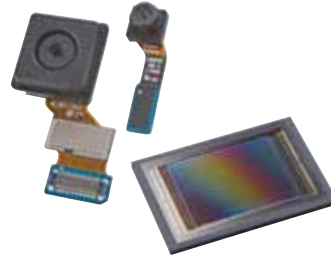




## CMOS 이미지 센서 ①

# 이미지 센서의 개요

+ 박상식 세종대학교 교수



이번 삼성전자의 갤럭시 S5에 1600만 화소 CIS(CMOS image sensor)가 들어갔다. 1979년 HITACHI에서 18만 화소 MOS형 이미지 센서를 출시한 이후 35년 만에 화소 수가 거의 100배에 달하게 된 것이다. 끝없이 성능과 사양에서 경쟁을 벌이고 있는 CMOS 이미지 센서에 대해 알아본다.

[그림 1]은 CMOS 이미지 센서의 전자현미경 사진이다. 표면의 볼록한 부분은 micro lens라고 부르는 유기물질인데, 각 화소 위에 형성돼서 빛을 각 화소의 photo diode에 집광시키는 역할을 한다. 이러한 micro lens는 화소의 수와 동일하게 형성되며, 잠자리의 눈처럼 보이게 된다.

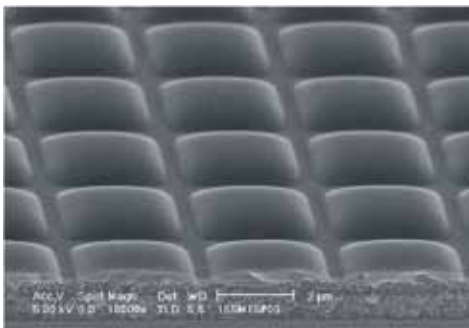


그림 1. 이미지 센서 표면의 모습. 잠자리의 눈을 연상하게 한다. 한 화소의 pitch는 2.8 $\mu$ m이다. (동부하이텍 제공)

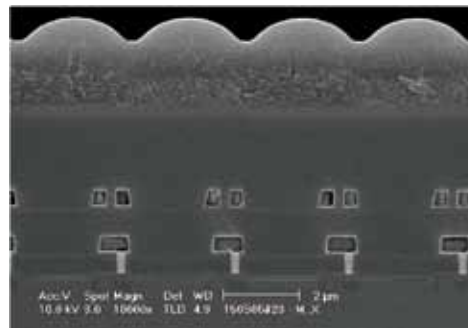


그림 2. 이미지 센서의 단면도. 가장 상층부터 micro lens, color filter, 절연층과 금속층, 실리콘의 순으로 보인다. (동부하이텍 제공)

[그림 2]는 CMOS 이미지 센서의 단면도를 전자현미경으로 보여준다. 가장 상층에 [그림 1]의 micro lens의 단면이 보인다. 그 바로 아래의 거칠게 보이는 부분은 color filter이다. micro lens를 통해 들어온 빛의 red, green 및 blue 중에서 해당되는 색만 통과시키는 역할을 한다. 이 color filter는 색을 띤 photoresist 계열의 유기물질로 구성되어 있기 때문에 육안으로도 해당 색으로 보인다. 그 아래에는 절연층과 금속 배선층이 보인다. 가장 아래쪽에 실리콘이 있고, 이 실리콘의 표면에 pn 접합 photo diode가 형성돼 있다. 이 pn 접합에서 광전 변환이 일어나, 빛의 에너지가 전자에 전달됨으로써 전기적 신호로 바뀌는 것이다. micro lens는 입사된 빛을 color filter에 통과시켜 해당 색만 거른 후에, 금속 배선층에 걸리지 않도록 투명한 절연층에 빛을 통과시켜서, 실리콘 pn 접합까지 이끄는 역할을 한다.

[그림 3]은 실리콘에 빛이 들어와서 전자를 만드는 것을 보여준다. 빛은 에너지이기 때문에 그 에너지가 실리콘 결정의 전자(결정 결합에 쓰이는 전자)에 전달되면 전자는 에너지가 높아지면서 정공을 만들어낸다. 에너지가 높아진 전자는 전위 분포에 따라 n형

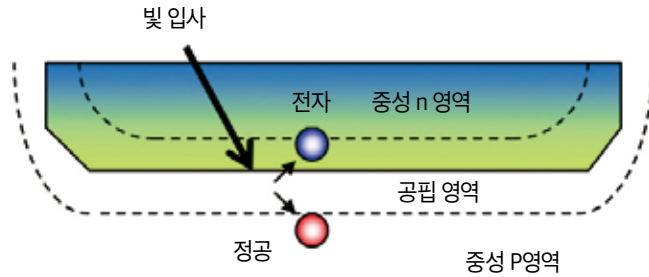


그림 3. 실리콘 pn 접합에서의 빛의 흡수

반도체로 이동하고, 정공은 p형 반도체로 이동한다. 이 중에서 n형 반도체의 전자를 모아서 신호 전하로 이용한다. 즉, 정해진 기간 동안 발생하는 전자의 수는 입사 광량에 비례하기 때문에 전자의 수가 곧 그 화소에 들어온 빛의 정보가 된다. 이 전자를 읽어내는 방식에 따라 이미지 센서의 종류가 구분된다.

### 이미지 센서의 분류

이미지 센서는 구조에 따라 크게 CCD(전하결합소자, Charge Coupled Device)형과 CMOS(상보성 금속산화물반도체, Complementary Metal Oxide Semiconductor)형으로 나눌 수 있다. 현재 상업적으로 양산하고 있는 모든 이미지 센서는 몇몇 공통점이 있다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 역방향 전압이 인가된 pn 접합으로 빛을 받는다.
- 빛에 의해 발생한 전자를 신호로 한다.
- 전자를 완벽하게 이동시키는 것이 가장 중요한 기술이다.
- capacitor에서 전자가 전압으로 바뀐다. ( $V=Q/C$ )
- source follower로 전압을 전달한다.
- 신호를 받는 주기가 있다.
- 신호를 받는 동안 이미 발생한 전자를 저장한다.
- 신호 전자를 읽어내 갔으면 반드시 pn 접합을 원 상태로 만든다.

### CCD형 이미지 센서

4개의 화소를 가지는 CCD형 이미지 센서는 [그림 4]와 같이 신호가 전달된다. 광학 렌즈에 의해 이미지 센서의 표면에 영상이 맺히면, 각 화소는 정해진 시간(1 field) 동안 그 위치에 들어온 빛의 세기에 비례한 수의 신호 전자 group을 만든다. 이 전자 group은  $\phi F$  펄스에 의해 수직 전송단으로 옮겨지고, 또 다른 펄스  $\phi V$ 에 의해 수평 전송단까지 서로 섞이지 않게 옮겨진다. 수평 전송단에서는 수직 전송단에서 전달된 전자 group을 서로 섞이지 않게  $\phi H$ 에 의해 출력부로 전송한다. 출력부에서는 각 화소에서 출발한 전자 group이 넘어오는 순서대로 전자 수에 비례하는 analog 전압으로 변환, pin을 통해 차례대로 외부로 출력한다.

CCD형의 가장 큰 특징은 빛에 의해 각 화소에서 발생한 신호 전자 group을, CCD 구조의 gate에 인가된 펄스에 의해 출력부로 이동시켜, 출력부에서 전압으로 변환시켜서 차례대로 내보내는 것이다. 즉 출력부에 이르기까지는 각 화소에서 발생한 전자의 수가 빛에 관한 정보가 된다. 화소에서 발생한 전자를 직접 출력부까지 이동시키기 때문에 그 사이에 잡음이 발생할 일이 없다. 즉, 전자의 수가 정보이기 때문에 전자의 수만 변하지 않으면 잡음이 발생하지 않는다. 또한, 하나밖에 없는 출력부에서 전자를 전압으로

바뀌기 때문에, 모든 화소에서 출발한 전자 그룹은 모두 똑같은 변환 효율로 전압으로 변환된다. 즉 균일성이 좋아진다. 지하 주차장 등의 어두운 환경에서는 전자의 수가 적기 때문에 S/N 비가 나빠질 수 있는데, CCD형의 이러한 특성 때문에 어두운 곳에서도 선명한 영상을 얻는 것이 가능하다.

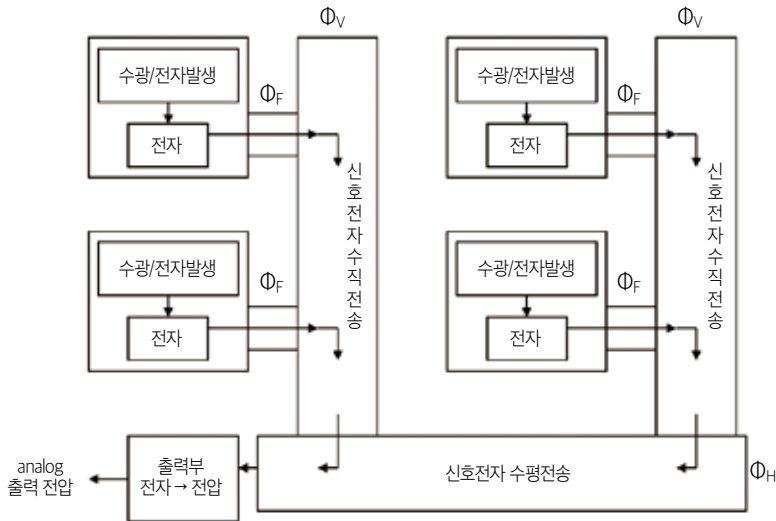


그림 4. CCD형 이미지 센서의 신호 흐름

CCD형은 전자를 직접 이동시키기 때문에 그 특성을 이용하는 중요한 쓰임새가 있다. [그림 5]는 TDI(Time Delayed Integration) 방식 CCD 이미지 센서를 보여주는데, 각 화소는 투명한 게이트 구조로 되어 있어서 수광과 전송 기능을 동시에 할 수 있다. 인공위성이나 항공기 등에 부착된 카메라로 지상을 촬영할 경우, 카메라 자체가 지면에 대해 움직이기 때문에 이미지 센서에 맺히는 영상도 흐르게 된다. 이때 CCD를 동작시켜서 신호 전자를 영상과 같은 속도로 이동시키면 동일한 영상에 의해 발생하는 신호 전자가 계속 중첩이 돼서 같은 group에 쌓이게 된다. 이렇게 하면 신호 전자가 많아져서 매우 멀리 떨어진 지면의 영상을 선명하게 얻을 수 있게 된다.

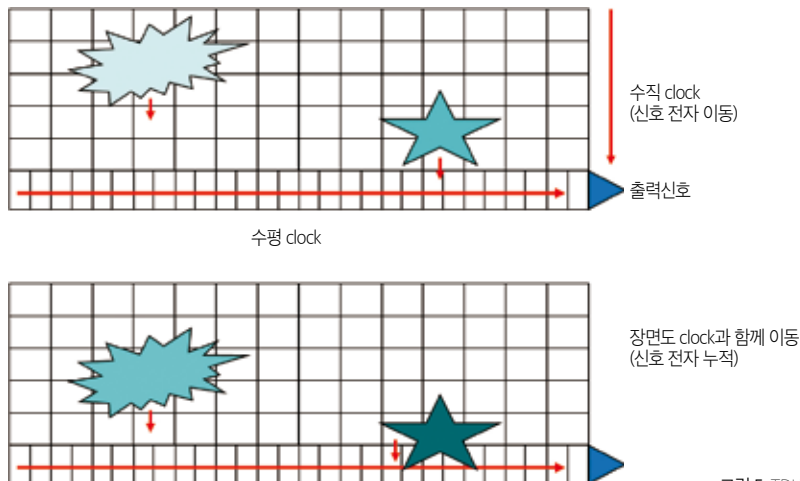


그림 5. TDI 방식 CCD의 동작

### CMOS형 이미지 센서

신호 전자를 직접 전송하는 CCD 이미지 센서와는 달리, CMOS형 이미지 센서(CIS)는 [그림 6]처럼 신호 전자가 화소 내에서 바로 전압으로 변환된다. 따라서 화소에 들어있는 transistor 또는 수직 신호선마다 연결된 회로의 불균일성으로 인한 화면의 결함을 방지하기 위한 기술이 필요하게 된다.

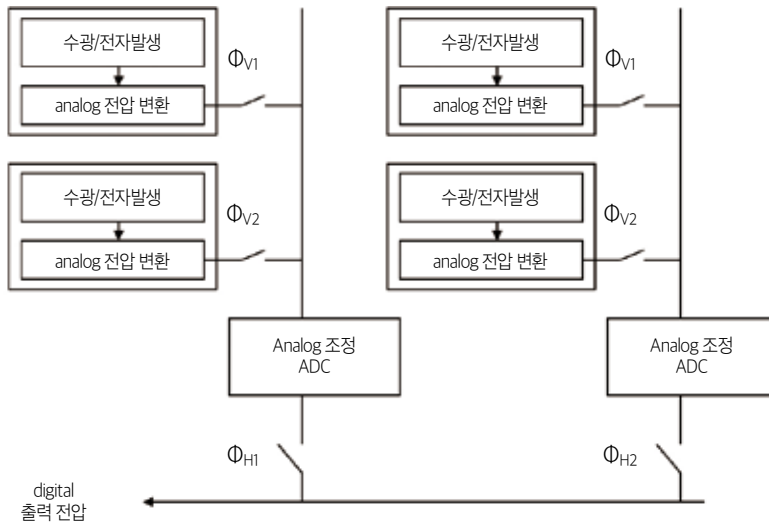


그림 6. CMOS형 이미지 센서의 신호 흐름

또한 전압의 형태로 신호가 전달되기 때문에, 전압을 전달하는 과정에서 발생하거나 외부에서 유입되는 잡음이 신호에 섞여 들어갈 가능성이 크다. 이러한 random 잡음을 감소시키기 위한 여러 가지 기술이 필요하다. [1]

CDS(Correlated Double Sampling), AGC(Auto Gain Control), A/D 변환기(Analog to Digital Converter) 등 CCD형 이미지 센서의 경우 외부에 있던 기능들이 CMOS형 이미지 센서에서는 Chip 내부로 집적될 수 있다. 또한 칩을 구동하는 신호를 만들어 주는 TG(Timing Generator)도 Chip 내부에 집적될 뿐만 아니라 구동 전압이 낮기 때문에 모든 기능을 One-Chip화 할 수 있다는 점이

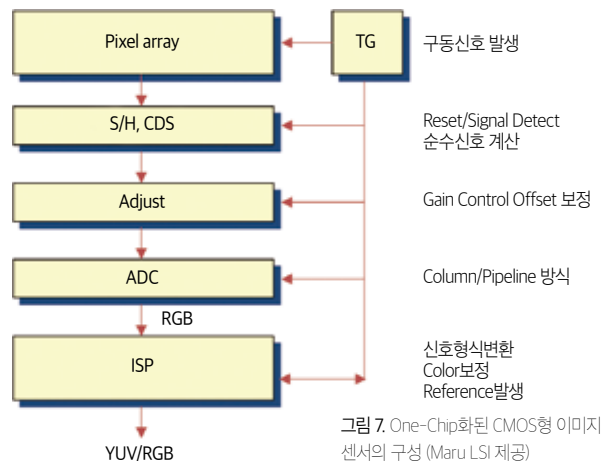


그림 7. One-Chip화된 CMOS형 이미지 센서의 구성 (Maru LSI 제공)

CMOS형 이미지 센서의 가장 큰 장점이다. 낮은 구동 전압을 사용하기 때문에 전력 소모 또한 낮아 건전지의 사용 시간을 연장시킬 수 있다. 그 외에도 영상 신호 처리 등 논리 회로의 집적화로 COC(Camera On a Chip)가 가능한 것이 매력적인 요소이다. 이러한 이유 때문에 현재 이미지 센서 시장의 95%를 CIS가 차지하게 됐다. [그림 7]에서 CMOS 이미지 센서의 기능을 보여준다.

timing 회로에서 구동 펄스를 만들어, 화소 부분을 구동시켜 얻은 신호를 sampling하고, CDS를 통해 잡음을 제거하고, gain을 조정하고, 불균일성을 제

거하고, 디지털 신호로 바꾸게 된다. 뒤에 있는 ISP(Image Signal Process) 회로에서 여러 가지 신호 처리가 가능하다. CCD처럼 무조건 한 줄로 신호를 뽑아내지 않기 때문에, 센서의 화소를 중 원하는 지역의 신호만을 선별적으로 연결, 출력하는 random access 기능도 CMOS형 이미지 센서의 장점이다. [2]

### CMOS 이미지 센서의 동작

[그림 8]은 4-Tr 화소를 쓰는 이미지 센서의 구조를 보여준다. 즉 빛을 받아 신호 전자를 만드는 photodiode와 transistor 회로가 전달 transistor에 의해 분리되어서, 전달 transistor가 OFF 되었을 때에는 transistor 회로의 동작이 신호 전자에 영향을 주지 않는다. 일정 시간 동안 신호 전자가 photodiode에 쌓이면, 선택 transistor( $\Phi_{SL}$ )가 ON 상태로 된 후에 먼저 reset transistor( $\Phi_{RS}$ )가 ON-OFF 되어 증폭 transistor gate의 기생 capacitor(FD)의 전압이 reset 된다. 이때 먼저 신호를 한번 읽어낸다(reset 전압). 그 직후에 전달 transistor( $\Phi_{TG}$ )가 ON-OFF 되어 photodiode의 전자가 FD로 옮겨진다. 그리고 곧바로 또 한 번 읽어내서, 앞에서 읽은 reset 전압과의 차이를 그 화소의 영상신호로 저장하는 방식이다.

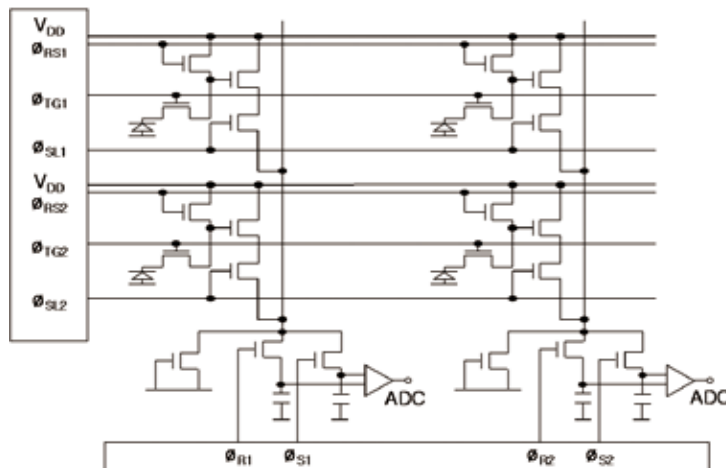


그림 8. CMOS형 이미지 센서의 4-Tr 구조

이 구조에서도 reset 동작이 있기 때문에, reset transistor의 OFF 동작 시에 FD에 불규칙적인 전압(reset 잡음)이 형성된다. 그러나 이 불규칙적인 전압을 먼저 측정하고, 그 상태에서 FD에 신호 전자를 넘긴 후, 다시 FD의 전압을 읽어내서 그로부터 앞에서 측정한 reset 전압을 빼기 때문에, 불규칙적인 전압은 정확히 제거된다. 이 동작은 CCD의 출력부와 동일한 동작이며, CIS의 잡음 제거에 큰 도움을 준다. 3-Tr 구조에서는 신호를 크게 하기 위해 photodiode의 면적을 키울 경우, photodiode의 capacitance(CPD)도 같이 커져서 S/N 비를 높일 수 없었다. 4-Tr 구조에서는 전압이 포토다이오드에서 측정되는 것이 아니고, CPD보다 훨씬 작은 capacitance(CFD)를 가진 FD에서 측정되기 때문에 CPD는 읽어내는 전압과는 아무 관련이 없다. 즉 출력 전압은  $\Delta V = \Delta Q / CFD$ 의 식으로 나타난다. 한 화소에 transistor의 개수가 늘어나서 개구율이 작아지기는 하지만, 이렇게 하면 photodiode의 면적을 넓히는 만큼 전자의 수가 늘어나게 돼서 S/N 비가 높아지고, 화질이 우수해진다. 4-Tr 구조에서는 photodiode의 n형이 전달 transistor의 source를 형성하기 때문에 photodiode의 전압을 별도로 연결할 필요가 없으므로, contact가 필요 없다. 즉 photodiode가 실리콘 표면에 노출되지 않아도 되므로, 실리콘 표면에 의한 누설 전류가 없어서 화질이 깨끗하게 된다.

CIS가 CCD보다 화질이 떨어지는 이유 중 하나가, 각 수직 열마다 존재하는 S/H 회로, CDS 회로 및 ADC 회로의 불균일성에 의해 나

타나는 수직 FPN 때문이다. OB 화소에 의한 보정을 한다 해도 완벽하지 못하기 때문에, 특히 저조도에서 화면에 수직선이 보이는 것이다. 따라서 이러한 동작들을 CCD처럼 하나의 회로에서 수행하면, 불균일성에 의한 화질 악화를 줄일 수 있다. 3-Tr이나, 4-Tr CIS에서 하나의 회로 수행이 어려운 이유는, 한 line에서 TG가 동시에 일어나기 때문에, 각 화소의 TG 전후의 신호를 연속해서 만들 수 없기 때문이다. 즉 한 행의 화소가 동시에 TG 동작이 일어나서 각 수직 신호선에 한 행의 신호를 한꺼번에 내보내기 때문에, 하나의 출력 회로로는 이들 신호를 한꺼번에 처리할 수 없는 것이다. CCD에서는 신호 전자가 순차적으로 출력되기 때문에, 하나의 출력 회로로 처리가 가능하다. CIS에서는 5개의 transistor를 사용해서 한 행의 신호를 순차적으로 TG 동작이 되게 할 수 있다.

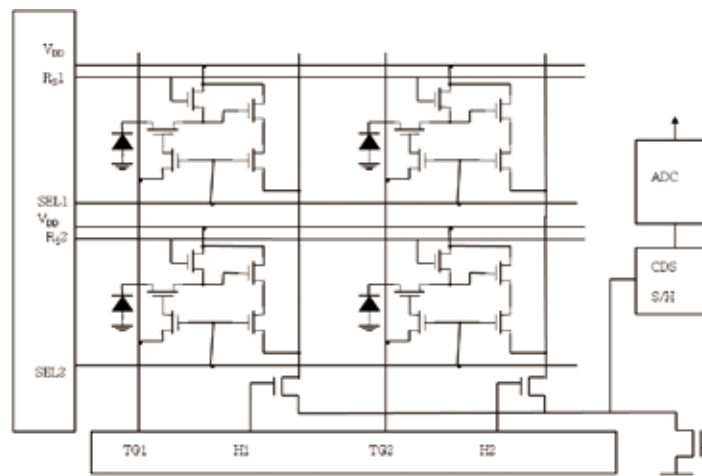


그림 9. 5-Tr 구조의 동작

[그림 9]에 5개의 transistor를 사용해서 순차적으로 신호가 나오는 회로를 보여준다. 이 회로가 4-Tr 구조와 다른 점은 TG신호가 한 line이 아닌, 각 화소별로 인가된다는 점이다. 즉 선택된 수평 line의 화소에 대해서 차례대로 TG 펄스가 인가되는 것이다. 따라서 한 화소 단위로 reset 전후의 신호를 확보하는 것이 가능해진다. 즉, 각 화소의 reset level과 신호 level이 연속으로 출력되는 것이다. 따라서 하나의 출력 회로에서 모든 화소의 신호를 순차적으로 처리할 수 있기 때문에 균일도가 좋아진다. 이러한 동작을 위해서는 출력 회로, 특히 ADC의 동작 속도가 빨라야 한다.

지금까지 이미지 센서 중 CCD와 CMOS 센서의 특징과 장단점, 신호 흐름 등을 살펴보았다. 신호 전자를 직접 전송하는 CCD에 비해 CMOS형 센서에서는 신호 전자가 화소 내에서 바로 전압으로 변환된다는 점이 큰 차이점으로 볼 수 있다. 이밖에도 CMOS 센서에서는 집적도가 향상되어 One-Chip화로 카메라 모듈의 소형화를 이끌었지만 구조적 문제로 인한 화질의 저하를 줄이는 것이 향후 향상된 센서 개발의 화두라고 하겠다.

다음 호에서는 이런 CMOS 이미지 센서의 동작 원리 및 기술에 대해 자세히 알아보고, 센서의 발전 방향 및 CMOS의 한계를 극복하기 위한 노력 등 향후 비전을 알아본다.

참고자료 및 이미지 출처

- [1] CCD/CMOS image sensor의基礎と応用. 米本和也, p.180-182, 일본CQ출판주식회사, 2003
- [2] Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras, J. Nakamura, p.154-156, Taylor & Francis, 2006