

Este artículo pretende recordar a los que iniciaron, en ocasiones de forma casual, los descubrimientos e inventos que años más tarde tendrían unas aplicaciones que fueron desarrolladas por otras personas y que tuvieron un impacto en el devenir económico y social.

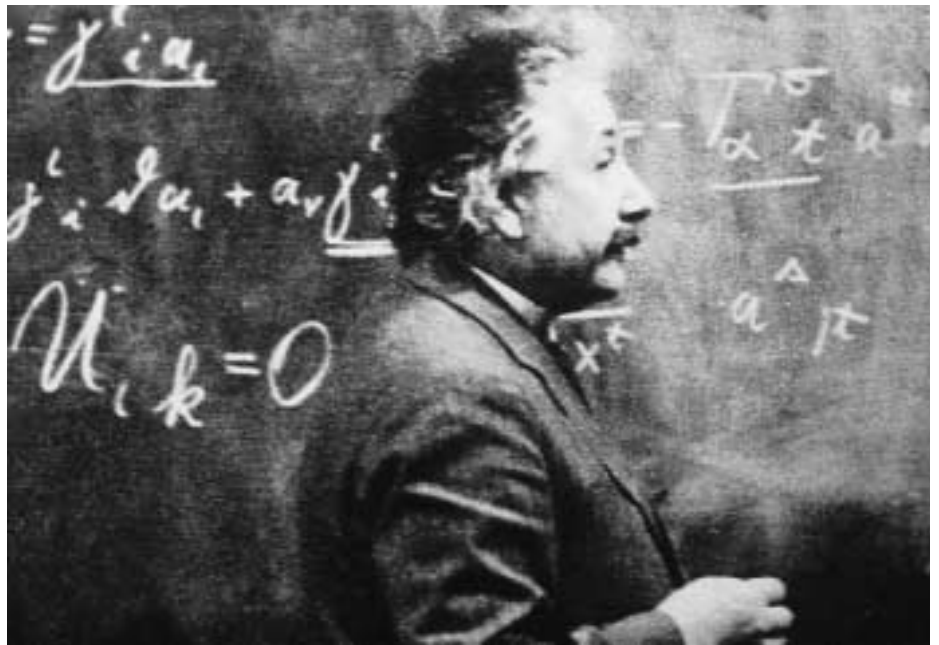
ALGUNAS NOTAS SOBRE SUS ORÍGENES

FOTOELECTRICIDAD Y SEMICONDUCTORES

José Luis Ausín Ruiz,
Ingeniero Técnico de Telecomunicación

Como recordamos, el pasado año 2005, con motivo del centenario del nacimiento de la teoría de la relatividad de Albert Einstein, se celebró el Año Internacional de Física. Aparte de las publicaciones especializadas, muchos diarios y revistas de amplia difusión dedicaron artículos divulgativos donde se hacían eco del centenario y por extensión de lo que le debemos a Einstein y a la Mecánica Cuántica. En varios de los artículos podía leerse que gracias a Einstein tenemos la célula fotoeléctrica, las fotocopiadoras, el láser y que a la Mecánica Cuántica le debemos los semiconductores en sus distintas aplicaciones y por supuesto los transistores.

Dada la magnitud científica de Einstein es comprensible que se le atribuyan muchos logros de cuya aplicación tecnológica hoy disfrutamos. De igual modo, con la Mecánica Cuántica ocurre lo mismo, quizás por su halo de incompreensión e irrealidad aparente, especialmente para los que somos profanos. Pero en ambos casos, creo que es fácil ser algo más precisos y no olvidar en cada descubrimiento e invento a quienes estuvieron en las primeras etapas de la exploración, aunque no supieran bien del todo el cómo y a dónde iban. Si bien es preciso admitir que gracias a esos nuevos avances científicos, al conocer mejor la naturaleza de la materia, se pudieron perfeccionar los dis-



positivos electrónicos de estado sólido que ya antes estaban en marcha. Y más tarde, eso sí, crear otros nuevos.

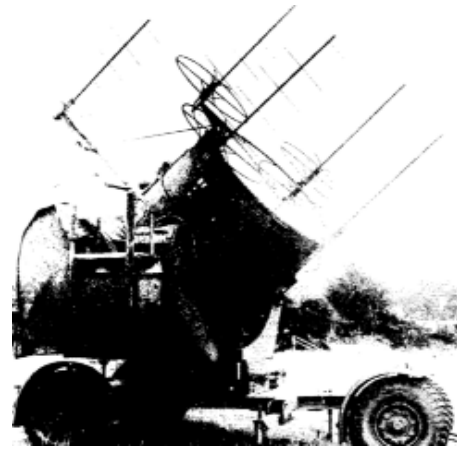
Pues bien, empecemos a recordar. Las variaciones eléctricas debidas a la luz ya eran conocidas y aplicadas con anterioridad a Einstein, aunque no eran bien entendidos sus últimos fundamentos. Igualmente, las propiedades rectificadoras de la corriente eléctrica y de las ondas de radio de ciertos minerales e incluso su poder amplificador se aprovechaban técnicamente, antes del conocimiento de la Mecánica Cuántica, sobre 1925-1930.

El desarrollo de la Mecánica Cuántica, sobre todo en los años 1930-1940, permitió mejorar lo ya conocido y su posterior progreso, entendiendo con mayor precisión los fundamentos de la materia en buen número de aplicaciones científicas de variadas disciplinas, entre las que no faltaban los semiconductores y el efecto fotoeléctrico, o lo que sería la electrónica de estado sólido. Cabe recordar que los más importantes laboratorios no pudieron contratar teóricos con conocimientos de Mecánica Cuántica hasta 1936 (1).

Los primeros en observar un efecto eléctrico de la luz fueron, en 1839, los físicos franceses Antoine César Becquerel (1788-1878) y su hijo Alexandre Edmond (1820-1891, padre de Antoine Henri Becquerel, descubridor de la radiactividad natural), quienes en sus investigaciones con pilas electroquímicas, usando electrodos de platino o plata recubiertos con una capa de haluros de plata, observaron una fuerza electromotriz al iluminar uno de los electrodos.

La segunda observación vendría también por la casualidad. El selenio fue descubierto en 1817 por el sueco Jöns Jakob Berzelius y desde 1870 formaba parte de algunos componentes eléctricos tales como resistencias. El destino de estos elementos era muy variado, pero sobre todo se utilizaban en las estaciones telegráficas. En 1873, Joseph May, telegrafista de una estación de Irlanda, se sobresaltó al observar que las indicaciones de los aparatos de medida oscilaban sin motivo aparente. Poco después comprobó que variaban según diera más o menos la luz del Sol en los cuadros de control de la estación. El científico inglés Wiloughby Smith estudió el fenómeno confirmando las variaciones de la conductividad del selenio por acción de la luz, volviendo al instante a su valor original si no estaba iluminado. Fue el primer elemento conocido que presentaba este efecto llamado fotoconductividad.

Pocos años más tarde, en 1877, los ingleses W. G. Adams y R. E. Day descubrieron que se producía una tensión cuando el selenio, en contacto con otro metal, era iluminado; se iniciaba así lo que se llamaría efecto fotovoltaico. El americano Charles Fritts construyó las primeras células fotovoltaicas (1883). Se mejoraron y comercializaron varios tipos de estas células de selenio, las cuales es-



Antenas de los primeros sistemas prácticos de radar. El desarrollo del radar, antes y durante la II Guerra Mundial, facilitaron un gran impulso a los semiconductores (6 y 5).

timularon la imaginación buscándolas diversas aplicaciones, entre ellas la de la televisión, basándose en puntos de células de selenio, imitando la retina del ojo. Se probaron en los años 1920 varios sistemas electromecánicos, antecesores a los sistemas totalmente electrónicos. El principal sistema de aquellos años fue el del disco Nipkow, del alemán Paul Gottlieb Nipkow (1860-1940), y las decisivas mejoras introducidas por John Logie Baird (1888-1946). Otros elementos fotosensibles son la molibdenita, la argentita y la acantita.

La tercera observación sería la de Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894). Comprobó en 1887 que cuando una lámina de cinc se ilumina con luz ultravioleta se carga eléctricamente; lo mismo ocurría con otros materiales y luz visible. Igualmente, observó que una descarga eléctrica, entre dos electrodos, es más viable si uno de ellos está iluminado con luz ultravioleta. Varios colaboradores de Hertz continuaron investigando este efecto, uno de ellos fue Wilhelm Hallwachs

(1859-1922). Se llamó «efecto Hallwachs», («fotofecto» lo llamó Philipp Lenard) a la descarga de una carga negativa de las superficies metálicas iluminadas por luz ultravioleta. En 1893, los alemanes Julius Elster y Hans F. Geitel desarrollaron la célula fotoeléctrica.

Así comenzó la andadura del efecto fotoeléctrico, que años más tarde, en 1905, Albert Einstein, sería el primero en explicar científicamente. Simplificándolo mucho, consiste en aplicar el concepto del cuanto de la nueva teoría de Max Planck (1900) y que, en este caso, para la luz sería el fotón. Robert Millikan demostró, en 1916, lo correcto de la teoría del efecto fotoeléctrico de Einstein; asimismo, facilitaría un nuevo método para hallar la «constante h » de Planck. Esta excelente aportación de Einstein, por la que mereció el premio Nobel de Física de 1921, dio un gran impulso al desarrollo de la Mecánica Cuántica y por otro lado sería la clave para comprender los dispositivos fotoeléctricos ya existentes y la causa del origen de otros nuevos.

Los orígenes de los semiconductores y del transistor tienen antecedentes distintos, aunque en algunos momentos puedan ser similares.

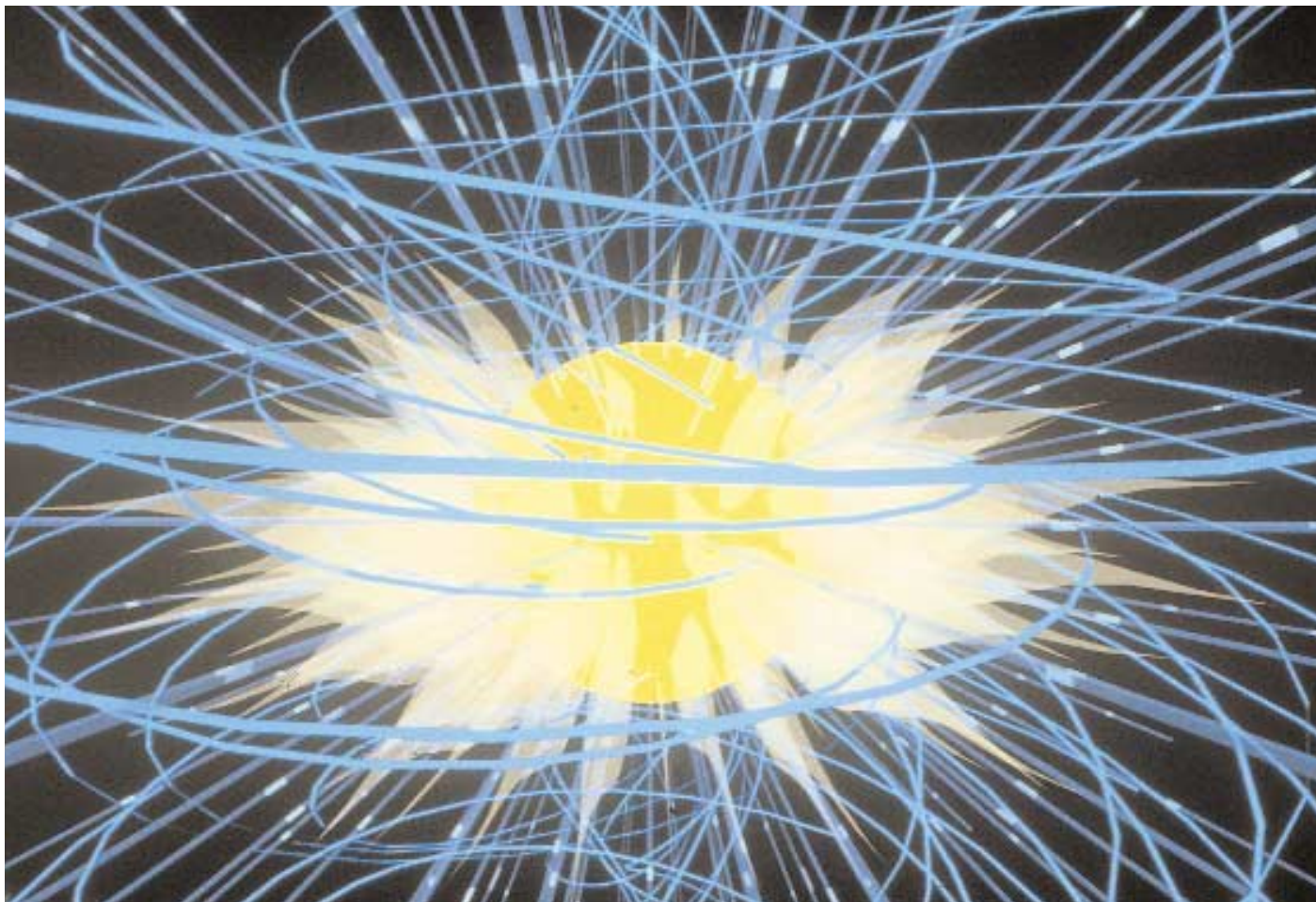
De un lado, en 1874, veintiséis años antes de la teoría cuántica y setenta y tres años del transistor, Karl Ferdinand Braun (1850-1918), inicia la electrónica de estado sólido al descubrir las propiedades rectificadoras de la galena, o sulfuro de plomo; años más tarde inventaría el tubo



Heinrich Rudolph Hertz. Uno de los pioneros de la fotoelectricidad (1887)



Mervin Kelly. Unió a importantes científicos en los Lab. (1936)



de Braun, precursor de tubo de rayos catódicos, y en 1909 sería Premio Nobel de Física, junto con Marconi, por su contribución al desarrollo de la telegrafía sin hilos. Su galena, diodo de estado sólido, utilizaba una fina punta metálica de contacto, presionando sobre una base de sulfuro de plomo, como vemos unión metal-semiconductor. Con el tiempo a este diodo se le llamaría «bigote de gato». Braun publicó su descubrimiento en la revista alemana *Annalen der Physik und Chemie*, del 24 de noviembre de 1874, en la que explicaba el importante aumento o disminución de la resistencia eléctrica observada en el diodo, según el sentido de la corriente aplicada al mismo. Por aquella época muchos investigadores europeos y americanos pusieron su interés en este dispositivo de galena a la vez que se encontraban otros minerales con propiedades rectificadoras tales como la calcopirita, piritita, selenio, fahlore o cobre gris (nombres genéricos de un mineral de amplia familia de sulfoarseniuros de cobre, hierro, plata, etc.), silomelana (manganeso barítico hidratado, mineral de color negro de manganeso y bario). Parece ser que, sobre 1911, a estos minerales

con propiedades rectificadoras se les empezó a llamar semiconductores y también diodos de cristal por los alemanes Koenigsberger y Weiss (3), al permitir el paso de la corriente en un solo sentido. Asimismo, en 1874, A. Schuster, en Inglate-

rra, descubrió el óxido de cobre como nuevo semiconductor en experimentos con alambres de cobre.

A pesar de los nuevos minerales detectores, la galena fue ampliamente utilizada como detector de ondas de radio, dando lugar a varias patentes, entre ellas las de Jagadis C. Bose en 1901 y Greenleaf W. Pickard en 1904 y 1906, en éste por un detector metal-silicio. Aparte de estos rectificadores de una fina punta de metal presionando contra un cristal semiconductor, se inventaron otros, de mayor superficie, de placa metálica en contacto con el semiconductor, desarrollados por Fritts (1883) y Grondahl (1925), quienes estudiaron los de selenio y óxido de cobre respectivamente. Su principal empleo fue como rectificadores de corriente alterna y, aunque fueron utilizados ampliamente, el conocimiento de su elaboración era muy experimental.

De igual modo, el conocimiento científico y la comprensión física de la rectificación de los contactos metal-semiconductor tuvo un desarrollo muy lento. Y más que lo iba a tener.

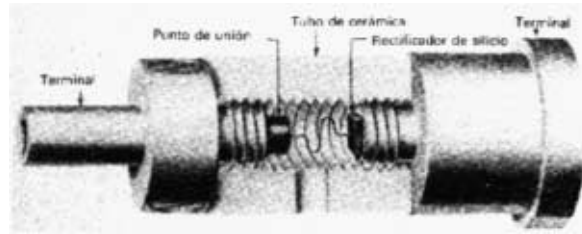
Por aquellas fechas, en 1904, John Ambrose Fleming, aplicando el efecto



Célula fotoeléctrica de los años 1920 (7)

Edison, descubierto por éste en 1883, como consecuencia del invento, por el mismo Edison de la bombilla eléctrica en 1879, pone a punto el diodo de válvula de vacío que será en lo sucesivo empleado como detector de las ondas de radio y rectificador de la corriente eléctrica. Dos años más tarde, Lee De Forest inventa la válvula de vacío de tres electrodos, el triodo, que en principio se empleaba como detector y que poco después se le descubrieron aplicaciones amplificadoras y osciladoras.

Por su mayor rendimiento y seguridad de funcionamiento, los inventos anteriores dejaron obsoleta la utilización de los diodos de punta metálica fina-cristal, pues éstos requerían un manejo paciente y delicado, ya que había que buscar un punto sensible en la galena para que el diodo rectificase. Al desplazar los diodos



Sección de uno de los primeros detectores de radar, de silicio de Bell, semejante a la parte receptora de la radio de galena, pero ya sin la imprecisión de éstos (1)

De otro lado, dos causas harían que el interés por los semiconductores volviera a ser motivo de investigaciones prioritarias: era preciso mejorar las comunicaciones telefónicas, ya que las válvulas electrónicas daban excesivos problemas de distorsión y mantenimiento. Además, al comenzar la II Guerra Mundial, era vital conseguir cuanto antes un sistema fiable de detección electrónica (que sería el radar).

cupaban de este campo. Tal es el caso de Alemania, sobre todo el grupo formado en la Universidad de Gotinga, por el ya mencionado Robert Wichard Pohl (1884-1976). La escuela de Pohl trabajó en la base experimental de la física de los semiconductores y comprobó la gran influencia que tienen las mínimas impurezas en la conductividad del cristal semiconductor, con lo que conseguía influir sobre ella. A finales de la II Guerra Mundial, Siemens puso a punto detectores de germanio sintético. Telefunken, por su parte, llegó a producir detectores de pirita artificial con capas de silicio sintético (1).

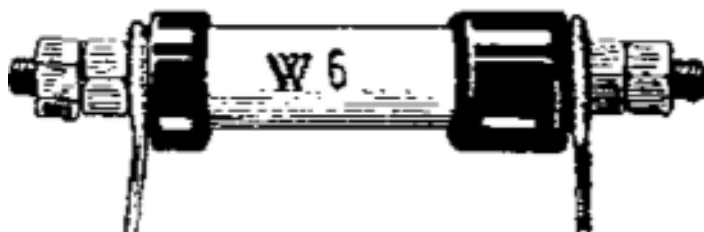
Otro destacado investigador alemán, en los inicios de los semiconductores y de las válvulas electrónicas, fue Walter Schottky (1886-1976), un doctorando de Planck, que investigó en Siemens. Schottky admitía la falta del conocimiento teórico para entender el efecto rectificador, a pesar de tener en funcionamiento el rectificador de óxido de cobre «no sólo como una desventaja técnica, sino como una de las grandes lagunas en la comprensión del mundo de los fenómenos físicos» (Schottky, 1948). Schottky y su colega Deutschmann pudieron demostrar experimentalmente en 1929 que los procesos de rectificación se desarrollaban en una fina capa de, a lo sumo, cien posiciones atómicas (1).

Las ideas de ambos llevaron a William Shockley —que además, había calculado la difusión de electrones en cloruro de sodio, y demostrado así su calificación para investigar la conductividad en cristales (1)— a la idea de influir en los electrones en el interior de la fina capa superficial con la ayuda de campos externos. Lo que le permitió en 1939, independientemente, describir una estructura de lo que hoy se conoce como «transistor de efecto de campo». Así todo, no pudo patentarlo

«La galena fue ampliamente utilizada como detector de ondas de radio, dando lugar a varias patentes»

de cristal, también relegaron a los cristales con propiedades amplificadoras y osciladoras; tales como la cincita, óxido de cinc, estudiado antes de 1930 por el ruso O. Lossev. Igualmente, el bromuro potásico del que los alemanes Pohl e Hilsch realizaron pruebas de amplificación (1938) para la empresa alemana AEG. En cualquier caso, ambos intentos no pasaron muy allá de las fases iniciales. Las válvulas de vacío desplazaron a los semiconductores y a la electrónica de estado sólido.

Los Laboratorios Bell, por medio de Mervin Kelly, crearon en 1936, un grupo de trabajo para buscar un dispositivo de estado sólido que resolviera los problemas de las comunicaciones telefónicas que creaban las válvulas de vacío. El equipo de investigación lo componían, entre otros, William Shockley, Russell Ohl y Jack Scaff. En este punto, pudiera ser adecuado recordar los dispositivos amplificadores de cincita y de bromuro potásico, mencionados más arriba. También en otros países se preo-



Detector de óxido de cobre (6)

porque ya había inscrito en 1926 un proyecto similar Julius Edgar Lilienfeld (1882-1963) y Heil. De todos modos, tanto Lilienfeld y Heil como Shockley en colaboración con Brattain, al no disponer de medios adecuados no pudieron conseguir el efecto descrito. Hasta 1960 no se obtuvo, por Kahng y Atalla (2), un dispositivo con posibilidades.

Cuando comenzó la II Guerra Mundial (1939-1945), los beligerantes, sobre todo los aliados, ingleses y estadounidenses, dedicaron grandes esfuerzos, humanos y económicos, conseguir un medio efectivo de detección electrónica de aviones, submarinos y barcos; lo que sería el radar. Investigaciones que ya habían comenzado los ingleses en 1935. A modo de idea del esfuerzo: Estados Unidos gastó más dinero en conseguir el radar, 2.500 millones de dólares, frente a 2.000 en conseguir la bomba atómica; por lo que se ha llegado a decir que la bomba atómica acabó la guerra, pero que ésta la ganó el radar (1).

El radar comenzó a investigarse en el Laboratorio de Radiación del Instituto de Massachusetts de Tecnología, (RadLab del MIT). El esfuerzo bélico hizo que todos los laboratorios arrinconaran la investigación de la electrónica de estado sólido, pero no del todo. Pronto se dieron cuenta de que necesitaban trabajar en longitudes de onda cada vez más cortas. En éstas altas frecuencias las válvulas de vacío comenzaban a dar problemas de capacidades y de tiempos de tránsito. Motivo por el que se volvió la vista a los detectores de cristal, inicialmente al de galena, que llegó a emplearse en los receptores de radar como detector, salvando mecánicamente las imprecisiones del contacto punta-cristal.

Pero hacía falta más investigación. Por ello el RadLab del MIT estableció numerosos contactos entre diversos grupos e instituciones. En marzo de 1942 se encargó a la Universidad de Purdue, en Indiana, EE.UU, la investigación y construcción de detectores de cristal capaces de trabajar en UHF. Así pues, gracias al proyecto del radar se dio un gran impulso al desarrollo de la electrónica de estado sólido.

En la década de los años cuarenta del siglo pasado, los grupos de investigación del MIT, Bell y la Universidad de Pur-



Detector de galena o sulfuro de plomo

due, habían comenzado a investigar con el germanio en proyectos de detectores de microondas para radar, del que se sospechaba que tenía propiedades rectificadoras y del que no se sabía que era un semiconductor (1). La producción de detectores para el radar era el objetivo principal, dejando para más adelante la ampliación de conocimientos de la física del estado sólido. Por esas prisas y presiones, los físicos de Purdue no advirtieron, en

«La Segunda Guerra Mundial supuso un gran avance en la detección electrónica de aviones, submarino y barcos»

sus mediciones de la resistencia eléctrica del punto de contacto entre el germanio y el metal, que tuvieron ante sus ojos el principio del transistor (1). Curiosamente, el germanio, que debe su nombre a Alemania, facilitó el bombardeo a ese país, gracias al radar, durante la II Guerra Mundial. Junto con el germanio también se decidieron por el silicio, al considerar ya a ambos semiconductores mejor conocidos y simples que el sulfuro de plomo y otros de las primeras épocas. Con estos cristales seguirían los trabajos iniciados por Russell Ohl, que había investigado



Karl Ferdinand Braun. Inició la andadura de los semiconductores (1874)

con silicio y que también había descubierto (como Pohl) que según preparase el silicio conseguía cristales *n o p*.

Asimismo, en el Reino Unido, se investigaba con equipos de personas de muy alta calificación, que ayudaron a entender la conductibilidad en los metales, entre los que figuraban Rudolf Peierls, Alan H. Wilson, James Franck, además de Nevill Francis Mott, que años más tarde, en 1977, sería Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre las propiedades electrónicas de las estructuras cristalinas.

Cuando terminó la guerra (1945), los Laboratorios Bell reiniciaron el grupo de investigación de la electrónica de estado sólido, dirigido por William Bradford Shockley y Stanley Morgan. En este equipo figuraban Walter Houser Brattain, John Bardeen, John Pearson,

Bert Moore, y Robert Gibney. Como vemos, figuraban Shockley, Brattain y Bardeen, que se llevarían, en 1947, la gloria del invento del transistor y que les mereció el Premio Nobel de Física en 1956. Casi puede decirse que el transistor fue el resultado de todas las investigaciones que los laboratorios Bell desarrollaron con semiconductores a lo largo del proyecto del radar (1).

Como curiosidad adicional hay que recordar que el transistor fue un dispositivo que, en principio, no tuvo especial interés. Las válvulas electrónicas seguían teniendo mayor aceptación. Unas pruebas: su invención pasó desapercibida, sólo mereció una pequeña nota en la página 46 de *The New York Times*, del 1 de julio de 1948, en la sección de programas de variedades «News of the Radio». En el año 1951, se preferían las válvulas electrónicas en todas las aplicaciones (1).

Pero fue el Ejército de Estados Unidos el que vio las ventajas. Por ejemplo, un destructor de 1937 tenía sólo 60 válvulas electrónicas (aproximadamente 60

transistores); en 1952 eran ya 3.200 válvulas. Así todo, rápidamente empezó a popularizarse el transistor en audiófonos; y por su parte, Sony, en 1955, lanzó al mercado el primer receptor de radio portátil a transistores, frente a los engorrosos portátiles de válvulas, voluminosos, pesados y caros.

Hasta aquí hemos relacionado nombres y fechas, para justificar que el descubrimiento, inicio y desarrollo experimental de la fotoelectricidad no fue como consecuencia de las teorías de Albert Einstein; ya que existía con anterioridad. Pero, contribuyeron al desarrollo de nuevos dispositivos fotoeléctricos.

También hay que subrayar que, una vez conocida, la parte de la Mecánica Cuántica que afecta a la electrónica de estado sólido, se potenció el diseño y la fabricación de semiconductores más fiables y de modo programado científicamente. Consiguiendo, además, aumentar su familia y ampliar sus prestaciones. Avances que también se produjeron en otros campos de la tecnología; por ejemplo con la Metalurgia. Empleada desde hace milenios, se estuvo lejos de alcanzar una comprensión de sus propiedades basada en sus realidades atómicas. La mayoría de los nuevos materiales eran resultado de descubrimientos casuales, o en todo caso, de pruebas sistemáticas; pero, gracias a las aplicaciones de la Mecánica Cuántica, se han conseguido aleaciones y durezas que antes de ella no eran imaginables.

Para terminar, citaremos unas pocas aplicaciones que tienen relación con nuestra profesión y que sí son como consecuencia de las predicciones teóricas de

Einstein. Quedándonos con las más comunes tenemos: la mejora de los dispositivos fotoeléctricos existentes y el nacimiento de otros nuevos; sin olvidarse del Láser, desarrollado hacia 1958 por buen número de científicos, como Alexandr M. Projorov, Charles Hard Townes, etc.; o de que por aplicar la teoría de la relatividad, en la modificación del tiempo, el GPS da con precisión la posición de un punto sobre la Tierra, sistema que sería poco práctico sin su aplicación. Y sin excluir la mayor amplitud de conocimientos que nos ha proporcionado en algunas aplicaciones astrofísicas.

tensión y resistencia eléctrica de una precisión desconocida hasta ahora; la medición de campos magnéticos extremadamente débiles como las ondas cerebrales; o conseguir generadores y detectores de oscilaciones de muy alta frecuencia. También, el *efecto Josephson*, permitió a IBM, en 1980, construir un ordenador experimental más veloz que los de semiconductores de silicio. Sin embargo, hasta ahora, los ordenadores *Josephson* no son prácticos, por tener que trabajar con superconductores, donde se precisan temperaturas muy bajas.

También a la Mecánica Cuántica le

«Las predicciones teóricas de Einstein dieron lugar a diversas aplicaciones comerciales, como el láser»

Asimismo, de la Mecánica Cuántica recordaremos que varios semiconductores, entre ellos varios de aplicación fotoeléctrica, nacieron de la Mecánica Cuántica. Por ejemplo, el diodo túnel (1957-58) y las aplicaciones del *efecto túnel*, estudiados y desarrollados por Leo Esaki, David Josephson e Ivar Giaever; por ese trabajo merecieron el premio Nobel de Física de 1973.

El efecto túnel en el desarrollo de Josephson, que se conoce como *efecto Josephson*, permite tener varias aplicaciones basadas en constantes atómicas, invariables por naturaleza: patrones de

debemos el *efecto Hall cuántico*, que es como una prolongación del *efecto Hall*, descubierto en 1879 por el físico estadounidense Edwin Herbert Hall (1855-1938). El *efecto Hall* cuántico se desarrolla a muy bajas temperaturas, a pocos grados K, y en campos magnéticos muy intensos; es un logro de varios científicos, entre ellos el alemán Klaus Olaf von Klitzing. Entre otras aplicaciones proporciona mejores conocimientos de la estructura atómica a nivel del electrón y también posibilidades de patrones de precisión absoluta e inalterables de resistencias eléctricas. Y para algo más allá, tenemos las investigaciones que se están realizando actualmente en nanotecnología y ordenadores cuánticos, que nos llevarán, como ocurre siempre con las nuevas tecnologías, a posibilidades que ahora, ni esforzándonos, vislumbramos. ●

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Cristales, electrones, transistores. Michael Eckert y Helmut Schubert. Traducido por José Luis Arántegui.
- (2) Semiconductor Surfaces and Interfaces. Winfried Monch.
- (3) Electronic Properties of Semiconductor Interfaces. Winfried Monch. A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us. IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 32, No.12 December 1997. William F. Brinkman, Member, IEEE, Douglas E. Haggan, and William W. Troutman.
- (4) Forjadores de la Ciencia, Julio Alvarez Sánchez. 1983
- (5) El Mundo de la Ciencia, Mark Lambert y otros, traducción M.ª Teresa De Llago y otros; 1981.
- (6) Diccionario Enciclopédico de Radioelectricidad. Fernando Maymó. 1950 aprox.
- (7) Televisión, Alfredo Dinsdale, traducción Luis Amador López. Exclusivas-Lot. Barcelona. 1929

Creamos Tecnología

en Telecomunic@ciones

Televés



Llevamos más de 40 años
desarrollando producto

para la captación y distribución
de señales de televisión

adaptándonos a las nuevas tecnologías
y participando en proyectos europeos

**para el desarrollo de las
Telecomunicaciones del Futuro**

Televés

Televés