

Caída libre

UN PREMIO NOBEL PARA LA FOTOGRAFÍA DIGITAL

Juan Antonio López Villanueva

Reanudamos la sección “Caída Libre” de la revista *Contraluz* dedicada a la divulgación científica con una noticia de especial relevancia sobre uno de los temas pilares tratados por la asociación ACACYR: la concesión del último premio Nobel de Física a los inventores de un dispositivo clave para el desarrollo de la fotografía digital: el CCD. Los dispositivos acoplados por carga, conocidos como CCD por sus iniciales en inglés (“Charge Coupled Devices”) se usaron como sensores de imagen en los prototipos pioneros de cámara digital y se siguen utilizando hoy día en las cámaras de mayor calidad. También son muy comunes en instrumentos ópticos basados en captación de imágenes en diversos campos científicos como la medicina y la astronomía.

Según la noticia hecha pública el 5 de octubre de 2009, la Real Academia Sueca concedía este premio a Willard S. Boyle y George E. Smith por “la invención de un circuito semiconductor para imágenes: el sensor CCD”. El premio era compartido con Charles K. Kao, galardonado éste por “sus logros relativos a la transmisión de luz en fibras para comunicaciones ópticas”, y es la tercera vez desde el año 2000 que se dedica el premio Nobel de Física a reconocer invenciones en el campo de la ingeniería que han fundamentado el gran despliegue de la tecnología de la información y las comunicaciones, que tanta influencia está teniendo sobre nuestras vidas.

El objetivo de esta contribución es resaltar la importancia de los CCD en la fotografía y comentar algunos aspectos curiosos relacionados con la concesión del premio. No obstante, como paso previo en el desarrollo de este artículo, considero que puede resultar de interés para aquellos lectores iniciados en los aspectos tecnológicos el conocimiento de algunos detalles básicos sobre la estructura y operación de estos dispositivos, por lo que paso a esbozar unas pinceladas a continuación. A aquellos lectores menos versados en física y tecnología tentados en abandonar el artículo les ruego que se salten la siguiente sección (¿Qué es un CCD?) y vuelvan a ella al final si he conseguido despertarles el interés por estos dispositivos.

¿QUÉ ES UN CCD?

La estructura fundamental de un CCD, mostrada en la figura 1, se fabrica creciendo sobre un substrato semiconductor de silicio una delgada película de óxido de silicio, que actúa como un aislante con excelentes propiedades, y sobre éste una capa de metal o de un material con propiedades metálicas, llamado electrodo de puerta, de dimensiones micrométricas. Por analogía con los componentes eléctricos llamados “condensadores” (un par de electrodos conductores separados por una capa de material aislante muy delgada), se conoce esta estructura como condensador MOS (Metal-Óxido-Semiconductor).

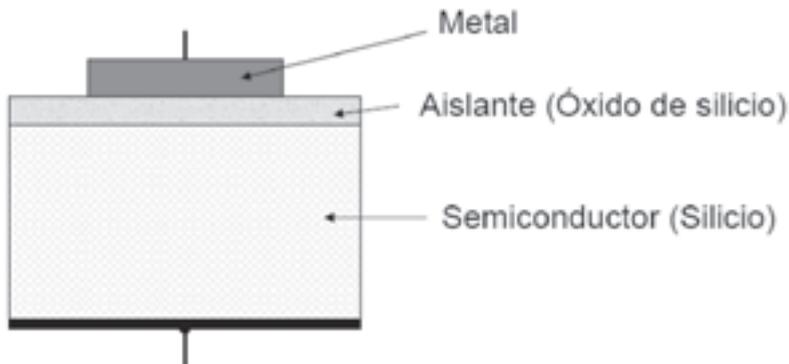


Figura 1.- Condensador MOS (Metal-Óxido-Semiconductor). Es la estructura elemental de un CCD.

En los CCD, el silicio ha sido impurificado con boro en una proporción muy pequeña (una o varias partes por millón). Realmente, la capa de silicio que queda debajo del óxido se ha crecido de forma muy cuidadosa de manera que se consiga un material de gran pureza salvo en lo referente a los átomos de boro, introducidos a propósito. La película de óxido se forma mediante oxidación térmica de la superficie del silicio, esto es, exponiendo el silicio a un ambiente de oxígeno a muy altas temperaturas (próximas a 1000 °C) con un excelente control tanto del tiempo de oxidación como de la temperatura.

El papel de los átomos de boro es el siguiente: cada átomo de silicio está rodeado de otros cuatro, a los que se une formando enlaces químicos. Dispone para ello de cuatro electrones (minúsculas partículas con carga eléctrica negativa, responsables de la conducción eléctrica, que dan nombre a la “electrónica”) llamados de valencia. Los átomos de boro sólo tienen tres electrones de valencia. Eso significa que, cuando un átomo de boro sustituye a uno de silicio, queda un enlace sin formar. A la temperatura ambiente, ese enlace se constituye mediante desplazamiento de un electrón desde un átomo de silicio vecino, por lo que el átomo de boro tiene entonces un electrón más, y queda cargado negativamente. No obstante, como cerca de él queda una carencia de un electrón en uno de los enlaces del silicio, el conjunto es eléctricamente neutro. Resulta, pues, un material que contiene

una pequeña concentración de iones de boro cargados negativamente (aproximadamente un ión por cada millón de átomos de silicio), enlaces químicos insatisfechos en la misma proporción (llamados “huecos” en la terminología electrónica), y casi ningún electrón que se pueda mover libremente por el material. El metal, en cambio, está formado por una alta densidad de iones fijos con carga positiva y un gran número de electrones que se pueden mover casi libremente en su seno. Cualquier pequeño volumen de metal tomado al azar resulta eléctricamente neutro, pero la alta densidad de electrones casi libres puede conducir una corriente eléctrica con muy baja resistencia.

Supongamos ahora que se aplica repentinamente a la estructura una tensión eléctrica con la polaridad de la batería mostrada en la figura 2-(a). El campo eléctrico impuesto por la batería atrae electrones de enlace en el semiconductor de manera que ocupan todos los enlaces insatisfechos presentes previamente, quedando una capa debajo del aislante de aproximadamente una micra de espesor (una milésima de milímetro), llamada capa de carga espacial, que ya no es eléctricamente neutra, ya que los átomos ionizados de boro no están neutralizados por huecos (enlaces insatisfechos) en ella. La carga negativa de esta capa induce una lámina de carga igual y de signo contrario en el metal, pero como en éste la densidad de iones es muy superior, el espesor necesario es pequeñísimo, por lo que esta carga positiva puede considerarse situada prácticamente en la superficie de separación entre el metal y el aislante.

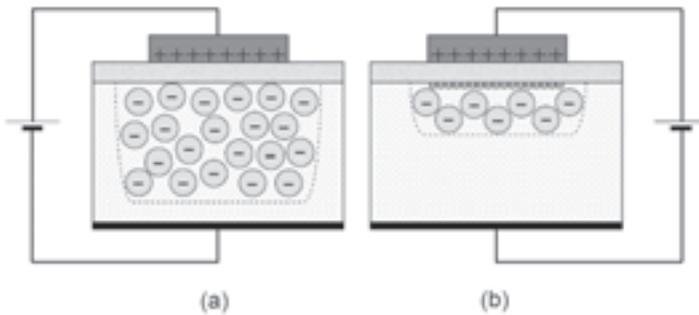


Figura 2.- a) Justo después de aplicar una tensión eléctrica.
b) Un tiempo largo después de aplicar la tensión eléctrica.

Aunque la concentración de electrones libres es prácticamente nula en el semiconductor en equilibrio y en condiciones de neutralidad eléctrica, en la capa de carga espacial se forma un “pozo” que atrapa cualquier electrón libre que cayera en él y lo acerca a la superficie de separación entre el semiconductor y el aislante, de manera que si se libera un electrón al romperse algún enlace químico por la agitación térmica de los átomos en el semiconductor, éste es rápidamente atrapado. Si esperáramos un tiempo suficientemente largo se terminaría formando una capa de electrones casi libres que casi compensa a la carga positiva del metal,

pudiendo reducirse el ancho de la capa de carga espacial a aproximadamente una décima parte del valor inicial. Se dice entonces que el pozo se ha “llenado” de electrones. Esto se ilustra en la figura 2-(b).

Sin embargo, el CCD opera de forma pulsada, y la tensión eléctrica positiva se aplica al electrodo metálico de forma periódica durante intervalos de tiempo muy pequeños. Como la generación térmica de electrones es muy improbable, la capa de electrones casi libres mostrada en la figura 2-(b) no tiene tiempo de formarse. Existen, no obstante, dos mecanismos por los cuales puede llenarse el pozo de electrones durante la operación normal de un CCD. Uno de ellos es mediante transferencia de electrones desde el pozo de una celda muy próxima que los contenga, cuando disminuye la tensión eléctrica positiva aplicada a esta celda mientras se aplica una tensión positiva suficientemente elevada a la siguiente, tal como se muestra en la figura 3-(a). El otro mecanismo es por liberación de electrones producida por absorción de luz, ilustrada en la figura 3-(b), a través del efecto fotoeléctrico, que fue explicado por Albert Einstein a principios del siglo XX.

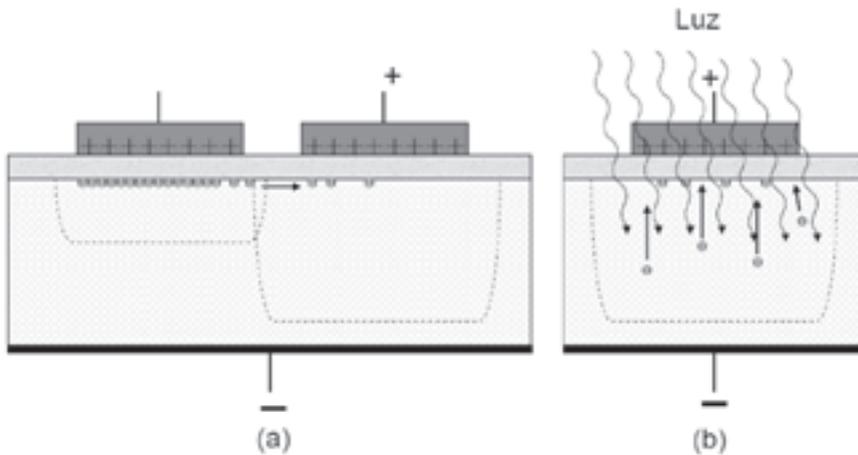


Figura 3.- a) Transferencia de electrones entre celdas adyacentes de un CCD.
b) Generación de electrones por absorción de luz en una celda CCD.

El efecto fotoeléctrico se basa en lo siguiente: se sabe que la luz se comporta como una onda y también como un conjunto de partículas llamadas fotones. Cuanto mayor es la intensidad de la luz, mayor es el número de fotones que viajan con ella. Los fotones tienen una energía que es proporcional a la frecuencia de vibración de la onda asociada, y que varía, por tanto, con el color de la luz. Los fotones más energéticos de la luz visible son los de la zona azul-violeta, y los de menos energía son los de la luz roja. Los de la luz verde o amarilla tienen energías intermedias entre ambos extremos. La luz blanca es una mezcla de todos estos colores. Cuando la luz atraviesa el material, si los fotones tienen suficiente energía para romper los enlaces químicos y liberar electrones, esta luz se absorbe, y la energía de cada fotón que desaparece se invierte en liberar un electrón.

Los electrones liberados por la absorción de la luz quedan atrapados en el pozo, esto es, son desplazados por el campo eléctrico a la zona próxima a la superficie de separación entre el silicio y el aislante, en donde se acumulan ya que el óxido impide su paso hacia el metal. La cantidad de los electrones presentes en el pozo después de un tiempo prefijado es, por tanto, una medida de la intensidad de luz incidente durante ese periodo de tiempo.

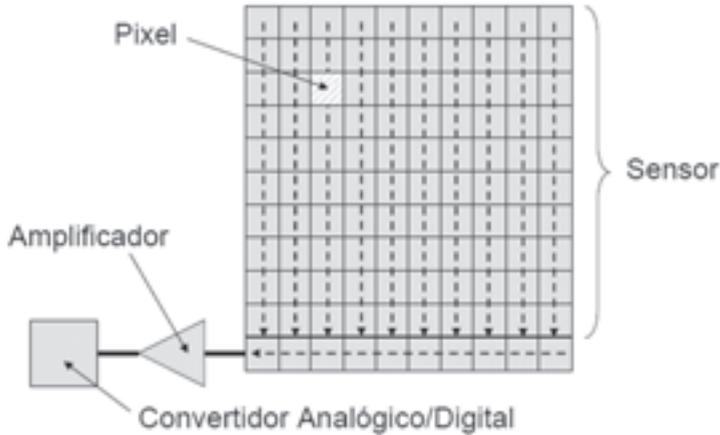


Figura 4.- Procedimiento de lectura de la información grabada en una matriz de celdas CCD

El sensor de imágenes basado en CCD sustituye a la película fotográfica de las cámaras tradicionales: sobre él incide la luz procedente del objeto después de ser enfocada por el objetivo. Se necesita, pues, un microcondensador MOS elemental o celda CCD para cada pixel, o mejor dicho, tres (o cuatro) celdas por pixel, una para cada color elemental. Para conseguir que la celda sea sensible a la luz de un color dado, se sitúa delante de ella un filtro diminuto que deje pasar únicamente la luz de ese color. La estructura se fabrica utilizando la misma tecnología que se desarrolló para la producción de circuitos integrados de silicio, mediante la cual se define un elevado número de píxeles situados próximos entre sí en una matriz rectangular, con el circuito de lectura en la periferia. Utiliza, por tanto, los dos mecanismos esquematizados en la figura 3: la imagen se graba mediante la generación de electrones en respuesta a la luz incidente, y posteriormente se van desplazando los paquetes de electrones almacenados en cada pixel de celda a celda hasta alcanzar la periferia, donde son medidos de forma secuencial y codificados asignándoseles un valor digital representativo de la intensidad de luz incidente. Esta operación se ilustra de forma esquemática en la figura 4: se desplazan las filas sucesivamente, de manera que cada una de ellas se vaya cargando en la fila lectora, situada en el borde inferior, y una vez cargada se desplazan las celdas de esa fila hacia la izquierda haciéndolas pasar por el lector. El amplificador sensible a la carga genera una tensión eléctrica correspondiente a la lectura del contenido en electrones de cada celda, que es a su vez proporcional a la intensidad

luminosa que ha recibido, y posteriormente esa tensión eléctrica se convierte a una palabra digital.

Resumiendo, el CCD se fabrica sobre una oblea de silicio mediante un proceso similar al utilizado en la tecnología de circuitos integrados, esto es, la que se utiliza para la producción de microprocesadores y memorias. Usualmente, la capa fotoactiva se crece de forma epitaxial (capa a capa) sobre el silicio fuertemente dopado con boro, para conseguir mayor control y pureza. La cara frontal del dispositivo alberga electrodos metálicos, o de comportamiento metálico, llamados de puerta, mientras que la cara posterior es silicio volúmico, usualmente con una capa metálica delgada posterior. La estructura del CCD permite integrar la capacidad de grabación de la imagen con una lectura simple y eficiente: no se forma por la división del propio silicio en píxeles individuales, sino que los píxeles se definen por la posición de los electrodos de puerta sobre la superficie del CCD. Con exposición creciente a la luz, la superficie bajo el electrodo atraerá electrones hasta que el pozo de potencial se llene (llamada "capacidad de pozo lleno"). Para evitar sobreexposición, la luz debe ser bloqueada antes de que esto ocurra. Esto puede conseguirse bien usando un obturador, como en una cámara, o fabricando el CCD de manera que tenga áreas inactivas a las cuales puedan transferirse rápidamente los contenidos de los píxeles en espera de la lectura, mientras que la parte activa del CCD pueda seguir recogiendo luz. Para la grabación de imágenes en forma continua se usan con frecuencia los sistemas llamados de "marco completo", en los que la luz se recoge sobre el sensor completo, simultáneamente, pero para detectar y almacenar la imagen se transfiere rápidamente la carga generada a un área de mantenimiento de igual tamaño que el sensor, apantallada de la luz, desde la cual pueda ser leída la imagen mientras se está recogiendo la siguiente. En otros diseños existen columnas CCD apantalladas de la luz adyacentes a las activas, con rápida transferencia y lectura de la carga. Aunque esto puede significar un menor aprovechamiento del área, pueden realizarse ciertas compensaciones usando lentes pequeñas.

La sensibilidad de un CCD depende de la longitud de onda (esto es, del color) de la luz y del tipo de dispositivo. Se consiguen eficiencias de conversión de fotones absorbidos a electrones generados próximas al 90%, es decir, más de ocho de cada diez fotones de luz incidentes generan electrones, mientras que se estima que son necesarios unos cien fotones para romper un enlace químico en la emulsión de una película fotográfica de las que hoy día podemos llamar "antiguas cámaras". Otra propiedad importante es el rango dinámico, esto es, la capacidad para adquirir imágenes muy brillantes y muy débiles al mismo tiempo. El rango dinámico se determina por la relación entre la capacidad de pozo lleno y el nivel de ruido. Una cifra común para la capacidad de pozo lleno es de unos 10000 electrones, y el nivel de ruido de lectura (cantidad fluctuante en ausencia de luz) es de unos pocos electrones, de manera que el rango dinámico puede ser del orden de 50000. La resolución de un CCD se determina por el tamaño de los píxeles. Un tamaño típico de pixel es de diez micras, aunque es posible fabricar CCDs de incluso una o dos micras, por lo que se pueden conseguir densidades de varios megapíxeles por centímetro cuadrado de sensor de forma habitual hoy día.

Después de la descripción de la estructura y operación del CCD, pasamos a comentar algunos detalles históricos de la invención, de la concesión del premio, y de la polémica suscitada con él, como parece inevitable en estos casos, y que en cualquier caso seguramente ha sido de menor intensidad y trascendencia pública que la que ha acompañado a la concesión del premio Nobel de la Paz al presidente B. Obama en la misma convocatoria.

LA INVENCION Y LA POLÉMICA

Willard S. Boyle nació en Amherst, Nueva Escocia, en 1924. Se educó en la Universidad McGill y obtuvo el doctorado en Física en 1950. Ingresó en los Laboratorios Bell en 1953. George E. Smith nació en White Plains, Nueva York, en 1930. Obtuvo el doctorado en Física por la Universidad de Chicago, en 1959, y se incorporó a los laboratorios Bell en el mismo año. Tanto Boyle como Smith trabajaban, pues, en los Laboratorios Bell, en New Jersey, cuando concibieron el dispositivo CCD. Smith trabajaba como jefe de departamento bajo la supervisión de Boyle, que era el director del laboratorio de desarrollo de dispositivos. La situación en aquel momento queda descrita por las propias palabras de Smith, tomadas de un artículo escrito recientemente por él publicado recientemente (Referencia 4) “:

“... debemos mirar a la estructura de la División Electrónica de Bell Labs, bajo la vicepresidencia de Jack Morton. Ésta estaba separada en dos divisiones, una para dispositivos semiconductores y otra para todos los demás. Bill Boyle era Director Ejecutivo de la parte de semiconductores, y yo era un Jefe de Departamento bajo él. Jack Morton estaba ansioso por acelerar el desarrollo de las burbujas magnéticas como una tecnología principal de memoria, y estaba planeando transferir fondos de la división de Bill a la otra en la que se estaba realizando el trabajo sobre las burbujas. Para que esto no ocurriera, Morton demandó que la división de Bill apareciera con un dispositivo semiconductor que compitiera con las burbujas. Para atender esta demanda, el 17 de octubre de 1969, Bill y yo nos encerramos en su oficina, y en una discusión que no duró más de una hora, la estructura básica del CCD quedó esbozada en la pizarra, los principios de operación fueron definidos, y se desarrollaron algunas ideas concernientes a las aplicaciones. El tren de pensamiento evolucionó como sigue: primero se necesitaba una analogía semiconductor de la burbuja magnética. El dual eléctrico es el paquete de carga. El siguiente problema es cómo almacenar esta carga en una región confinada. la estructura que vino a la mente era un simple condensador MOS en depleción; la estructura del condensador MOS es el elemento principal de la segunda contribuyente y fuertemente perseguida tecnología de los circuitos integrados MOS”.

Estas ideas fueron publicadas en dos artículos, uno teórico y el otro experimental, en el mismo número de la revista Bell Systems Technical Journal, en 1970. El primero de ellos estaba firmado por W.S. Boyle y G.E. Smith, y los autores del segundo fueron G.F. Amelio, M.F. Tompsett and G.E. Smith. Esa “discusión de una hora de duración” entre Boyle y Smith en 1969 condujo en los años posteriores a un enorme desarrollo de sistemas de instrumentación científica y práctica basada en CCD: cámaras digitales, dispositivos médicos e instrumentación científica de altas prestaciones, con especiales aplicaciones para astronomía y astrofísica. El

primer prototipo de CCD se muestra en la figura 5, y una de las primeras cámaras construidas por Tompsett se ilustra en la figura 6. En la fotografía de la figura 7, tomada en 1974, podemos observar a los dos inventores premiados junto a una cámara experimental de televisión que incorporaba un sensor CCD en lugar de un tubo de vacío.

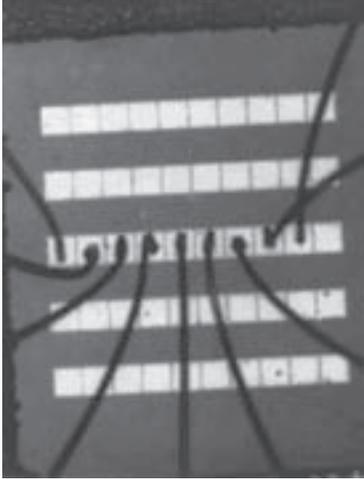


Figura 5.- Primer prototipo de CCD: estructura rudimentaria, con un número pequeño de celdas. (Fuente: referencia 4)



Figura 6.- Una de las primeras cámaras experimentales que incorporaban CCD. (Fuente: referencia 4)

De manera semejante a lo que ocurrió con los incipientes paneles fotovoltaicos, no es de extrañar que fuera la astronomía uno de los primeros campos que comenzaron a beneficiarse rápidamente de estos nuevos dispositivos. Como es habitual, en las primeras fases de desarrollo de muchos dispositivos los costes de los prototipos pioneros son muy elevados, pero en el caso de la astronomía, la necesidad de poner estos sistemas en órbita hace que las opciones clásicas alternativas puedan ser mucho más costosas. Según cuenta James Janesick, actualmente director del área de desarrollo de sensores de una importante compañía, que a principios de los años 70 del siglo pasado trabajaba como investigador joven en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA, en Pasadena, California, donde trataban de desarrollar sensores de imágenes para el Telescopio Espacial Hubble, se estaban planteando incluso incorporar películas fotográficas en las cámaras del telescopio y enviar astronautas para recuperarlas. Entonces aparecieron los CCD, 100 veces más sensibles que cualquier película u otro tipo de cámara y capaces de proporcionar la imagen en formato electrónico, fácilmente transferible a la Tierra mediante ondas de radio. Obviamente, cualquier otro sistema de captación de imágenes fue rápidamente descartado. El Hubble se equipó finalmente con varias cámaras CCD para diferentes propósitos. James Janesick afirma que siempre ha pensado que Boyle y Smith deberían recibir el premio Nobel, porque su invento *“además de permitir observar los confines del Universo, que es para lo que se aplicó la tecnología en aquel tiempo, ha generado hoy día miles de millones de dólares”*.



Figura 7.- W.S. Boyle (izquierda) y G.E. Smith (derecha), manipulando una cámara experimental de televisión que incorporaba un sensor CCD en lugar de un tubo de vacío (1974). (Fuente: referencia 4)

A pesar de contar con opiniones favorables como la mencionada, la concesión del premio no ha podido escapar de la polémica. Los aspectos principales de ésta se han centrado en la originalidad o la autoría de la invención. Por una parte, el condensador MOS era un dispositivo bien conocido. En 1959 ya había sido propuesto como elemento con capacidad variable con la tensión eléctrica, y era la estructura básica de control de la conductividad eléctrica en el transistor MOS, fabricado en 1960 también en Bell Labs. Estos transistores forman hoy día los microprocesadores y chips de memoria presentes en nuestros ordenadores personales, constituidos por cientos de millones de estos dispositivos en un solo chip. Por otra parte, el concepto de transferencia de cargas a lo largo de una cadena de dispositivos semiconductores se usaba en el dispositivo llamado BBD (“bucket brigade device”) patentado en 1967 por F. Sangster, y publicado en 1969. En este dispositivo se transferían las cargas entre condensadores sucesivos por medio de transistores. Sin embargo, el CCD utiliza un procedimiento diferente y más eficiente, en el que se crean “burbujas de carga” que fluyen semicontinualmente a lo largo de la cadena.

El principal punto de la discordia surgió por la frase utilizada por la Real Academia Sueca en la concesión del premio: “la invención de un circuito semiconductor para imágenes”. Realmente, lo que proponían Boyle y Smith era un circuito para aplicaciones de memoria, de manera que se pudiera almacenar y transferir la información fácilmente de elemento a elemento, y no un dispositivo de imágenes, aunque por supuesto no es la primera vez que una invención o un descubrimiento ha terminado aplicándose de forma muy diferente al planteamiento que lo motivó.

Según diversas entrevistas publicadas en la revista IEEE Spectrum (Referencia 5), uno de los primeros testigos del descubrimiento que abrieron la polémica fue el actual director general de una compañía de dispositivos médicos, Eugene Gordon, que también trabajaba en los laboratorios Bell bajo la supervisión de W.Boyle. Según Gordon, él le dio

la idea a Smith de la transferencia de carga, antes de su famosa charla con Boyle, y por otra parte, según sus palabras, *“fue Michael F. Tompsett quien inventó, diseñó y construyó la primera cámara CCD. Smith tuvo poco que ver con eso, y Boyle no tuvo que ver nada”*. Incluso la cámara que manipulan Boyle y Smith en la fotografía ampliamente divulgada en prensa, reproducida aquí en la figura 7, parece haber sido construida por Tompsett. Su opinión es que no debería haberse concedido un premio Nobel de Física por el dispositivo, sino más bien algún premio de ingeniería, y que en caso de haberse concedido uno, debería ser para Mike Tompsett en solitario. Por otra parte, preguntado Tompsett por este asunto, manifestó que efectivamente él se consideraba el diseñador del primer circuito de imágenes, que la aplicación del concepto a la obtención de imágenes y la reducción a la práctica fue suya, aunque nunca pensó en recibir un premio Nobel por ello, y que no piensa objetar nada al premio, pero le gustaría compartir el crédito, junto con el resto del grupo de CCD de Bell Labs, particularmente Carlo Sequin. De hecho el campo de las imágenes era su línea de trabajo, en la que acreditaba cierta experiencia, habiendo inventado ya una cámara de infrarrojos de tubo en Inglaterra, antes de incorporarse a Bell Labs. Tompsett aparece como único autor de la patente titulada *“Dispositivos de imágenes por transferencia de carga”*. (Patente U.S.A. N° 4.085.456), También comenta que la cámara mostrada en la figura 6, que Smith incluyó en su conferencia Nobel como primera cámara que incorporaba CCD, fue construida por él y en realidad se trataba de la segunda. También Carlo Sequin, antes mencionado, incorporado a Bell Labs nueve meses después de la invención del CCD, ha opinado en este asunto. Según Sequin, depende de lo que se celebre: si, tal como él cree, el premio Nobel de Física reconoce conceptos fundamentales, entonces debería ser para Boyle y Smith, y quizá también para Gordon, pero si se busca a quien consiguió el primer sensor de imágenes práctico, entonces debería ser para Mike Tompsett y posiblemente Amelio. Según la descripción de los hechos por parte de Sequin, había muchos problemas que resolver, y Tompsett les hizo frente con ideas como, por ejemplo, la duplicación del sensor mediante el principio de la transferencia de marco. También insiste Sequin en la participación de otros investigadores del grupo de CCDs de Bell Labs, incluido él mismo, e incluso de otros equipos de otras empresas, con quizá mayores méritos en el gran despliegue de la tecnología, ya que Bell Telephone estaba interesada en los CCD en el marco de un proyecto de teléfono capaz de transmitir imágenes, y cuando renunció al proyecto, fueron otras compañías como Fairchild Semiconductor las que recogieron el testigo para perfeccionar el dispositivo. Finalmente, también se preguntó a Willard Boyle sobre todo esto, quien negó la participación de Eugene Gordon, por no existir documento escrito, mientras que de Tompsett afirmó que quizá sí hubiera sido justo que se le hubiera reconocido también, porque fue uno de los tres que construyeron el primer modelo. En cualquier caso, la Real Academia Sueca parece haberse basado en hechos como la autoría de la primera patente sobre el concepto fundamental y el primer artículo publicado por los dos inventores, en el cual, aunque se refiere a aplicaciones de memoria, también se menciona la posibilidad de usarlo en un dispositivo de imágenes. En cualquier caso, lo que se pretende resaltar en este artículo es el reconocimiento del dispositivo y sus aplicaciones, en lo que seguramente

participaron muchos científicos e ingenieros que no fueron suficientemente reconocidos en la conferencia pronunciada por George Smith en los actos de recepción del premio Nobel.

También debemos dedicar unas palabras a otra patente relevante en el desarrollo de la cámara digital: la presentada en 1975 por Steven J. Sasson y Garet A. Lloyd. (Referencia 7) Sasson trabajaba en Eastman Kodak bajo la supervisión de Lloyd, y éste le propuso el diseño de una cámara que incorporara los nuevos sensores electrónicos de imagen. En realidad las primeras cámaras desarrolladas en Bell Labs son más bien cámaras de televisión analógicas que conseguían representar la imagen de forma electrónica, pero no en forma digital. Para ello faltaba incorporar un convertidor analógico digital. Sasson incorporó a su cámara un CCD comercializado por Fairchild Semiconductor en 1973 y un convertidor analógico-digital fabricado por Motorola. También añadió una cinta magnética como medio de almacenamiento de la imagen. El prototipo resultante, mostrado en la figura 8, pesaba unos 3,6 kilogramos, tenía el tamaño de una tostadora, convertía la imagen con 0,01 megapíxeles (10000 píxeles) y tardaba unos 23 segundos en grabar la imagen en la cassette digital. Sasson y Lloyd consiguieron la patente U.S.A. 4.131.919 en 1978, aunque Kodak no comercializó cámaras fotográficas digitales hasta 1991.



Figura 8.- Prototipo pionero de cámara fotográfica digital con CCD, fabricado por Steve Sasson en 1975

APLICACIONES Y ALTERNATIVAS

A lo largo de los últimos cuarenta años, los sensores CCD han encontrado importantes aplicaciones en muchas áreas. Se han fabricado millones de cámaras digitales que usan

sensores CCD, y se han aplicado también en escáneres, sistemas médicos, sistemas de vigilancia por satélite y en instrumentación en astronomía y en astrofísica. Además del Telescopio Espacial Hubble, ya mencionado, podemos reseñar otros ejemplos notables, como el Telescopio de Reconocimiento Panorámico y Sistema de Respuesta Rápida PAN-STARRS, de Hawaii, uno de los mayores sistemas de imágenes construidos, con varias cámaras consistentes en mosaicos de chips CCD con un total de más de 5 gigapíxeles, o el Espectrómetro de Imágenes CCD avanzado del Observatorio Chandra, con un megapixel de sensores sensibles a los rayos X, con el cual se afirma haber observado el contorno de un agujero negro.



Figura 9.- Imagen estelar recogida por las cámaras CCD del Telescopio Espacial Hubble
(Fuente: NASA, ESA y STScI)

En el campo de las aplicaciones médicas, en términos generales, la fotografía digital ha revolucionado casi todas las herramientas de diagnóstico basadas en captación de imágenes, utilizándose en microscopía, para la grabación de imágenes fluorescentes de células y tejidos teñidos, en endoscopía, y en microcirugía. La llegada de la imagen al sensor óptico se puede producir a través de fibras ópticas o incluso en el interior de cápsulas endoscópicas (Figura 10) susceptibles de ser tragadas y de emitir las imágenes detectadas al recorrer el aparato digestivo mediante transmisión inalámbrica (por radio) a receptores situados en el exterior del abdomen, aunque en este caso el sensor de imágenes suele ser más bien de tipo CMOS, del que hablaré un poco más adelante. Otra aplicación reciente para los sensores digitales de imágenes de alta resolución son los sistemas de medida sin lente en biosensores en los cuales se realiza una grabación directa de la célula muestreando el flujo a través de un chip microfluídico.

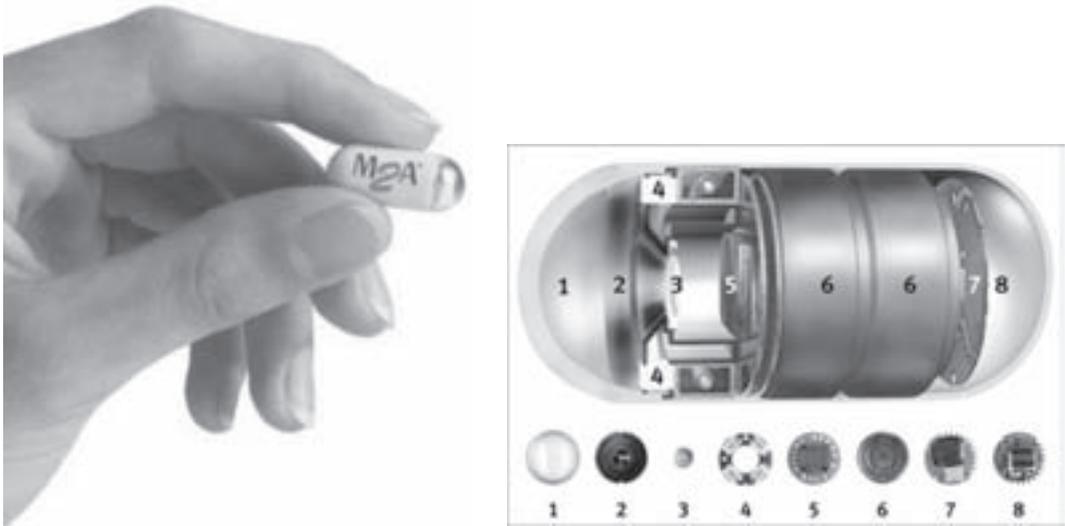


Figura 10.- Cápsulas endoscópicas. 1, 2 y 3: Sistema óptico (lentes); 4: Diodos emisores de luz, 5: Sensor de imágenes, 6: Baterías, 7: Circuito transmisor, 8: Antena.

Una importante alternativa a los CCD, de gran despliegue reciente, son los sensores de imágenes CMOS. En estos sistemas cada pixel contiene un fotodiodo para cada color y un microcircuito CMOS de lectura bajo él. Cada pixel se lee individualmente de forma similar a cómo se accede a la información almacenada en los “chips” de memoria. En general estos sensores son menos sensibles pero más económicos y, después del alto grado de miniaturización conseguido en la tecnología microelectrónica, se están imponiendo en gran cantidad de cámaras digitales de inferiores características como son las que se incorporan en los teléfonos móviles. Aunque sus prestaciones son actualmente inferiores a las de los CCD, se esperan importantes mejoras a medida que se avanza en la microelectrónica y es posible que terminen desplazando a los CCD en la mayoría de las aplicaciones, excepto en las de muy alta gama.

En general, al proporcionar la información contenida en las imágenes en forma de señales digitales, que pueden ser transmitidas y procesadas con extrema facilidad, los sensores de imágenes de estado sólido, sean de tipo CCD o de tipo CMOS, incorporados en las cámaras digitales, han revolucionado el papel de las imágenes en nuestra sociedad, no sólo por las enormes posibilidades que han abierto a la ciencia o a la medicina, como ya hemos comentado, sino también por la forma en la que han afectado a nuestras propias vidas, a la forma en la que nos comunicamos con nuestros semejantes. Como ha ocurrido en otros casos, seguramente ha sido este enorme impacto, demostrado cuarenta años después, más que el propio logro científico, el que ha motivado la concesión del premio Nobel de Física a sus inventores.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- "Two revolutionary optical technologies. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2009". The Royal Swedish Academy of Science, 2009.
- 2.- W.S. Boyle and G.E. Smith, "Charge Coupled Semiconductor Devices", *Bell Systems Technical Journal* 49 (1970) 587
- 3.- G.F. Amelio, M.F. Tompsett and G.E. Smith, "Experimental Verification of Charge Coupled Device Concept", *Bell Systems Technical Journal*, 49 (1970) 593.
- 4.- G.E.Smith, "The invention and the early history of the CCD", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 607 (2009) 1
- 5.- S.K.Moore, N.Savage, "The Nobel Prize and its discontents", *IEEE Spectrum*, 46 (2009) 11
- 7.- Steven Sasson, Wikipedia: es.wikipedia.org/wiki/Steven_Sasson