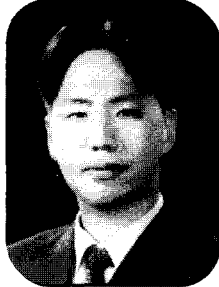
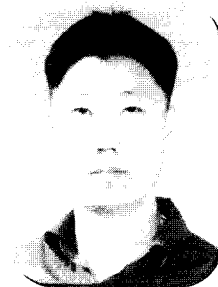




광 검출기와 CMOS 이미지 센서 연구 동향



임웅
연세대
전기전자공학부 연구조교



윤흥일
연세대
전기전자공학부 교수

1. 서론

요즘은 전자 카메라의 홍수라 할 만큼 많은 종류의 전자 카메라가 범람하고 있다. 그중에서 흔히 디지털카메라라고 하는 디지털 스틸카메라가 가장 잘 알려지고 널리 이용되고 있다. 디지털카메라의 가장 큰 장점은 필름이 필요 없고, 사진을 찍은 다음 바로 확인 할 수 있다는 것이다. 또 인화할 필요 없이 사진을 컴퓨터에 저장하고 다시 볼 수 있다는 것이다. 디지털카메라의 기능은 점점 좋아져 이제는 사진의 질이 필름카메라에 근접할 수준이 되었고, 일반 사용자들 사이에서는 필름카메라를 대체하고 있다. 대부분의 일반 사용자들은 그 편리함 때문에 필름카메라 대신 디지털카메라를 구매하고 있다.

전자 카메라의 응용으로는 디지털카메라뿐만 아니라 다른 여러 응용이 있다. 예를 들면 캠코더, 컴퓨터 주변기기(스캐너, PC 카메라 등), 상점에서 사용하는 바코드 스캐너, 장난감이나 게임에 응용 등이 있다. 또한 최근에 출시되는 핸드폰에도 역시 카메라가 장착되고 있다.

전자 카메라의 응용이 여러 종류가 있지만, 이미지 센서의 구조에 따라 CMOS, CCD카메라 두 가지로 나눌 수 있다. 하지만 이미지 센서의 구조가 무엇이든지 간에 가장 기본적인 영상을 받아내는 소자는 포토다이오드(photodiode), 포토트랜지스터(phototransistor), 포토게이트(photogate), 광전도체

(photoconductor)와 같은 광검출기(photodetector)이다. 그러므로 전자 카메라의 물리적인 동작원리를 이해하기 위해서는 광검출기에 대한 이해가 필수적이다.

본고는 다양한 종류의 광검출기를 소개하고, 그것의 기본적인 특성을 이해하는 것을 목적으로 한다. 또한 CCD, CMOS 이미지센서의 기본적인 동작 원리와 연구 동향을 소개 하도록 하겠다. 광검출기를 소개하기에 앞서, 반도체 소자에 입사된 빛이 어떻게 전기적인 신호로 바뀌는지 설명하고, 그 후에 각 광검출기의 구조와 동작 원리를 소개 하겠다. 그리고 CMOS 이미지 센서의 발전 역사를 간략하게 돌아보고, 이미지 센서의 비 이상적인 성질을 소개 하고자 한다. 또한 CMOS 이미지센서의 종류를 조사하고 그것을 CCD 이미지 센서와 비교하도록 하겠다. 마지막으로 CMOS 이미지 센서의 신기술인 나노기술을 이용한 차세대 이미지 센서와 양자효과를 소개하도록 하겠다.

2. 반도체 소자는 빛을 어떻게 전기 신호로 바꾸는가?

빛은 물리적으로 파동(전자기파)과 입자(광자) 두 가지 성질을 모두 갖고 있다. 파동의 관점으로 보았을 때 빛은 각각의 색깔에 따라 고유한 파장을 갖고 있다. 예를 들어 빨간색 빛은 700nm, 초록색 빛은

540nm, 파란색 빛은 480nm의 파장을 갖고 있다. 사람의 눈은 390nm와 750nm사이의 파장을 갖는 빛을 감지할 수 있다. 아래의 그림은 사람의 눈의 파장에 따른 반응 정도를 나타낸 그래프이다.

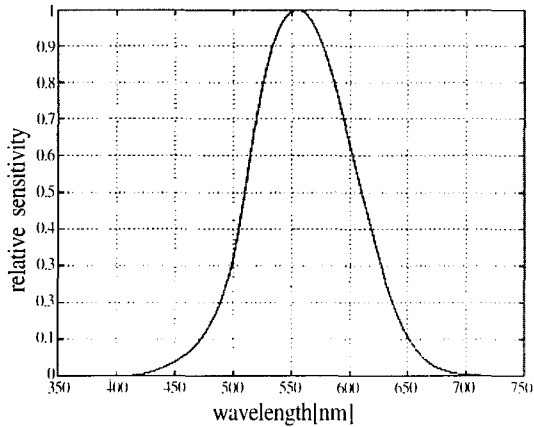


그림 1. 빛의 파장에 따른 사람의 눈의 반응 곡선.

입자의 관점에서 보았을 때 광자는 아래의 식과 같이 파장에 상응하는 에너지를 갖고 있다.

$$E_{ph}[eV] = hv = hc/\lambda = 1.24\lambda[\mu m]$$

반도체에 그 반도체의 대역간극보다 큰 에너지를 가진 빛이 입사되면 반도체의 결합 고리로부터 자유전자와 정공쌍이 생성된다.

$$E_{ph} > E_g \Rightarrow e^-, h^+ \text{ 생성}$$

광검출기의 파장에 따른 반응 정도는 사용된 반도체의 대역간극에 의하여 결정된다. 아래의 표는 몇몇 반도체의 대역간극과 그에 상응하는 파장을 나타낸 것이다.

표 1. 광전도성 물질의 특징 (λ_{max} : 반도체가 흡수하여 전자 정공쌍을 생성 시킬 수 있는 최대 파장)[1].

Material	Energy Gap(ev)	$\lambda_{max}(\mu m)$
InP	1.35	0.91
Si	1.12	1.11
Ge	0.66	1.87
InAs	0.35	3.5
InSb	0.18	7

6 테마기획 | 반도체 센서 및 광센서

빛에 의하여 실리콘으로부터 전자, 정공쌍이 발생하는 현상의 예가 아래 그림에 나타나 있다.

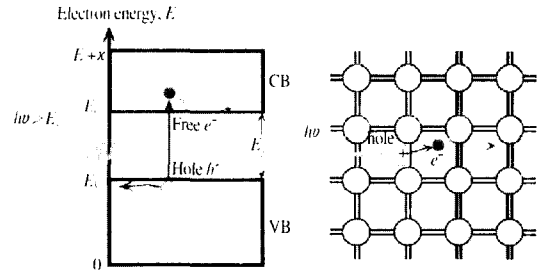


그림 2. 입사된 빛에 의하여 전자와 정공쌍이 생성되는 모습 (왼쪽: 에너지 대역도 관점, 오른쪽: 실리콘 격자 관점)[1].

실리콘의 대역간극 E_g 는 1.12eV이다. 만일 입사된 광자의 에너지가 1.12eV보다 크다면, 전자는 가 전자대역에서 전도대역으로 이동하게 되고 이동된 후 빈 자리에는 정공이 생성된다. 실리콘 격자 관점의 그림에서, 실리콘과 실리콘 사이의 선은 공유결합된 전자를 나타낸다. 만일 입사된 광자의 에너지가 1.12eV보다 크다면, 광자는 실리콘과 실리콘 사이의 공유결합된 전자에 부딪쳐 그 결합을 파괴하게 되고, 그로 인해 자유전자와 정공이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 전자와 정공은 반도체의 저항을 줄이거나, 전류를 흐르게 하는데 기여한다.

광검출기는 이러한 현상을 이용하여 빛을 감지하고, 생성된 전자와 정공을 모아 다음 블록인 영상처리 회로에 전류나 전압의 형태로 전달하게 된다.

3. 광검출기

3.1 광전도체(photoconductor)

광전도체는 내부 이득을 갖고, 이득과 대역폭의 제한을 갖는 가장 간단한 형태의 수광 소자이다. 광전도체의 동작 원리는 특정 영역에 입사된 광자가 전도율을 증가시키는 현상을 이용한다. 빛에 의해 생성된 전자와 정공은 각각 반대의 전극에서 모이고 그 결과로 광전류가 흐르게 된다.

활성층은 높은 저항의 기판위에 에피택셜하게 구성되거나 때때로는 이온주입 방법으로 구성되고,



위쪽 면에는 적절한 접합이 금속 이베포레이션 방법으로 형성되고, 다음으로 합금을 형성한다. 활성층의 두께는 입사된 빛을 충분히 흡수 할 수 있도록 두꺼워야 하지만, 동시에 잡음 전류를 줄이기 위하여 충분히 얇아야한다.

3.2 광다이오드(photodiode)

광다이오드는 PN접합 다이오드에 입사된 빛이 P형 영역에서 흡수될 수 있도록 위쪽 면에 특수하게 창을 낸 형태로 이루어져 있다. 광다이오드로 동작할 때 다이오드는 역방향 바이어스되어 있어야 한다. 입사된 광자의 파장이 을 만족하면 전자 정공쌍이 생성된다. 이 전류 운반자는 열생성된 부전류운반자에 의한 전류에 더해져 외부 회로에 광전류로 작용하게 된다.

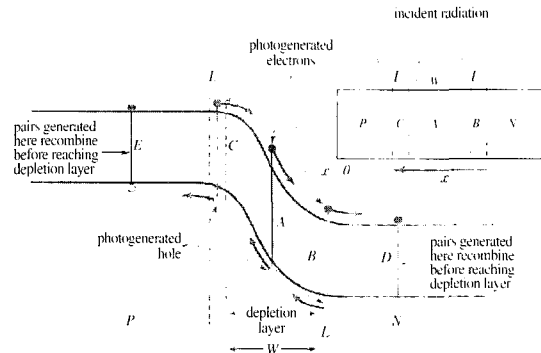


그림 3. 광자가 흡수 될 수 있는 네 가지 영역. 가장 효율적인 영역은 A이고 D는 가장 효율이 낮은 영역이다. (고갈영역의 폭과 확산영역의 길이는 과장되었다)[2].

그림 3는 포토다이오드에서 광생성이 어떻게 이루어지는지 설명하기 위한 그림이다. 빛의 입사는 다이오드 전체에 이루어진다고 가정한다. 설명을 위하여 아래와 같이 전자 정공쌍이 생성되는 영역을 네 곳으로 나누었다. 우선 광자가 고갈영역(A)에 흡수되면 그곳에서 전자 정공쌍이 생성되게 되고, 전기장의 영향으로 생성된 전자는 N형 영역으로, 정공은 P형 영역으로 이동하게 되어, 외부회로에 광전류로 작용하게 된다.

B, C영역은 고갈영역의 경계까지의 거리가 확산

거리 이내인 벌크 지점을 나타낸다. 확산 길이가 부전류운반자의 평균 이동거리를 나타내므로, 이 영역에서 발생한 전자 정공쌍은 재결합되기 전에 수많은 주전류운반자 사이를 통과하여 고갈영역에 도달할 수 있게 되고, 광전류로 작용하게 된다.

D, E 영역은 각각 P형과 N형 벌크 영역을 나타내는데, 이 영역에서 생성된 전자 정공쌍은 고갈영역에 도달하기 전에 재결합하게 되어 광전류에 기여하지 못한다.

그러므로 총 전류는 열생성된 부전류 운반자에 의한 전류와 고갈영역, 그리고 인접한 부분에서 발생한 광생성된 전류운반자에 의한 전류의 합으로 나타나게 된다.

다이오드에 흐르는 총 전류는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_s [e^{qV_s/kT} - 1] - I_{ph}$$

여기서 I_{ph} 는 광생성된 전류를 나타내고 이는 $qg_{ph}A(W+L_n+L_p)$ 와 같은 식으로 나타낸다. 여기서 g_{ph} 는 단위시간, 단위부피당 광생성된 전자 정공쌍의 개수를 나타낸다. A는 다이오드의 단면적을, L_p 와 L_n 은 각각 전자와 정공의 확산 길이를 나타내고, W는 고갈영역의 폭을 나타낸다.

다이오드가 정방향으로 바이어스 되어있으면 열생성된 전자는 N형 영역에서 P형으로, 정공은 P형에서 N형으로 이동하게 된다. 반면에 광생성된 전자 정공쌍은 반대로 이동하게 된다. 그러나 역바이어스일 경우는 열생성된 전류운반자와 광생성된 전류운반자가 같은 방향으로 움직이게 된다. 이러한 이유 때문에 위의 식에서 I_{ph} 의 부호가 음으로 나타난 것이다. 빛의 강도가 세지면 광생성정도를 나타내는 g_{ph} 의 값이 커지게 되고, 더 많은 전류가 열생성된 암전류(I_s)에 더해져 그림 4와 같은 특성을 나타내게 된다.

그림 4에서 제 1사분면에서는 전압 전류 모두 양의 값을 나타낸다. 그 이유는 광생성된 전류의 양이 보통 전류의 방향과 반대지만 그 광생된 전류의 총량이 보통 전류 보다 작기 때문이다. 제 3사분면에 나타난 곡선은 역방향 바이어스 상태에서 빛이 입사되었을 때 역방향 전류가 증가하는 모습을 나타낸다. 이 영역에서 다이오드는 빛에 반응하는 스위치 회로나 빛을 측정하는 회로로 작용할 수 있

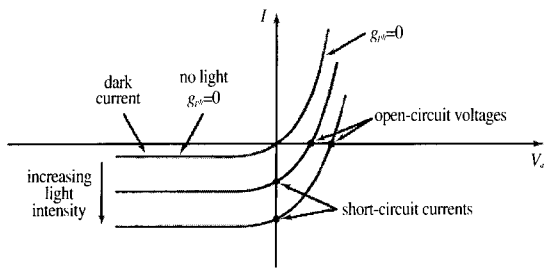


그림 4. 광다이오드의 전압 전류 관계[2].

다. 제 4사분면은 빛이 소자에 입사될 때만 양의 전압이 나타나게 된다. 그러므로 광다이오드는 제 4사분면 영역을 이용하면 광전기성 셀로 사용할 수 있다.

광다이오드의 효율은 입사되는 대부분의 빛이 흡수되도록 중간에 충분히 넓은 진성영역을 삽입함으로써 상당히 증가시킬 수 있다. 이러한 형태의 광다이오드를 PIN 광 다이오드라 한다. PIN 다이오드는 진성영역을 포함한 넓은 고갈영역이 충분히 많은 양의 빛을 흡수할 수 있어 효율이 높고 응답속도가 빨라서 널리 이용되고 있다.

PIN 다이오드의 광전류 생성 효율을 더 높이는 방법으로는 역방향 바이어스 전압을 애벌랜치 항복 전압 근처까지 증가시키는 방법이 있다. 높은 역방향 전압에서는 전류 운반자의 애벌랜치 곱이 진성영역에서 일어나 내부 전류가 증가하고, 그 결과로 민감도가 증가하기 때문이다. 또한 고전압에서는 높은 전기장이 인가되어 발생한 전류운반자의 속도가 빨라져 소자의 응답속도 증가도 얻을 수 있다.

3.3 포토트랜지스터(phototransistor)

포토트랜지스터 수광소자를 이용하면 생성된 광전류를 증폭할 수 있고, 그로 인하여 높은 광 응답성을 얻을 수 있다. 빛은 역방향 바이어스된 컬렉터 베이스 접합의 창을 통하여 입사되고, 빛에 의해 생성된 전자 정공쌍은 부전류 운반자를 증가시키게 된다. 트랜지스터는 베이스를 개방한 형태로 동작하게 되고 그로 인하여 구조적으로 베이스 연결단자는 필요 없게 된다. NPN 포토트랜지스터의 모델과 기호는 그림 5와 같다. 빛에너지는 컬렉터 베이스 접합에 초점이 맞추어져 있고, 그 접합부에서 전자정공쌍이 발생하게 된다. N형 컬렉터와 N형 에미터 사이에 정방향 전압이 인가되면, 에미터 베

이스 접합은 정방향 바이어스가 되고, 컬렉터 베이스 접합은 역방향 바이어스가 된다. 컬렉터 베이스 접합에서 열적으로 발생하는 전류운반자의 양은 빛에 의해 생성된 부전류 운반자의 양보다 작아 무시할 수 있다. 역방향 바이어스 상에서 생성된 전자는 컬렉터로 이동하게 되고 정공은 베이스로 이동하여 그로 인해 I_{ph} 가 컬렉터 전류로 발생하게 된다. 베이스에 축적된 정공은 에미터로부터 베이스로 전자를 끌어들이고 이로 인하여 베이스 전류가 발생되게 된다. 이 베이스 전류는 추가적인 $\beta_F I_{ph}$ 로 작용하게 되어 총 컬렉터 전류량은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있게 된다.

$$I_{CEO} = (\beta_F + 1)I_{ph}$$

여기서 I_{CEO} 는 베이스가 개방된 상태에서 컬렉터에서 에미터로 흐르는 전류를 의미한다. 빛이 없을 때 암전류 I_{CEO} 는 대략 수 나노암페어 단위이고, 반면에 빛이 존재할 때 I_{ph} 는 수 마이크로암페어 단위가 되어 I_{CEO} 는 대략 수 밀리암페어가 된다.

포토다이오드와 비교했을 때 포토트랜지스터의 명백한 장점은 전류이득이 발생한다는 것이다. 하지만 응답속도가 포토다이오드에 비하여 느린 단점이 있다. 일반적인 포토다이오드의 응답시간은 1ns 이지만 포토트랜지스터는 수 밀리세컨드 정도의 값을 갖는다.

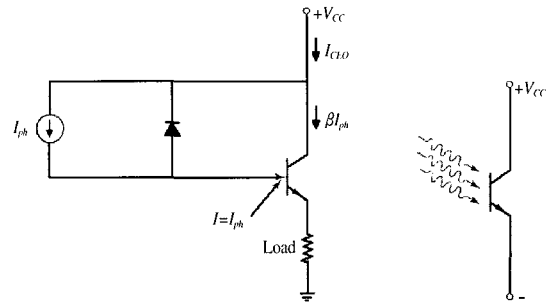


그림 5. 포토트랜지스터(왼쪽 : 모델, 오른쪽 : 기호) [3].

3.4 포토게이트(photogate)

포토게이트의 구조는 빛에 노출된 MOS 커패시터



터에 불과하다. 포토게이트의 동작원리는 게이트에 인가된 높은 전압에 의하여 발생한 고갈영역에 광 생성된 전류운반자를 축적하는 것이다.

포토게이트의 치명적인 단점은 파란빛에 대한 응답성이 매우 낮다는 것이다. 이는 게이트를 만든 물질이 파란색영역 스펙트럼의 빛을 흡수하기 때문이다. 이 문제는 실리사이드를 이용하여 게이트를 만드는 공정을 사용하면 해결할 수 있지만 실리사이드는 대부분의 가시광선을 흡수한다는 단점이 있다. 이러한 공정을 이용하려면 실리사이드의 일부분에 창을 내어 빛을 통과시킬 수 있도록 만들어야 한다.

4. 광검출기로부터 이미지를 얻는 방법

앞에서 우리는 다양한 종류의 광전도체에 대하여 알아보았다. 하지만 한 개의 광검출기로부터는 어떠한 이미지도 얻을 수 없다. 이미지를 얻어내기 위해서는 광전도체를 2차원 배열로 구성하여야만 한다. 이러한 구조에서 어떠한 방법으로 광검출기로부터 이미지를 얻을 수 있을까? 이러한 응용에는 CCD 혹은 CMOS 이미지 센서가 흔히 사용된다. 본 고에서는 우선 이미지 센서의 간략한 역사를 요약하고 기본적인 CCD 이미지 센서에 관하여 소개를 한 후 CMOS 이미지 센서의 구조에 대하여 서술 하겠다.

4.1 이미지 센서의 간략한 역사

CMOS 능동 화소 센서 (CMOS active pixel sensor APS) 와 CCD가 개발되기 전에는 MOS 이미지 센서가 사용되었다. 예를 들어 1964년 IBM은 n-p-n 접합 배열을 이용한 scanistor을 발표하였고, Westinghouse는 1966년에 50×50 배열 포토트랜지스터를 발표하였다.

CCD는 Bell Lab에서 1970년에 최초로 발명되었다. 그 장점으로 인하여 CCD는 1970년 이후로 시장을 장악하게 되었다. 반면에 MOS 이미지 센서는 간간히 연구되거나 CCD 이미지 센서와 양자 효율과 동적 범위 등 몇몇 성능에 있어 열등한 비교 기준으로 이용되었다.

마지막으로 1990년대 초에는 두개의 독립적인 요인이 CMOS 이미지 센서의 발전의 재기를 가져왔다. 그 첫 번째 원인은 높은 수준의 이미지는 아니

지만 값싸고 고기능 single chip 이미지 시스템이 개발된 것이다. 이러한 노력으로 인하여 VVL에서는 CMOS 광다이오드형 수동 화소 센서(CMOS photodiode-type passive pixel sensor)(PPS)를 발명하였다. 두 번째 원인은 초소형화, 저전력을 수반한 고성능화에 있다. 포토다이오드형 APS는 1995년 Noble사에서 최초로 개발 되었고, 고성능 포토다이오드형 APS는 1995년 JPL에서 개발 되었다. 이러한 노력으로 말미암아 CMOS 이미지 센서는 괄목할만한 진보를 하였다. 최근에도 이러한 CMOS 이미지 센서에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있어 그 성능은 지속적으로 향상되고 있다[4]. 그러나 최근의 경향을 보면 아직도 고화질 고성능 응용에서는 CCD 이미지 센서의 점유율이 높게 나타나고 있다. 하지만 꾸준한 연구가 뒤따른다면 언젠가는 CMOS 이미지 센서가 CCD를 앞지를 수 있을 것이다.

4.2 CCD(charge-coupled devices)의 기본적인 작 원리

CCD는 직렬 연결된 축전기로 구성되어있다. 모든 축전기는 실리콘 기판을 공통 plate로 갖고 있다. 각 축전기의 두 번째 plate는 디지털 펄스로 바이어스 된다. 그림 6은 CCD의 한 화소의 단면을 보여주고 있다. 그림 6의 가장 위 그림은 4개의 축전기로 구성되어있고 두 번째 축전기는 10V로 바이어스 되어있고 두 번째 축전기를 제외한 모든 축전기는 0V로 바이어스 되어있다. 축전기의 게이트에 인가된 높은 전압은 실리콘 기판 상에 독립된 전위 장벽을 만들어 낸다. 전위 장벽은 물을 담은 그릇처럼 전하 패킷을 담아둘 수 있다.

만일 그림 6의 두 번째와 같이 세 번째 게이트의 바이어스 전압이 10V로 바뀌면 실리콘 기판 내의 전위장벽은 커지게 되고 전자는 전위장벽 내부에 균일하게 퍼지게 된다. 그리고 그림 6의 세 번째와 같이 두 번째 게이트의 전압이 0V로 바뀌면 전위 장벽은 줄어들게 되고 전자는 세 번째 축전기 밑에 형성된 전위 장벽 내에 담기지게 된다. 이러한 과정이 끝나게 되면 독립된 전위 장벽의 위치가 두 번째 게이트에서 세 번째 게이트로 이동하게 된다. 이러한 전하 패킷이 다른 곳으로 이동하는 동작은 CCD에서 일어나는 전형적인 동작이다.

2차원 CCD 이미지 센서 배열은 앞에서 언급한 CCD 셀를 직렬로 연결하여 구성할 수 있다. 각각의

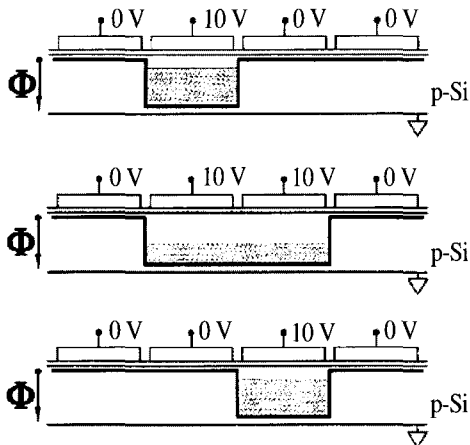


그림 6. 네 단계 CCD를 이용한 기본적인 전하 운반 모습. 실리콘 기판상의 전위 장벽은 두꺼운 선으로 나타나 있다[5].

화소는 focal plane로 구성되어 있다. 각 행은 모두 직렬 수평 레지스터와 한개의 출력 증폭기에 연결되어 있다. full frame 소자의 동작은 아래와 같이 설명할 수 있다. 모든 CCD셀의 광검출부는 축적 모드로 동작한다. 일부 CCD의 게이트는 높은 DC 전압에 연결되어 있고 그것과 인접한 CCD는 낮은 DC 전압에 연결되어 있어 독립적인 전위 장벽을 형성하게 된다.

전위 장벽의 버킷은 그림 6에서 설명한 것과 비슷한 형태로 이루어진다. 이러한 상황에서 입사된 광자에 의하여 생성된 전하는 전위 버킷에 모이게 된다. 정의된 전하 축적 시간이 끝나면 CCD 전달 레지스터는 전하 패킷을 수평 CCD 출력 레지스터로 전달한다. 이러한 동작을 하는 동안, 수평 CCD 출력 레지스터에 도착한 전하 패킷은 단일 출력단으로 전달된다. 출력단에 도달한 전하는 전압으로 바뀌게 되고 영상 신호는 다음 단에서 처리할 수 있는 형태로 전달되게 된다. 이러한 작업이 이루어지는 동안 광자는 계속하여 광검출기에 입사되어 전하를 생성하게 되지만, 셔터를 이용하면 이러한 현상을 막을 수 있다.

4.3 CMOS 이미지 센서

4.3.1 CMOS 이미지 센서의 기본적인 동작 원리

CMOS XY-addressable 이미지 센서는 스위치로 사용되는 MOS와 포토다이오드의 행렬로 이루어져

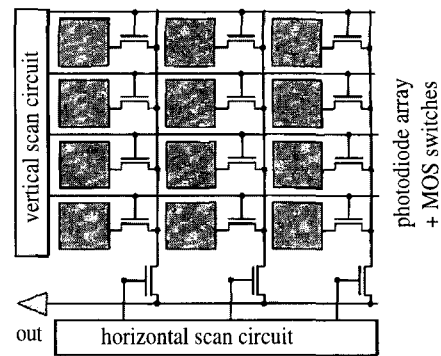


그림 7. 기본적인 CMOS 수동 화소 이미지 센서의 구조[5].

있다. 이러한 구성은 그림 7에 나타나 있다. 2차원 공간 정보를 직렬 전자 신호로 변환하기 위하여 모든 화소를 순차적으로 선택하여 정보를 읽어낼 수 있는 전자 스캔 회로가 추가되어 있다. 이러한 주소 지정 특성이 이 소자의 기본적인 동작을 형성한다.

새로운 동작이 시작 되면 수직 스캔 회로가 활성화 된다. 첫 번째 행이 선택되었다 생각해 보자. 이 동작은 첫 번째 행의 모든 MOS의 게이트 전압에 높은 DC 전압을 인가하여주면 된다. 다음으로 수평 스캔 회로가 한개의 열에 높은 DC 전압을 가하여 선택하고 나머지 열에는 낮은 DC 전압을 가하게 된다. 이러한 방식으로 한 개의 화소를 선택하게 된다. 이 선택된 화소의 정보는 출력단으로 전달되고 비워진다. 이 동작이 끝난 후 바로 화소는 리셋되고 축적모드가 다시 시작되게 된다. 그 후 다른 인접한 화소가 선택되고 읽어지게 된다.

4.3.2 CMOS 이미지 센서의 종류

CMOS 이미지 센서의 픽셀 구성은 크게 포토다이오드형 수동 화소(photodiode-type passive pixel), 포토다이오드형 능동 화소(photodiode-type active pixel), 포토게이트형 능동 화소(photogate-type active pixel) 과 같은 세 가지 종류의 구조가 있다.

4.3.2.1 포토다이오드형 수동 화소 (photodiode-type passive pixel)(PPS)

PPS의 개념도는 그림 8과 같다. PPS는 하나의 픽셀이 한개의 포토다이오드와 한개의 통과(접근)트랜지스터로 구성되어있다. 접근트랜지스터가 활성화 되면 포토다이오드는 수직열 버스에 연결되게 된

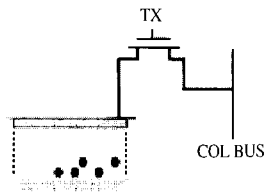


그림 8. 포토다이오드형 수동 화소의 구조[6].

다. 전달 게이트의 TX신호가 변갈아가며 펄스파의 형태로 들어오면 광생성되어 포토다이오드에 축적된 전하가 버스 축전기와 공유된다.

PPS의 장점으로는 높은 양자효율, 작은 화소 크기, 높은 fill factor(한 화소에서 광검출기의 면적이 차지하는 정도, 높은 fill factor일수록 바람직하다)를 들 수 있다. 반면에 단점으로는 느린 속도와 낮은 SNR을 들 수 있다. PPS의 읽어낼때 잡음은 일반적으로 CCD에 비하여 높게 나타난다. 또한 PPS는 큰 크기의 배열에 적용하기 힘들고 빠른 응답을 요구하는 응용에 이용하기 어렵다.

4.3.1.2 포토다이오드형 능동 화소 (photodiode-type active pixel)

포토다이오드형 능동 화소의 구조는 그림 9와 같다. 능동 화소는 화소에 증폭기를 추가함으로써 성능을 향상시킬 수 있는 원리를 이용한 것이다. 능동 화소는 한 화소당 증폭기를 구성하기 위한 3~4개의 트랜지스터를 포함하고 있고 이들은 신호를 읽어낼 때만 활성화 되어 전력소모를 최소화한다. 일반적으로 능동 화소 기술은 양자효율 측면에서는 CCD를 앞서지만 FPN(Fixed Pattern Noise)가 존재한다. 또 다른 능동 화소의 장점으로는 빠른 속도와 높은 SNR을 들 수 있다. 하지만 큰 화소 크기를 요구하고, fill factor가 낮은 단점이 있다. 그러나 공정이 $0.5\mu\text{m}$ 이하로 줄어들면서 화소 크기와 fill factor는 더 이상 문제되지 않는다. 포토다이오드형 능동 화소는 대부분의 중간부터 낮은 성능의 응용에 가장 적합하다.

4.3.1.3 포토게이트형 능동 화소 (photogate-type active pixel)

포토게이트형 능동 화소는 1993년 JPL에서 처음 소개되었다. 포토다이오드형 능동 화소는 CCD 이미

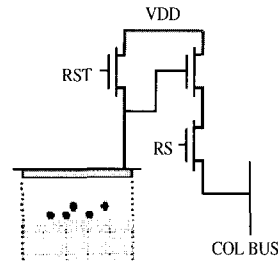


그림 9. 포토다이오드형 능동 화소의 구조[6].

지 센서의 장점을 따왔고 그 구조는 그림 10과 같다. 포토게이트는 MOS 트랜지스터의 게이트와 드레인을 이용하여 구현할 수 있다. 신호 전하가 포토게이트에 축적되면 포토게이트에 펄스를 가하여 확산을 통해 전하를 출력단으로 이동시킬 수 있다.

포토다이오드형 능동 화소에 비하여 포토게이트형 능동 화소의 장점은 양자효율인 높고 변환 이득이 높다는 것이다. 하지만 화소당 많은 소자가 필요하고 fill factor가 낮다는 단점이 있다.

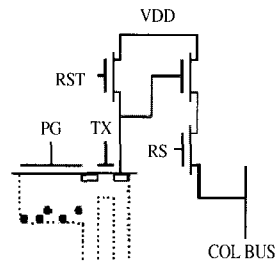


그림 10. 포토게이트형 능동 화소의 구조 [6].

4.4 이미지 센서의 비이상적인 특징들

잡음은 이미지 센서에 있어 중요한 요소 중 하나이다. 이미지 센서에는 다양한 잡음이 존재하지만 본고에서는 아래의 세 가지 주요한 노이즈만 다루겠다.

4.4.1 일시적인 잡음(Temporal noise)

일시적 잡음은 광검출기와 MOS 트랜지스터의 thermal, shot, $1/f$ 노이즈로 인하여 발생한다. 이 잡음은 read noise와 integration noise와 합쳐져 나타난다. 이는 신호가 커지면 같이 증가하지만 SNR은 유

지된다. 빛이 없는 상태에서 발생하는 잡음은 이미지 센서의 동작범위를 제한한다.

4.4.2 Fixed pattern noise(FPN)

FPN은 균일한 밀도의 광량하에서 발생하는 이미지센서의 공간상의 출력 차이를 의미한다. 이는 소자와 연결의 불완전성으로 인하여 발생한다. FPN은 offset과 이들 두 가지 요소로 이루어져 있다. FPN은 대부분 빛의 양이 적을 때 관찰된다 (offset FPN이 이득 FPN보다 중요하다). FPN은 CCD보다 CMOS에서 더 많이 관찰된다. FPN은 correlated double sampling(CDS)을 이용하면 줄일 수 있다.

4.4.3 암전류(dark current)

암전류는 광검출기의 누설전류에 의하여 발생한다. 즉 광생성에 의하여 발생되지 않은 전류에 의하여 발생한다. 이는 광검출기의 동작영역을 제한하고 신호가 움직일 수 있는 폭을 제한하고 shot noise를 발생시킨다. 이는 이미지 센서에 널리 나타나고 FPN을 유발한다.

5. CCD와 CMOS 비교

CCD와 CMOS 이미지센서의 장단점은 아래와 같이 요약할 수 있다.

5.1 CCD 이미지 센서

CCD 이미지 센서의 장점으로는 높은 영상 품질을 들 수 있다. 그 이유는 CCD와 다른 영상처리 기능을 다른 칩에 집적하므로 광검출기에 최적화된 공정을 이용할 수 있기 때문이다. 또한 CCD 이미지 센서는 이로 인하여 높은 양자효율과 낮은 암전류를 갖는 장점이 있다. 또다른 CCD 이미지 센서의 중요한 장점으로는 낮은 잡음과 낮은 불균일성을 들 수 있다. CCD는 전하를 이동시키는 방식이므로 잡음과 불균일성을 거의 유발하지 않는다.

하지만 CCD 이미지 센서는 다른 기능의 회로와 한 칩에 집적하기 어렵다. 그러므로 카메라를 소형화 하기 힘든 단점이 있다. 또한 CCD에서 전하를 전달하기 위하여 고속, 고전압의 클럭이 필요하므로 전력소모가 크게 된다. 그리고 영상을 직렬 출력 형태로 얻으므로 frame rate의 제한이 있다.

5.2 CMOS 이미지 센서

CMOS 이미지 센서의 가장 큰 장점은 다른 기능의 회로와 한개의 칩에 집적할 수 있다는 것이다. 이로 인하여 CMOS 이미지 센서를 이용하면 camera-on-a-chip의 구현이 가능해진다. 또한 CCD 이미지 센서와 비교하여 약 1/10 수준의 낮은 전력 소모를 갖는 장점이 있다.

하지만 CMOS 공정을 이용하므로 광검출기를 최적화 할 수 없다는 단점이 있고, 영상이 출력되기 위하여 다단계 증폭을 거치므로 높은 잡음과 높은 불균일성을 갖는다는 단점이 있다.

6. On-chip Processing과 Scaling Trend

오늘날의 상업적인 CMOS 이미지 센서는 0.8~0.35 μ m공정에서 제조된다. 이들 대부분은 A/D 변환기, AGC, 센서 컨트롤 로직과 같은 칩에 집적된다. 예를 들면 PC 카메라 CMOS 이미지 센서 칩은 노출 조정 회로와 컬러 프로세싱 유닛과 함께 집적된다. CCD 카메라는 CCD, ADC, ASIC, 메모리 등과 같은 많은 다른 칩이 필요하다. 반면에 CMOS는 camera-on-a-chip가 가능하다[7].

CMOS 이미지 센서의 전망은 밝다. 최근의 기술 동향을 살펴보면 가격 면에서 효율적인 화소 크기의 빠른 진보가 이루어지고 있다. 고성능의 0.25 μ m이하의 화소 크기가 표준 CMOS공정에서 제작 가능하게 될 것이다.

이미지 센서 시장에서 CMOS 이미지 센서의 상당한 시장 점유는 피할 수 없다. 표준 CMOS 공정의 진보는 CMOS 이미지 센서의 성능을 높이는데 기여할 것이다.

7. 현재 연구 방향

이미지 센서 칩의 크기가 작아지면서 PN접합 포토다이오드 역시 크기가 작아진다. 그러나 상용기술로는 작은 면적의 포토다이오드로는 충분한 양의 광전류를 얻어낼 수 없다. 최근 Fuji Film과 Fuji Microdevice사는 슈퍼 CCD 이미지 센서를 발표하였다. 또한 인텔사는 차세대 CMOS 이미지 센서 개발을 시작하였다. 나노기술을 이용한 이러한 종류의 발전은 이미지 센서뿐만 아니라 전자산업 전반에 영향을 미칠 것이다. KETI(Korean Electronics



Technology Institute)에서는 나노기술을 이용한 super high-sensitive pixel과 나노 포토다이오드를 개발하였다.

8. 결론

광검출기에는 여러 종류가 있으며 각각의 광검출기마다 서로 다른 구조와 특성을 갖고 있다. 광검출기를 어떠한 특수한 응용에 이용하려면 우선 각 광검출기의 특성에 대하여 자세히 알아야만 한다. 본고를 통하여 광검출기의 기본적인 동작원리와 광검출기로부터 이미지를 어떠한 방식으로 읽어낼 수 있는지를 이해하는데 도움이 되었으면 한다.

참고 문헌

- [1] S. O. Kasap, Optoelectronics And Photonics, Prentice Hall, 2001.
- [2] Pallab Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice Hall, 1997.
- [3] Wallace B. Leigh, Devices for Optoelectronics, Dekker, 1996.
- [4] Iyer, J, " Photodetectors demystified," Potentials, IEEE, Vol. 12 Issue: 4, p. 5, 1993.
- [5] Theuwissen, A. J. P., "CCD or CMOS image sensors for consumer digital still photography?", VLSI Technology, Systems, and Applications, 2001. Proceedings of Technical Papers. 2001 International Symposium, p. 168, 2001.
- [6] Eric R. Fossum, "CMOS Image Sensors Electronic Camera-On-A-Chip", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 44, No. 10, p. 1689, 1997.
- [7] Blanksby, A. J and Loinaz, M. J, "Performance analysis of a color CMOS photogate image sensor", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 47, No. 1, p. 55, 2000.
- [8] <http://www-isl.stanford.edu/~abbas/group/>

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 윤홍일

◆ 학력

- 1991년 University of California at Berkeley in EECS 학사
- 1993년 University of Michigan at Ann Arbor in EECS 공학석사
- 1996년 University of Michigan at Ann Arbor in EECS 공학박사

◆ 경력

- 1996년~2002년
삼성전자 DRAM Circuit Design Team,
Memory Product & Technology Division
팀 선임 연구원
- 2002년~현재
연세대 전기전자공학부 조교수

성명 : 임 용

◆ 학력

- 2004년
연세대학교 전기전자공학과 공학사

◆ 경력

- 2004년~현재
연세대 전기전자공학과 Integrated Solid-State Devices & Circuits 연구실 연구 조교