comenzando con la teoría cuántica de Max Karl Ernst Ludwig Planck en 1900. En forma paralela, John Ambrose Fleming desarrolló en 1904 el primer dispositivo electrónico denominado válvula termoiónica o diodo de vacío, el cual consistió en un filamento caliente –emisor de electrones– situado en un tubo de vacío y cercano a una placa metálica con una diferencia de potencial aplicada que puede atraer o repeler dichos electrones. Dos años después, Lee de Forest, de la Western Electric Company, inventó la válvula triodo de vacío colocando una rejilla entre el cátodo y el ánodo del diodo de Fleming. Dicho triodo permitió la amplificación de señales eléctricas y constituyó el elemento fundamental en los primeros telégrafos, teléfonos, televisores, receptores de radio y radares, así como en las primeras computadoras electrónicas. Por ejemplo, la primera computadora digital desarrollada en 1937 por el profesor John Vincent Atanasoff y su estudiante Cliff Berry –conocida como Atanasoff-Berry Computer (ABC)–, contenía 300 tubos de vacío, mientras que la computadora e integrador numérico electrónico (ENIAC por sus siglas en inglés) inventada en 1943 por John Presper Eckert y

John Mauchly contenía 17,468 tubos de vacío (varios de ellos se fundían cada día), 500 millas de cables, ocupaba una superficie de 167 m², pesaba 30 toneladas y consumía los 200 kW necesarios para alimentar a una pequeña ciudad de esa época.

En esos años, un joven estadounidense, Mervin Joe Kelly, ingresó a la edad de 16 años en la Escuela de Minas y Metalurgia con el propósito de ser un ingeniero minero; trabajaba en las noches y fines de semana clasificando los especímenes minerales por un sueldo de 18 USD mensuales (Pierce, 1975). A de su segundo año en Rolla, fue asistente de profesor de química, obtuvo la beca para colegiatura y un pago anual de 300 USD. El siguiente verano trabajó en la mina de cobre de Utah, y esa experiencia modificó su visión acerca de la metalurgia, de manera que decidió cambiarse a la ciencia básica; se graduó con honores en 1914. Después, Mervin se fue a enseñar física y a estudiar matemáticas en la Universidad de Kentucky, donde obtuvo el grado de maestría en 1915. Posteriormente, en la Universidad de Chicago se desempeñó como asistente del profesor Robert Andrews Millikan y participó en los famosos experimentos de gotas de aceite para determinar la carga del electrón. Obtuvo su doctorado en 1918. Inmediatamente después ingresó al Departamento de Ingeniería de la Western Electric Company con un salario anual de 2,100 USD y logró aumentar la vida de los tubos amplificadores de 1,000 a 80,000 horas.

En enero de 1925, la American Telephone and Telegraph (AT&T) creó los Laboratorios Bell absorbiendo la parte de investigación y desarrollo de su subsidiaria Western Electric Company, mientras que el doctor Kelly fue nombrado sucesivamente director de desarrollo de los tubos de vacío entre 1928 y 1934, director de desarrollo de instrumentos de transmisión y electrónica entre 1934 y 1936 y desempeñó el puesto de director de investigación a partir de 1936. En ese mismo año, contrató a William B. Shockley –un joven recién doctorado del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)– para desarrollar dispositivos de estado sólido con el fin de reemplazar los tubos de vacío ampliamente

utilizados en la telefonía. Por su visión Kelly ha sido considerado como el padre espiritual del transistor.

PRIMER TRANSISTOR DE ESTADO SÓLIDO

El mencionado William B. Shockley Jr. nació en Londres, Inglaterra, en 1910 (Moll, 1995). Obtuvo la licenciatura de física en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) en 1932 y el doctorado en el MIT con la tesis titulada “Cálculo de funciones de onda electrónica en cristales de NaCl” su contratación se realizó después de un largo periodo de depresión económica (1930-1936), tiempo durante el cual en los Laboratorios Bell no ingresaron nuevos investigadores. Uno de los últimos contratados en 1929 fue Walter Houser Brattain, un joven físico nacido en 1902 en China (Bardeen, 1994). Brattain creció en los EU, se graduó en física 1924 en el Whitman College de Washington y en 1928 obtuvo el doctorado en la Universidad de Minnesota. Durante casi una década, Brattain trabajó en los rectificadores o diodos basados en óxido de cobre. En 1939, Shockley diseñó un amplificador por efecto campo y estuvo probando junto con Brattain este diseño que usaba el óxido de cobre sin tener éxito. Estas pruebas fueron suspendidas a causa de la Segunda Guerra Mundial, periodo en que Mervin Kelly consiguió financiamientos cuantiosos haciendo que los Laboratorios Bell fueran uno de los mejores equipados del mundo.

En 1945, al término de la guerra, Shockley fue designado como líder del Grupo de Estado Sólido y sugirió al presidente de los Laboratorios Bell, Marvin Kelly, la contratación de un destacado físico teórico, John Bardeen, con el fin de reforzar su grupo en el estudio de dispositivos semiconductores. Bardeen nació en Wisconsin en 1908, estudió en la Universidad de Wisconsin, donde culminó su licenciatura (1928) y maestría (1930) en ingeniería eléctrica (Pines, 2013). Entre 1930 y 1933, trabajó en los Laboratorios de Investigación Gulf en Pittsburgh, donde desarrolló métodos electromagnéticos para la prospección petrolífera y en su tercer año decidió estudiar un doctorado en el recién inaugurado Instituto de Estudios Avanzados en Princeton y obtuvo el grado en 1936 desarrollando el método de Hartree-Fock

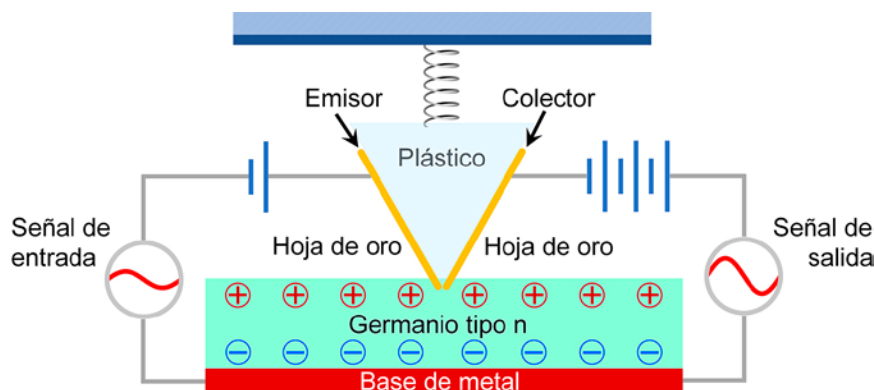


Figura 1. Representación esquemática del primer transistor de contacto puntual fabricado por los Laboratorios Bell en diciembre de 1947. Se observa la capa de inversión con huecos ($\oplus$) como portadores de carga en la parte superior del bloque de germanio.

dependiente del tiempo. Enseguida, recibió una beca de la Universidad de Harvard para realizar una estancia de investigación que duraría hasta 1938. La invitación de 1945 a laborar en el Grupo de Estado Sólido fue un reconocimiento a las habilidades para la investigación mostradas por Bardeen.

En octubre de 1945, Shockley pidió a Bardeen que revisara el diseño y los cálculos realizados por él, así como el fallido intento de construir un amplificador de efecto campo en 1939. Después de largos meses de trabajo compartiendo la misma oficina con Brattain, Bardeen encontró que los estados localizados de superficie que se desvanecen en el interior de la muestra fueron los causantes de dicho fallo (Bardeen, 1947). En noviembre del mismo año, Brattain logró neutralizar el bloqueo de los estados de superficie sumergiendo al silicio en un electrolito; cuatro días después, Bardeen y Brattain observaron una pequeña amplificación de señales en un bloque de silicio con una gota de electrolito y un punto metálico como contactos eléctricos. Una vez logrado este resultado, reemplazaron el silicio por un bloque de germanio tipo *n* (dopado por átomos de la columna V de la Tabla Periódica) disponible en su laboratorio y obtuvieron por primera vez una ganancia de 330 al aplicar un potencial negativo a la gota de electrolito, el cual según Bardeen genera una capa de inversión de tipo *p* o conducción por huecos con carga eléctrica positiva en la cercanía a la interfaz germanio-electrolito. Siguiendo la sugerencia de Bardeen para eliminar el uso del electrolito, Brattain sometió dos electrodos de oro muy próximos (emisor y colector) en un bloque de

germanio conectado a la base, como se muestra en la Figura 1, y así observó la amplificación tanto de señal como de potencia hasta de 1,000 Hz, lo cual fue presentado a los ejecutivos de los Laboratorios Bell el 23 de diciembre de 1947 en un circuito con el nuevo amplificador de estado sólido que les permitió escuchar discursos a través de un par de audífonos.

El descubrimiento del transistor se mantuvo como un secreto hasta junio de 1948, cuando Bardeen y Brattain solicitaron una patente –sin Shockley– reportando la primera realización experimental de dicho triodo amplificador basado en semiconductores (Bardeen y Brattain, 1950), el cual también se conoce como “transistor”, palabra que proviene de la contracción de las palabras *transfer* y *resistor*. Durante los primeros días después de la invención del transistor de contacto puntual, Shockley logró crear un nuevo dispositivo conocido como transistor de unión, el cual consiste en un sándwich *n-p-n* dentro de un solo bloque de semiconductor con mayor confiabilidad y facilidad para la producción masiva. El funcionamiento de este nuevo dispositivo se predijo claramente a través de la teoría de bandas y su patente fue solicitada en junio de 1948 (Shockley, 1951). La realización experimental de dicho transistor de unión *n-p-n* no se logró hasta abril de 1950, debido al requerimiento de monocristales semiconductores de alta pureza, confirmándose así el concepto de inyección de portadores minoritarios (electrones) a través de la zona *p* de la unión, mientras que Shockley culminaba en ese año su obra

maestra de 558 páginas titulada *Electrones y huecos en semiconductores* que fue el primer libro de texto para científicos e ingenieros que trabajan en dispositivos semiconductores (Shockley, 1950). La invención de transistores tanto de contacto puntual como de unión –ambos basados en semiconductores que consumen una millonésima parte de electricidad que un típico tubo de vacío– fue reconocida con el Premio Nobel de Física a William B. Shockley, John Bardeen y Walter H. Brattain en 1956.

NANOTECNOLOGÍA EN CIRCUITOS INTEGRADOS

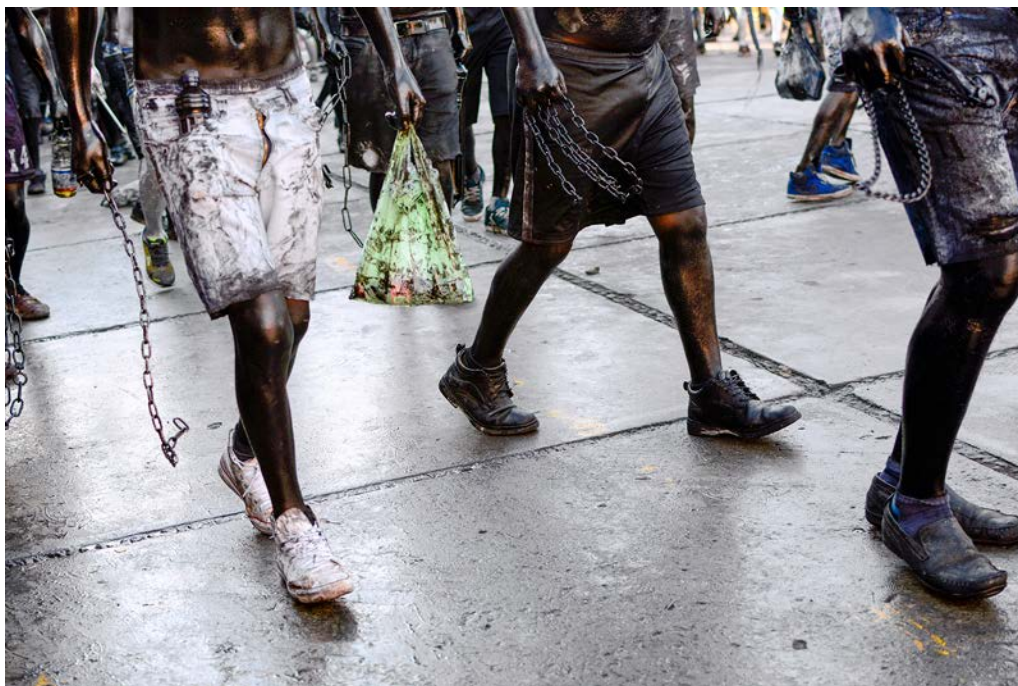
Después de la euforia por la invención del transistor, Bardeen enfrentó una atmósfera enrarecida en el grupo dirigido por Shockley, quien solo permitía investigaciones experimentales sugeridas por él. Además, el descubrimiento del efecto isotópico observado en el plomo a principios de 1950, donde la temperatura de transición superconductora depende de la masa isotópica, revivió en Bardeen su idea –que venía de una década atrás– de una posible conexión entre la superconductividad y la vibración de red. En 1951, Bardeen renunció a los Laboratorios Bell aceptando la invitación de la Universidad de Illinois, lugar donde laboró hasta su jubilación y obtuvo su segundo Premio Nobel (Pines, 2013).

Brattain continuó en los Laboratorios Bell hasta la jubilación, mientras que Shockley fundó en 1955 su propia compañía llamada Laboratorio Shockley de Semiconductores como una división de Beckman Instruments en el Parque Industrial de Stanford. Shockley fue un mejor científico que empresario, por lo que los Laboratorios Shockley no fueron financieramente exitosos en el desarrollo de diodos de 4 capas, a pesar de ser una de las primeras compañías del Valle de Silicio, junto con Hewlett-Packard. En 1957, Robert Noyce, Gordon Moore, Jean A. Hoerni y un grupo de otros cinco empleados abandonaron a Shockley para formar una nueva compañía llamada Fairchild Semiconductor con el fin de fabricar transistores de silicio, en lugar de germanio, cuyo primer lote de 100 fue fabricado tres meses después de su

fundación mediante el proceso planar de Hoerni y fue vendido a IBM por 150 USD cada uno. A mediados de 1959, Noyce desarrolló en Fairchild el primer circuito integrado mediante procesos de fotolitografía; este circuito incluía cuatro transistores y todos los demás elementos del dispositivo tales como resistencias y condensadores, así como las conexiones metálicas, sobre la misma oblea de silicio cristalino, en paralelo al primer circuito monolítico de germanio donde se conectaban sus componentes a través de hilos de oro, fabricado por Jack St. Clair Kilby en Texas Instruments a inicios de 1959; este último introdujo el concepto de circuitos monolíticos que fue reconocido con el Premio Nobel de Física del año 2000.

En 1968, Robert Noyce y Gordon Moore fundaron Intel Corporation, para fabricar circuitos integrados basados en Transistores de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFET). El nombre de la compañía es un acrónimo de las palabras integración y electrónica. En 1971 lanzaron su primer microprocesador o chip, el modelo i4004 de 16 pines que contiene 2,300 transistores de 10 μm y una unidad central de procesamiento (CPU) a 740 kHz capaz de procesar 92,600 instrucciones por segundo con un bus de 4 bits y un costo de 60 USD. Hoy en día, los nuevos dispositivos electrónicos contienen miles de millones de MOSFET; por ejemplo, Apple M1 Ultra tiene 114 mil millones de transistores de 5 nm fabricados por Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC); Nvidia GPU H100 posee 80 mil millones de transistores de 5 nm fabricados por TSMC y Cerebras Wafer Scale Engine 2 exhibe 2.6 billones de transistores de 7 nm también fabricados por TSMC. En 2022, la compañía surcoreana Samsung anunció la producción de microprocesadores basados en transistores de 3 nm en los que aplica una arquitectura de Gate-All-Around y una tecnología propia llamada Multi-Bridge-Channel-FET (Li y Kim, 2008) con una reducción del consumo de energía de hasta un 45 % y una mejora de rendimiento (23 %), en comparación con los chips de 5 nm (Samsung, 2022).

En esta breve historia del primer transistor, hay 4 personas fundamentales durante su creación en 1947. (1) Mervin J. Kelly: el visionario y estratega del proyecto. (2) William B. Shockley: el físico brillante y



© Emilio Salceda. Xnacates. San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.

creativo. (3) John Bardeen: el científico sabio y pensador, y (4) Walter H. Brattain: El experimentalista perseverante y analítico. La conjunción de ellos en los Laboratorios Bell revolucionó la microelectrónica sustentada en la teoría cuántica de sólidos y marcó un punto de inflexión en la historia de la tecnología.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente apoyado por los proyectos IN110020 y IN112522 del PAPIIT-UNAM.

REFERENCIAS

- Bardeen J (1947). Surface states and rectification at a metal semiconductor contact. *Phys. Rev.* 71(10):717-727.
- Bardeen J (1994). A biographical memoir of Walter Houser Brattain 1902-1987. National Academy of Science. Recuperado de: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/brattain-walter-h.pdf>.
- Bardeen J and Brattain WH (1950). Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials, US Patent No. 2524035 solicitada el 17 de junio de 1948 Washington D.C. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US2524035A/en>.
- Li M y and Kim SM (2008). Multi bridge channel field effect transistors with nano-wire channels and methods of manufacturing the same, US Patent No. 7427788B2 solicitada el 26 de octubre de 2005 Washington D.C. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US7427788B2/en>.

- Moll JL (1995). A biographical memoir of William Bradford Shockley 1910-1989. National Academy of Science. Recuperado de: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/shockley-w.pdf>.

- Pierce JR (1975). A biographical memoir of Mervin Joe Kelly 1894-1971. National Academy of Science. Recuperado de: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/kelly-mervin.pdf>.

- Pines D (2013). A biographical memoir of John Bardeen 1908-1991. National Academy of Science. Recuperado de: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/bardeen-john.pdf>.

- Samsung Global Newsroom (2022). Samsung begins chip production using 3nm process technology with GAA architecture. Recuperado de: <https://news.samsung.com/global/samsung-begins-chip-production-using-3nm-process-technology-with-gaa-architecture>.

- Shockley W (1950). *Electrons and holes in semiconductors: with applications to transistor electronics*. D. Van Nostrand Company, Inc.

- Shockley W (1951). Circuit element utilizing semiconductive material, US Patent No. 2569347 solicitada el 26 de junio de 1948 Washington D.C. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US2569347A/en>.

Chumin Wang
Instituto de Investigaciones en Materiales
Vicenta Sánchez
Departamento de Física
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
vicenta@unam.mx



© **Emilio Salceda.** *Xinacates.* San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.