Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

Sensores CMOS y CCD

Verónica Romina Bustamante

1. Introducción

En este trabajo se pretende dar un resumen de el desarrollo y la evolución de las tecnologías de sensores de imágenes CCD y CMOS, desde su desarrollo en la década del 80 hasta la actualidad.

Para el estudio del desarrollo histórico se utilizó como fuentes de primera mano los testimonios de sus autores, cuando sea posible, en base a los artículos publicados oportunamente en revistas reconocidas. Para analizar el estado del arte, se analizó la oferta en el mercado profesional y hogareño, y la reseña de profesionales en el área.

2. Sensores CCD

George Smith cuenta en su artículo sobre la invención del CCD (Smith, 2010) que en el tiempo del desarrollo de esta tecnología había 3 otras en las cuales había interés:

Esta fundamentado en las siguientes tres tecnologías de la época: Memoria de burbujas magnética, cámara de tubo de matriz de diodos de silicio y tecnología CMOS (que desarrollaremos más adelante).

2.1. Memoria de Burbujas Magnéticas

Se solían armar colocandole un campo eléctrico vertical a un bloque de algún granate (aunque podía ser algún otro material magnético) . Como el granate al ser un material magnético tiene dipolos magnéticos que deben contrarrestar el efecto del campo que hemos aplicado, lo que ocurre es que se forma otro campo magnético en la placa de modo que minimice la energía (por lo cual algunos quedan alineados en dirección al campo y otros quedan en dirección opuesta a éste). Entonces el resultado que se da es que existen áreas del granate con la forma que se puede observar en la figura 1 a las cuales se las llamaba burbujas. Al aumentar el campo externo algunos dipolos van a rotar y quedar apuntando para el lado opuesto o se van a mover sobre la placa de forma que se van a deformar las burbujas. En un caso extremo tenemos el segundo esquema de la figura 1.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

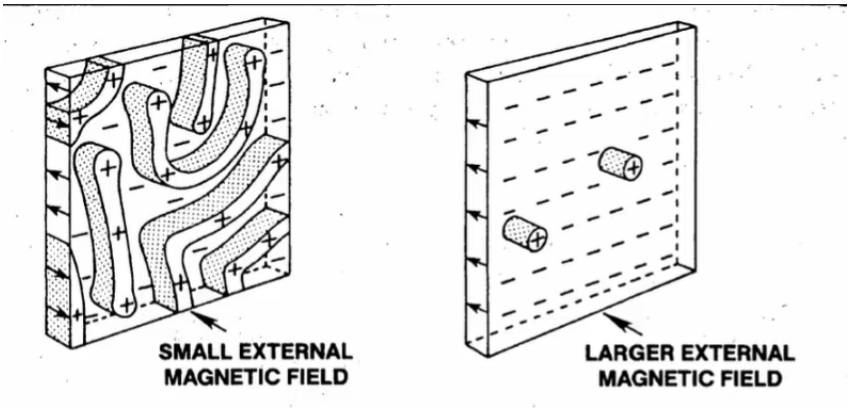


Figura 1: Campo magnético resultante

Para que las burbujas roten, necesitan hacerse espacio(*Magnetic Bubble Memory Fundamentals 101: Domains, 2 Dimensional Magnetics, Bubble Stability*, n.d.), por lo cual van a empujarse sobre la placa. Si la alineación de las burbujas representa unos o ceros, al disponer de un dispositivo para formar (escribir) estas burbujas en el material y otro dispositivo para leerlas , disponemos de una memoria serie.

Para aislar nuestra placa de todo campo magnético externo y evitar que interactúe con esta, se utiliza un Mu Metal (Shield). Podemos observar en la figura 2 cómo se armaba una Memoria de Burbujas magnéticas.

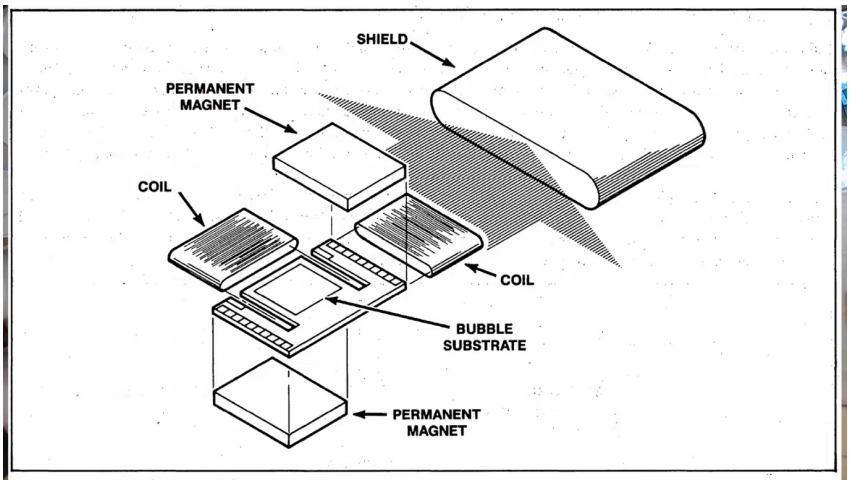


Figura 2: Memoria de Burbujas magnéticas

En la figura 3 se observa con mayor detalle un corte de la memoria.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

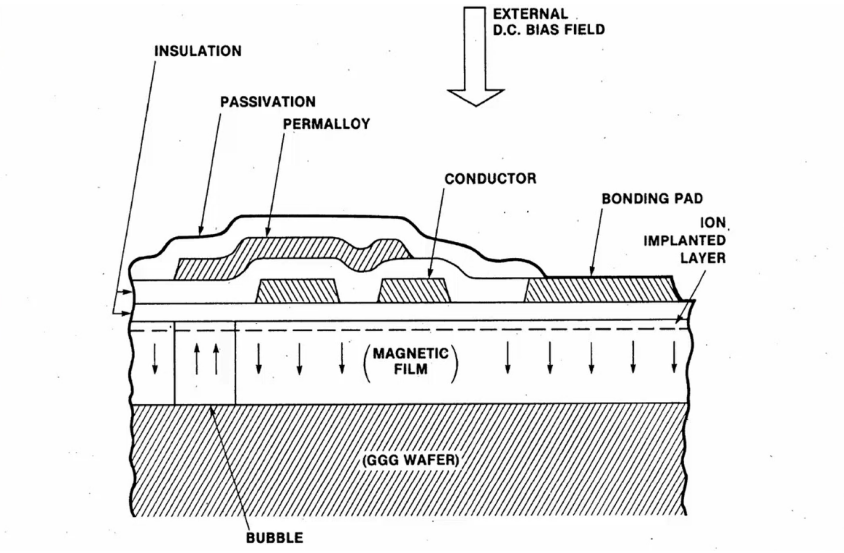


Figura 3: Corte transversal de la memoria

2.1.1. Cámara de tubo de matriz de diodos de silicio

Para entender la cámara de tubo de matriz de diodos de Silicio primero entendamos que era una cámara de tubo Vidicon. La cámara de tubo Vidicon era un tipo de cámara que funcionaba con el principio de la fotoconductividad. Se coloca una lente cerca de la imagen que se quiere emitir, por esa lente pasará luz, que luego pasará por otra lente que está adherida a un revestimiento conductor por donde también pasará. Sobre el revestimiento conductor se genera un cambio en la resistencia, a mayor luz habrá menor resistencia y a menor luz, mayor resistencia.(*Vidicon Camera, Diagram & Working of Vidicon Camera, Advantages & Applications of Vidicon Camera*, n.d.) . Al lado del revestimiento hay una superficie fotoconductora a la que se le inyectará un rayo de electrones de baja velocidad (Crowell & Labuda, 1969). Esta superficie fotoconductora posee al lado un tubo de donde sale este rayo, podemos ver a continuación un esquema.

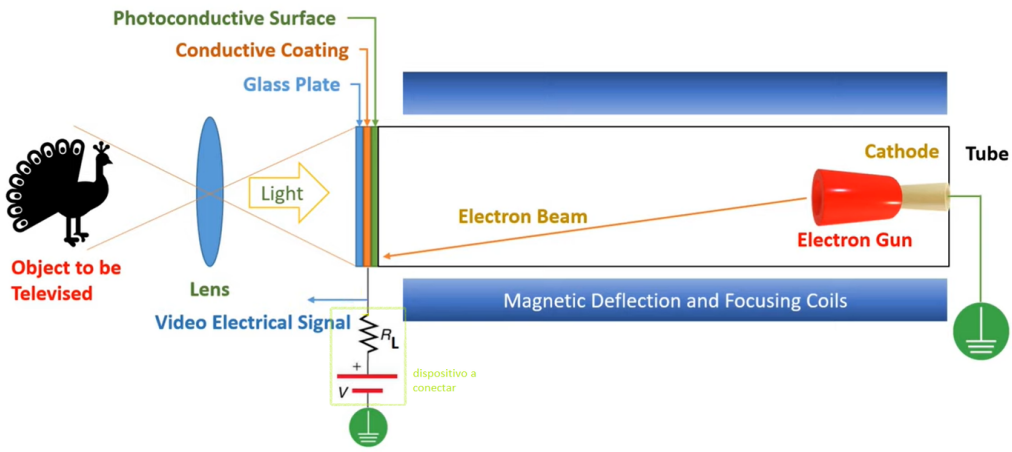


Figura 4: Vidicon camera

En conclusión, en la superficie conductora veremos puntos blancos y negros dependiendo de la resistencia y esos los queremos utilizar para armar la imagen (que será nuestra señal eléctrica). Para eso debemos hacer un escaneo horizontal y vertical, con lo cual utilizaremos deflexión magnética y bobinas de enfoque.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

Si conectamos un dispositivo a la superficie conductora, obtendremos nuestra señal eléctrica de video.

Ventajas

- Tamaño pequeño
- Baratas
- Fáciles de operar
- Gran sensibilidad
- Buena resolución (alrededor de 350 líneas)

Desventajas

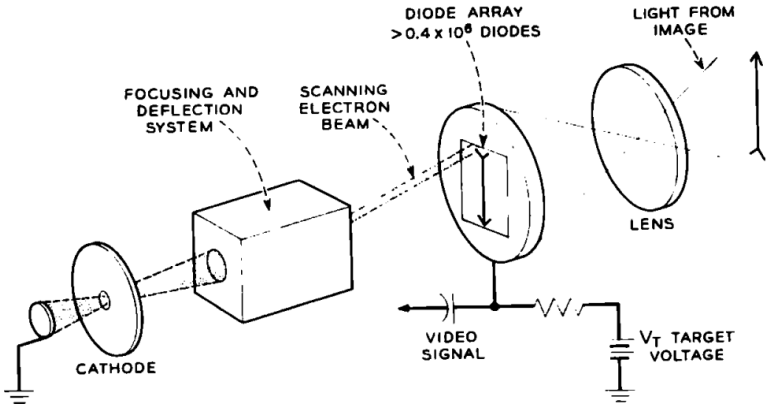
- Para imágenes en movimiento las hace parecer estáticas.
- Si hay imágenes muy brillosas, atrás de las luces se observan imágenes muy descoloridas.
- Hay poca linealidad

Para solucionar las desventajas que poseía y establecer mejoras, se propuso reemplazar la superficie conductora por una matriz plana de fotodiodos de silicio polarizados inversamente. Así nació la cámara de tubos de matriz de diodos de silicio.

Entre las ventajas que presentaba con su predecesora encontramos las siguientes (Crowell & Labuda, 1969) :

- Respuesta espectral tendiendo a constante de 0.45μ a aproximadamente 0,90 μ.
- Si variamos el tamaño de la trama, en el mosaico de diodos, podremos aumentar la resolución electrónica.
- No hay persistencia de imagen no deseada como resultado del *lag* del fotoconductor.

Un esquema de como era esta cámara podemos verla en la siguiente imagen (Crowell & Labuda, 1969) , en la cual notamos que es análoga a su predecesora salvo por el array de diodos.



—Schematic of a diode array camera tube. The electron beam scans the diode side of the array, and the optical image is focused onto the substrate of the array.

Figura 5: Esquema de cámara de tubo de matriz de diodos. El haz de electrones escanea el lado del diodo de la matriz, y la imagen óptica se enfoca en el sustrato de la matriz.

2.2. El primer sensor CCD

En realidad, se llamaba en aquel entonces CBD, pero los chinos que no podían hablar en español dijeron "sesedé", y quedó CCD.

Volviendo al origen de CCD, Smith cuenta que en su laboratorio se buscaba un producto compentitivo con las memorias de burbuja, con un dispositivo semiconductor. Junto con Boyle pudieron desarrollarlo.

Respecto a la cámara de tubos de diodos de silicio, se esperaba encontrar un dispositivo de estado sólido para eliminar el rayo de electrones.

Figura 6: W. S. Boyle y G. E. Smith, 1970

Smith menciona como desarrollaron el funcionamiento de CCD:

> Se necesita la analogía del semiconductor de la burbuja magnética. El dual eléctrico es un paquete de carga. El siguiente problema es cómo almacenar esta carga en una región confinada. La estructura que me vino a la mente, de por supuesto, fue el simple condensador MOS. Se puede introducir carga en esta región de agotamiento con la cantidad de carga almacenada siendo la magnitud de la señal.[...] A medida que se introduce carga en la región de agotamiento, el potencial en la superficie aumenta hasta que se alcanza la carga máxima permitida. Cualquier carga adicional añadida fluirá hacia el sustrato.
>
> El último problema fue cambiar la carga de un sitio a otro, permitiendo así la manipulación de la información. Esto se soluciona simplemente colocando los condensadores MOS muy juntos, uno vacío y otro con carga.

Inicialmente fue llamado CBD(Charge Bubble Devices) pero luego cambio el nombre a CCD (*Charged-Coupled Device*). Constaba en leer valores uno a uno de una matriz de Bayer y convertirlos en señales digitales. Una matriz de bayer está compuesta por un 50 % de filtros verdes, un 25 % de rojos y un 25 % de azules. Interpolando dos muestras verdes, una roja y una azul, se obtiene un pixel de color. Hay mayor cantidad de verdes dado que el ojo humano es más sensible a este color. (*Mosaico de Bayer - Wikipedia, la enciclopedia libre*, n.d.)

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

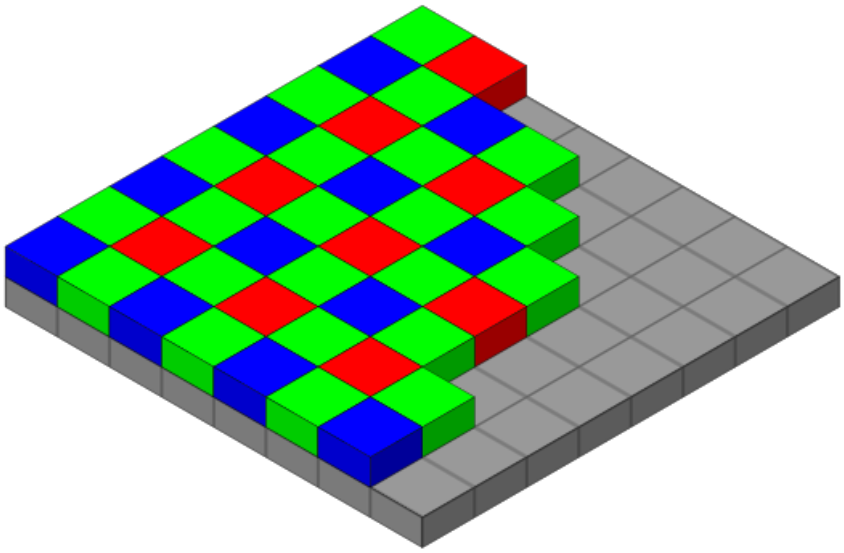


Figura 7: Mosaico de Bayer

Basandose en el trabajo de Smith y Boyle, Michael Tompset patenta la idea en 1971 con la particularidad de que era un sensor de 8 píxeles que actuaba como un escáner.(*Sensores digitales de nuestras cámaras fotográficas: CCD y CMOS*, n.d.)

2.3. Funcionamiento del sensor CCD

Cada uno de los cuadrados de la imagen es un fotodiodo que recibirá fotones que convertirán carga en electrones que se almacenarán en cada uno de ellos. A los costados poseen un registro de desplazamiento vertical y un registro de almacenamiento horizontal.

Se captura la imagen, los valores se transmiten al registro vertical y se copian uno a uno, línea a línea al registro horizontal y luego van copiandose cada uno hasta el registro de salida (el más a la izquierda inferior es el que llega primero, luego llega el que tiene a la derecha y asi sucesicamente hasta que bajan el resto). Por último pasan por un conversor analógico digital.

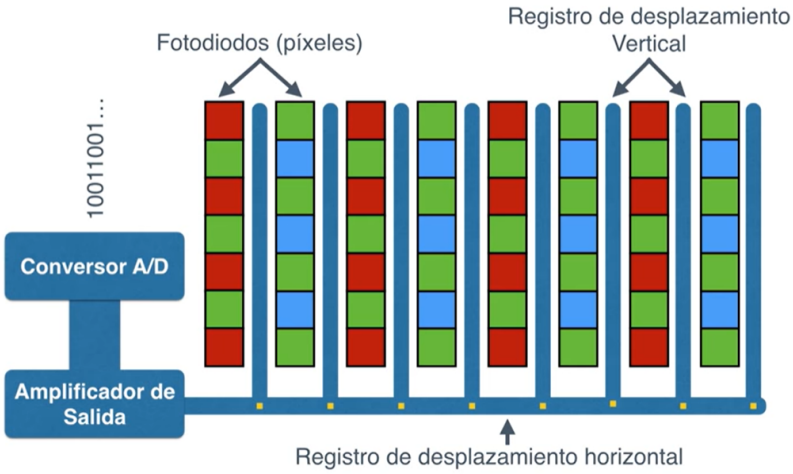


Figura 8: Sensor CCD

Para entender como se hace la transferencias de las cargas por los *shift registers* podemos apoyarnos en la siguiente explicación de estas ilustraciones(*Machine Vision Cameras: CCD Image Sensors*, n.d.)

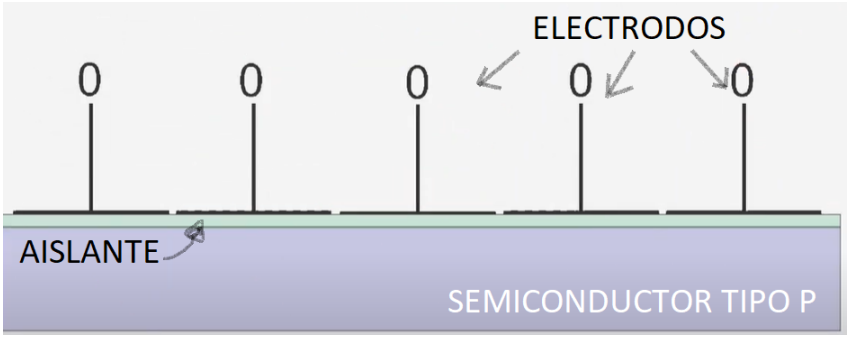


Figura 9: Semiconductor tipo P con electrodos

Al observar la figura 9, si aplico una tensión positiva en alguno de los electrodos, la tensión empuja a los huecos del semiconductor P y se crea una zona de agotamiento (Fig 10.a). Si hay algún grupo de electrones presente, se quedarán en esa zona de agotamiento(Fig.10.b)

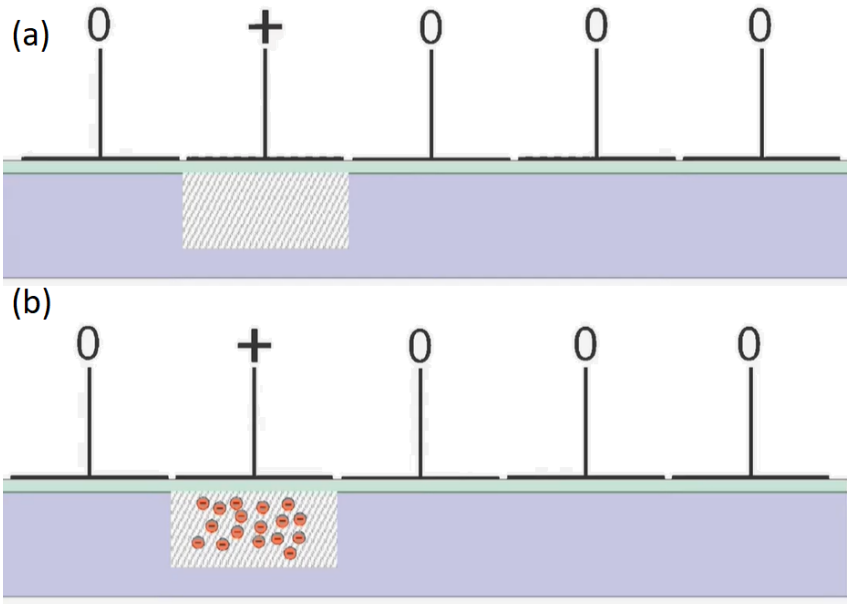


Figura 10: Tensión aplicada a un electrodo

Si se aplica tensión a un electrodo anexo, los electrones se distribuirán en la región de vaciamiento que se forme por la unión de las dos regiones de vaciamiento que se generan en cada parte (Fig.11.a). Si se anula la tensión en un electrodo, los electrones migrarán a la región de vaciamiento que se formó en el electrodo de al lado, siendo la carga total de la región de vaciamiento nueva, la misma que la de las figuras 10.b y 11.a.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

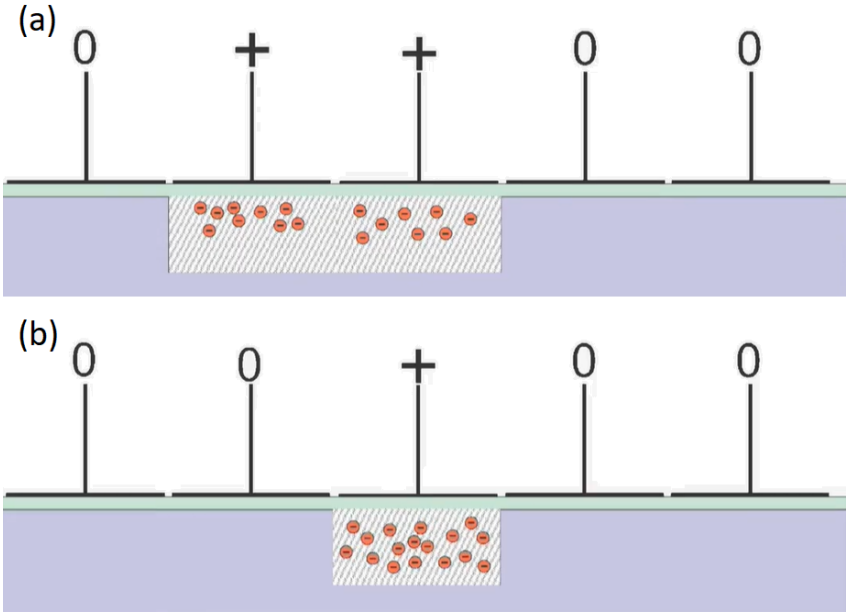


Figura 11: Movimiento de la carga total al variar las tensiones de los electrodos

Esta ilustración nos muestra un principio muy importante: Podemos desplazar la carga a lo largo del semiconductor. Este es el principio de transferencia de carga en los CCD.

Si ahora conectamos entre si varios electrodos, se puede ver mejor que haciendo combinaciones entre prender o apagar los electrodos, se puede ir moviendo la carga.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

2.4.

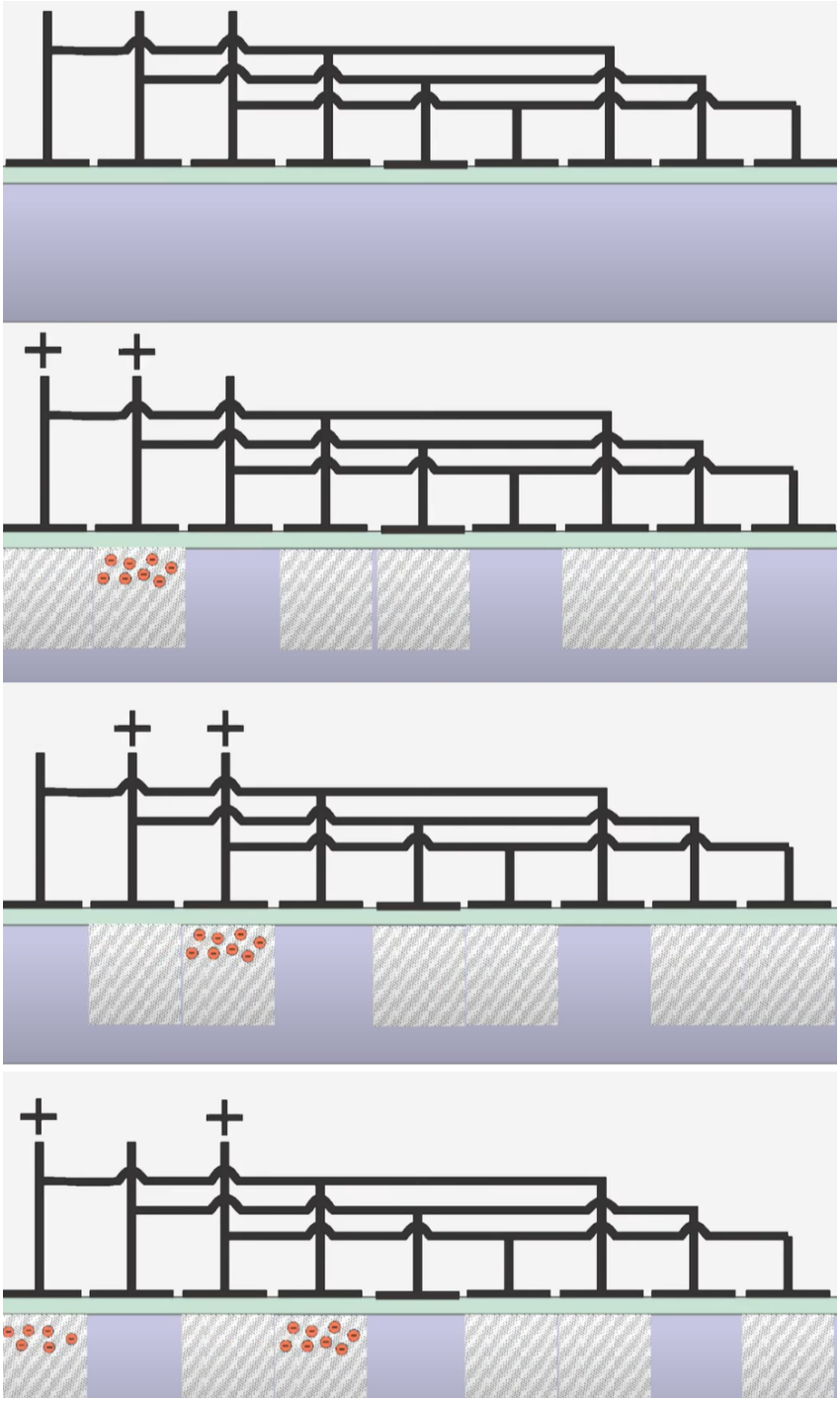


Figura 12: Paquetes moviéndose

Entonces ahora podemos entender mejor como funciona un sensor CCD: Transmite las cargas que poseen los píxeles a las zonas de agotamiento de cada *shift register* .

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

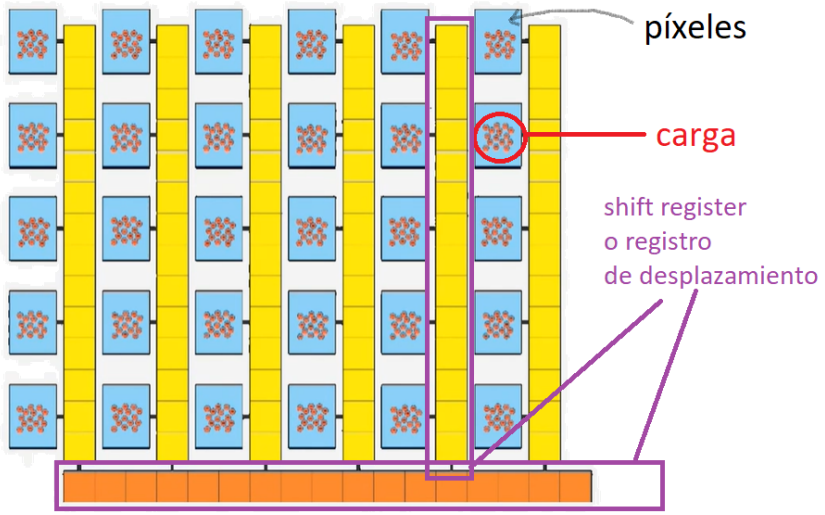


Figura 13: Cargas acumuladas en cada píxel

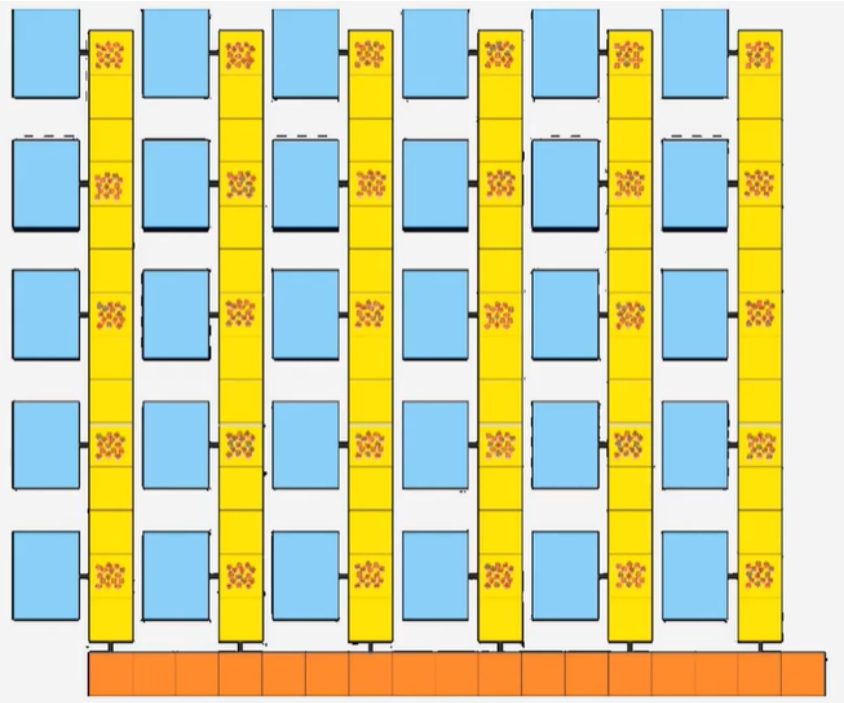


Figura 14: Cargas transladadas al shift register vertical

El registro de desplazamiento va moviendo las cargas hasta que llegan al registro de desplazamiento horizontal, luego de allí se los va shifteando hacia la derecha(Fig.15). Una vez que terminó de transmitir la última carga de la última fila inferior, shiftea hacia abajo las cargas de la siguiente fila en cada registro y realiza lo mismo, hasta que no le queden mas filas por transmitir al registro de desplazamiento horizontal. (*Machine Vision Cameras: CCD Image Sensors*, n.d.)

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

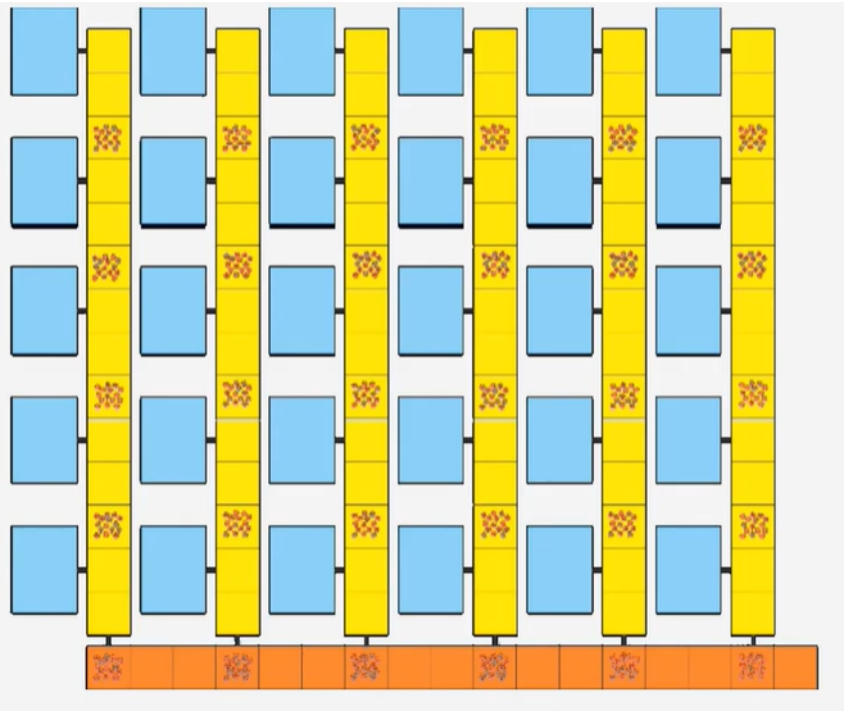


Figura 15: Cargas de la última fila que están presentes en el registro de desplazamiento horizontal

Como se puede observar en la figura 8, a la salida del registro de desplazamiento horizontal existe un amplificador de carga, que transforma la carga en una tensión proporcional a la magnitud de la carga eléctrica.

Entre píxel y píxel debe existir un espaciado mínimo. El área fotosensible de este espacio en general ocupa solo un 30% del área total (*fill factor, Figura 16*), por lo cual para solucionar este problema se utilizan unas microlentes que recolectan la luz en un área mayor al área fotosensible y concentran esa luz en el fotosensor. Si la luz que incide es vertical a la lente funciona muy bien, sin embargo tiene un mal desempeno cuando le incide luz en otros ángulos (Fig 17).

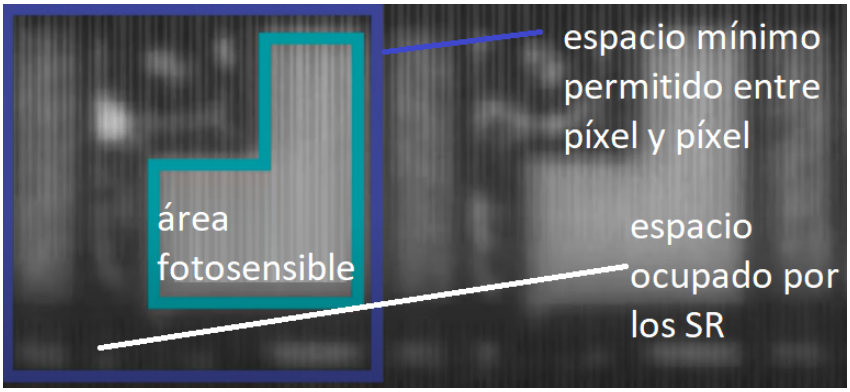


Figura 16: Área de los píxeles

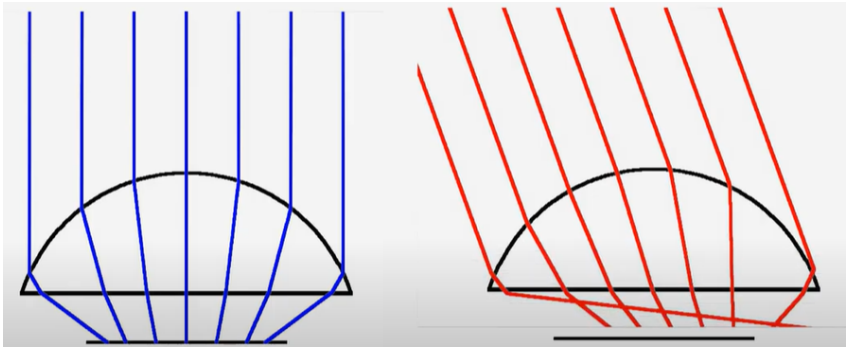


Figura 17: Microlentes

Los posibles usos de esta tecnología son:

1. Cámaras digitales
2. Cámaras de televisión
3. Escáneres
4. Dispositivos médicos
5. Máquinas de fax
6. Lectores de código de barras
7. Vigilancia satelital
8. Vigilancia terrenal
9. Astronomía

2.5. Tipos de CCD

Existen distintos tipos de CCD, algunos son: Full-Frame, Frame-Transfer e Interline-Transfer. (*Silicon-based CCDs: The basics*, n.d.)

Lo que varía entre ellos es la forma en que los fotoelectrones se pueden transferir desde el CCD.

El tipo *Full Frame* es el que hemos descripto con anterioridad dado que es el que se entiende más comunmente al hablar de CCD.

En el caso de *Frame Transfe*r tienen un registro paralelo que se divide en la matriz de recopilación de imágenes (dondecentran las imágenes) y la **matriz de almacenamiento**. En general, ambas matrices son del mismo tamaño, lo que generalmente resulta en un sensor que tiene el doble de altura para evitar cualquier reducción en el área del fotosensor. Después de que la matriz de imágenes se expone a la luz, toda la imagen **se desplaza rápidamente a la matriz de almacenamiento**. Mientras se lee la matriz de almacenamiento, la matriz de imágenes integra la carga para la siguiente imagen.

En el caso de Interline transfer tienen tiras paralelas que ocupan parte de las áreas de los píxeles sensibles a la luz . Estas tiras alternas permiten un cambio rápido de cualquier carga acumulada tan pronto como se completa la adquisición de imágenes. Al ocurrir de forma veloz, se elimina la probabilidad de manchas de carga y se pueden tomar imágenes en rápida sucesión.

Sin embargo, como ocurre que cada píxel sea forme más pequeño, baja la sensibilidad del sensor. Las matrices de microlentes se pueden usar para ayudar a corregir este problema, aumentando la cantidad de luz que se puede capturar para cada píxel activo.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

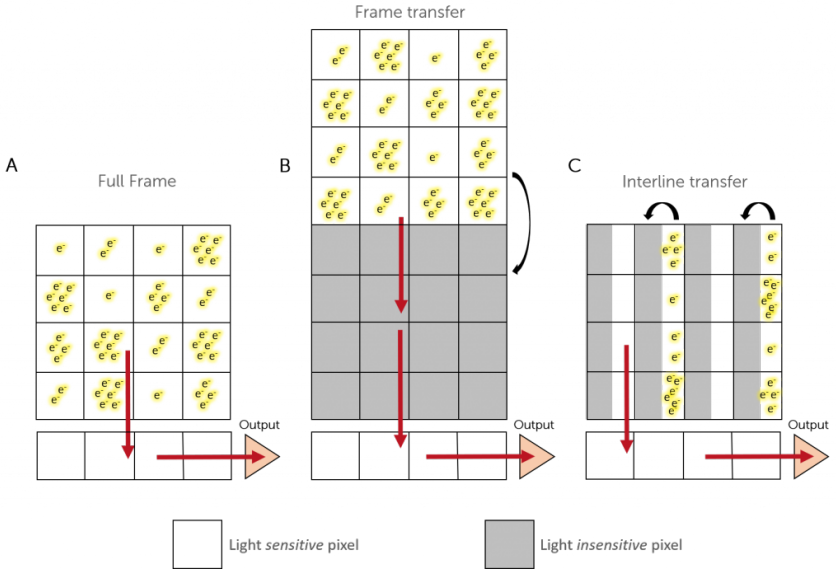


Figura 18: Esquema que muestra tres formas comunes en que los fotoelectrones se pueden transferir desde el CCD. (A) Fotograma completo, en el que todo el fotograma es sensible a la luz, y cualquier carga acumulada debe transferirse verticalmente por el sensor al registro de lectura. (B) Transferencia de marco, en la que la mitad del sensor está enmascarado (insensible a la luz) lo que permite un cambio de carga rápido. (C) Transferencia interlínea, en la que se utilizan tiras alternas de píxeles sensibles a la luz e insensibles para permitir una transferencia de carga rápida sin el riesgo de manchas de carga.

2.6. Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Mayor calidad de imagen y rango dinámico
- Mayor sensibilidad a la luz

Desventajas:

- Mayor consumo eléctrico
- La fabricación es dedicada, es decir, la línea es exclusiva para la fabricación solo de sensores CCD
- Pueden ser más lentos que otros sensores
- Al desplazar píxeles de un lado a otro existe la posibilidad que haya contaminación de los píxeles adyacentes.
- Efectos *smear* y *lag*

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

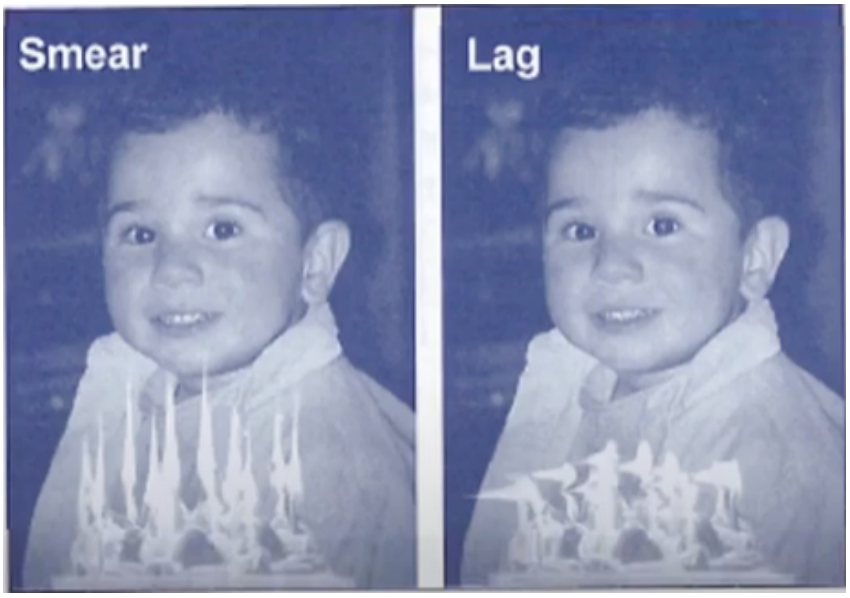


Figura 19: Smear y lag

Smear: Aparece un halo de luz vertical alrededor de puntos de luz brillante

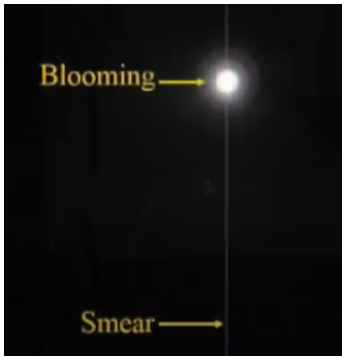


Figura 20: Blooming y Smear

Lag: Producido por la contaminación de píxeles en objetos en movimiento a favor de la dirección del movimiento.

3. Sensores CMOS

Para los años 1968 y 1969 se describen sensores con píxeles activos usando la tecnología CMOS. El proceso de fabricación de MOS era costoso e inestable por lo cual la gente optaba mayoritariamente por CCD. Dentro del píxel existía una etapa amplificadora llamada APS(Active Pixel Sensor).

Para los años 80, la tecnología CMOS dominaba el mercado para la fabricación de chips.

Para los años 2000 la tecnología CCD dominaba el negocio de la fotografía, pero el aumento del desarrollo de la tecnología CMOS terminó desplazandola al punto que hoy en día nadie usa CCD para dicha aplicación.

Veamos a continuación un esquema del sensor CMOS (Figura 18). Las zonas de colores son fotodiodos como en el caso de los CCD. El triangulito amarillo es un amplificador, que termina tapando parcialmente

al fotodiodo que es donde se captura la luz, pudiendo obtener una imagen con mayor ruido. Esta es una desventaja frente a CCD dado que captura más fotones que el CMOS.

El funcionamiento del sensor CMOS consta deque cada fotodiodo captura la luz, esa luz es tranformada por uno o más amplificadores MOSFET que convierten la carga fotogenerada en una tensión, amplifican la tensiónde la señal y reducen el ruido.

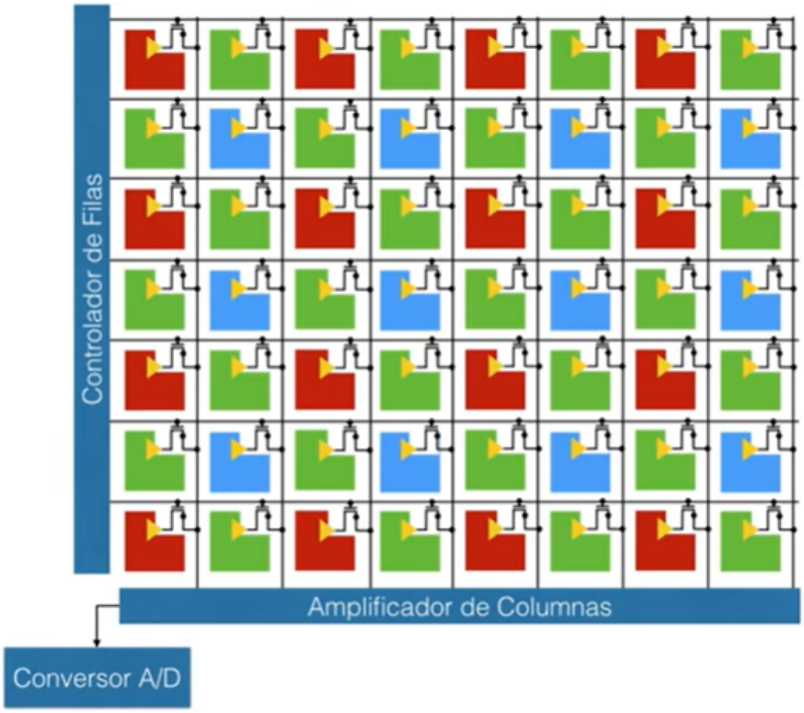


Figura 21: Sensor CMOS

Los fabricantes han encontrado soluciones para las problemáticas mencionadas previamente: reducir el tamaño de los transistores y el del amplificador al punto que ocupan un área insignificante. Por eso se expandió rápidamente la tecnología al mejorar esto último.

CCD sigue teniendo una ventaja frente a CMOS porque CMOS tiende a producir el fenómeno *Rolling Shooter* (el cual explicaremos después) . Dicho efecto se puede cancelar con un obturador global, desarrollado recién en 2020.(*CMOS Sensor : Working, Types, Differences & Its Applications*, n.d.)

Por otro lado, CMOS tiene un mayor rango dinámico, es más económico y posee mejor ISOs.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

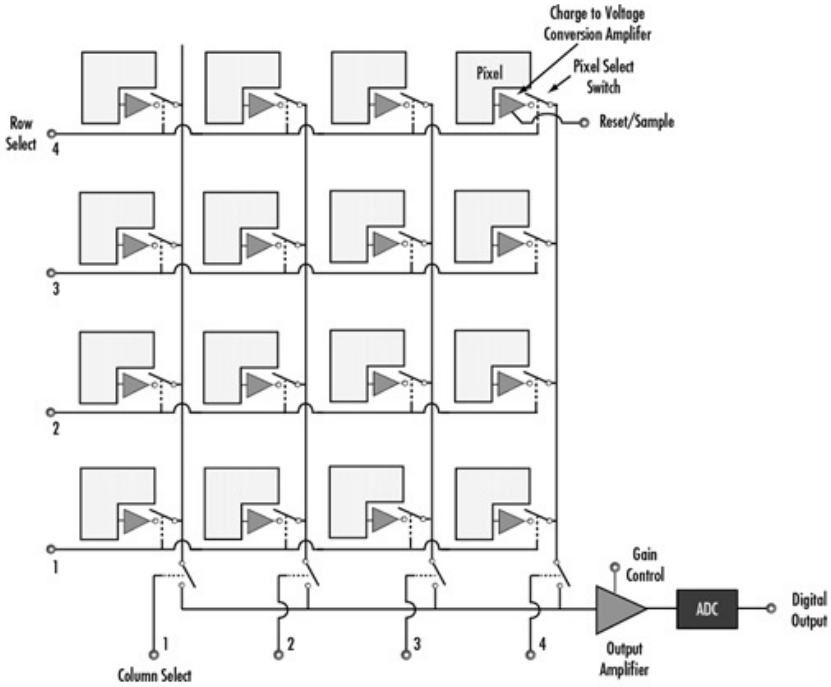


Figura 22: Otro esquema del sensor CMOS

3.1. Tipos de sensores CMOS

Hay dos tipos de sensores CMOS como el sensor de píxeles activos y el sensor de píxeles pasivos.

Figura 23: APS CMOS sensor

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.

3.2. APS (Sensores de Píxeles Activos)

En este tipo de sensor, cada sensor de píxeles incluye un amplificador y un fotodetector.

El sensor de píxeles activos CMOS utiliza un fotodetector para detectar la luz y la convierte en una señal eléctrica. Después de eso, esta señal se amplifica a través de diferentes transistores y luego se la mueve a través de cables .

Aplicaciones comunes: cámaras de captura de movimiento, imágenes de rayos X, cámaras web, cámara de endoscopia, radiografía digital, etc.

3.3. Sensor de píxeles pasivo

Cada píxel pasivo incluye un transistor de acceso y un fotodiodo. Cada extremo de columna (Fig.19) incluye un amplificador. Estos sensores sufren principalmente de varias limitaciones como lectura lenta, falta de escalabilidad y alto ruido. Por lo tanto, estos problemas se pueden abordar agregando un amplificador a cada píxel.

3.4. Ventajas y desventajas

Ventajas:

- El consumo de energía es bajo.
- Bajo costo de fabricación.
- La línea de producción no es exclusiva para fabricar estos sensores.
- Los transistores cada vez son más pequeños.
- Velocidades de fotogramas son altas.
- El generador de imágenes CMOS tiene un mejor rendimiento.

Desventajas

- Estos sensores son más susceptibles al ruido y las imágenes son granuladas a veces.
- Estos sensores utilizan más luz para una imagen mejorada.
- En este sensor, cada píxel ejecuta su conversión.
- La homogeneidad y calidad de la imagen puede ser baja.
- Efectos *Rolling Shooter*

Efectos Rolling Shooter:(***Sensores digitales de imagen: CCD vs CMOS — — UPV*, n.d.)

1. **Slow flickering lights:** En presencia de luces que parpadean lentamente se produce una barrera negra que atraviesa la imagen. Con flash puede ocurrir que la mitad de la imagen salga iluminada y la otra oscura.
2. **Skew Effect**: Deformación de objetos que tienen alta velocidad.

Figura 24: Efectos Rolling Shooter

4. Conclusiones

Visto que las tecnologías CMOS resultan más económicas y se desarrollan a tal punto de que las distorsiones son superadas a medida que avanza la tecnología y que los transistores son cada vez más pequeños

que tapan menos los fotodiodos, es evidente el por qué se opto por mejorar esta opción frente a CCD. El hecho de no tener líneas exclusivas para la fabricación de estos dispositivos, sino que pudiesen ser usados para fabricar otros dispositivos presenta una ventaja económica para las empresas que optan por esta opción, siendo una desventaja para la fabricación de los sensores SSD que se dediquen solo a eso. Hoy en día todos los dispositivos utilizan CMOS, se evidencia en la presencia del mercado cual de las dos tecnologías resultó más favorable a la hora de elegir.

Referencias

Nobel Lecture: The invention and early history of the CCD. (2010). *Rev. Mod. Phys.*, *82*(3), 2307–2312. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2307

https://www.youtube.com/watch?v=SIO3dc5F2kw. https://www.youtube.com/watch?v=SIO3dc5F2kw

https://www.youtube.com/watch?v=dX9NI8-_JX8. https://www.youtube.com/watch?v=dX9NI8-_JX8

The silicon diode array camera tube. (1969). *The Bell System Technical Journal*, *48*(5), 1481–1528. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb04277.x

https://es.wikipedia.org/wiki/Mosaico_de_Bayer. https://es.wikipedia.org/wiki/Mosaico_de_Bayer

https://www.youtube.com/watch?v=eanGAiIAJ4Y. https://www.youtube.com/watch?v=eanGAiIAJ4Y

https://www.youtube.com/watch?v=Us5q_CgbV70. https://www.youtube.com/watch?v=Us5q_CgbV70

https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/ccd-the-basics#:~:text=There%20are%20various%20formats%20of%20CCD%20sensor%20which,cleared%20before%20a%20new%20image%20can%20be%20acquired. https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/ccd-the-basics

https://www.elprocus.com/cmos-sensor/#:~:text=CMOS%20Sensor%20The%20CMOS%20sensor%20works%20on%20the,electric%20charge%20into%20voltage%20directly%20within%20the%20pixels. https://www.elprocus.com/cmos-sensor/

https://www.youtube.com/watch?v=qR4CWQvN8zo. https://www.youtube.com/watch?v=qR4CWQvN8zo

Posted on Authorea 11 Jul 2022 — The copyright holder is the author/funder. All rights reserved. No reuse without permission. — https://doi.org/10.22541/au.165752691.11273522/v1 — This a preprint and has not been peer reviewed. Data may be preliminary.