

핵물질 안전조치용 감마카메라를 위한 CMOS Avalanche Photodiode 설계

김영수, 신희성, 이태훈, 안성규, 김호동
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 vskim75@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로공정 시설 내의 핵물질을 탐지하고 감시하여 이의 분포 및 이동 경로를 파악하고 다양한 종류의 핵종을 구별하는 것은 안전조치성을 입증하는데 매우 중요한 작업이다. 이를 위해서는 핵종의 분포를 2차원적으로 나타낼 수 있어야 할 뿐만 아니라, 핵종의 강도 및 에너지를 판별할 수 있어야 한다. 현재 상업적으로 이용 가능한 도구로써 감마카메라가 있으며, 비디오카메라 및 감마선 분광 시스템이 일체화 되어 있어서 시설 내의 실제 영상에서 핵종의 위치를 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 감마선의 에너지 및 강도를 분석할 수 있다. 이 중 감마카메라의 검출기 부분은 NaI(Tl) 섬광체와 광증배관(Photomultiplier Tube, PMT)으로 구성되어 있다. 광증배관은 증폭률이 $10^6 \sim 10^8$ 으로 매우 크나, 종류에 따라 수 백 볼트 이상의 전압을 필요로 하고, 크기가 크고 무거우며, 깨지기 쉽고, 전자기장에 민감하다. 최근 광증배관의 이러한 단점을 극복하고자 고체 형태의 광증배기가 개발되고 있다. SiPM (Silicon Photomultiplier)이라고 불리는 이 검출기는 매우 콤팩트하고, 10^6 정도의 높은 증폭률을 가지며, 30V 이하의 전압을 사용하여 전력소모가 적고, 자동화된 공정을 이용해 제작하므로 가격이 저렴하다. 현재 상용화된 SiPM은 광센서에 최적화된 반도체 공정을 사용하여 제작되고 있으나, 상업적으로 이용 가능한 CMOS 공정을 이용할 경우, 필요에 따라서 신호처리 회로를 센서와 일체형으로 개발할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 SiPM을 구성하고 있는 Avalanche photodiode (APD)를 CMOS 공정을 이용하여 다양한 크기와 구조로 설계, 제작하여 기본적인 성능 평가를 수행하였다.

2. 본론

2.1 설계 및 제작

AMS (Austriamicrosystems) 0.8 μm high voltage CMOS 공정을 이용하여 CMOS APD를 단일소자 형태로 설계, 제작하였다. 크기와 구조에

따라 성능을 비교 평가하기 위하여 수광부의 지름은 50 μm 와 1000 μm , 구조는 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 n+/p-substrate, p+/n-well/p-substrate (이하 p+/n)로 하였다. APD를 사각형의 형태로 설계하였을 경우, 꼭짓점에서 breakdown이 발생할 수 있으므로 원형의 구조를 선택하였으며, APD 내에서 avalanche가 일어나기 전에 premature breakdown이 일어나는 현상을 방지하기 위해 수광부의 모서리에 도핑 농도가 낮은 n-well과 p-well을 이용하여 edge guard ring을 형성하였다.

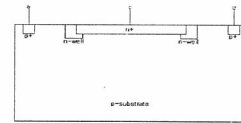


Fig. 1. Cross section of n+/p-substrate CMOS APDs.

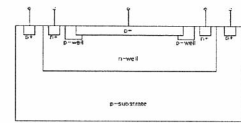


Fig. 2. Cross section of p+/n-well/p-substrate CMOS APDs.

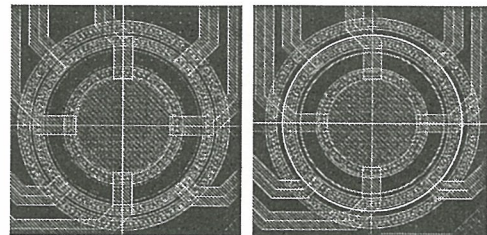


Fig. 3. Mask layout of CMOS APDs with 50 μm diameter and 10 μm width guard ring for n+/p (left) and p+/n (right) structures.

제작을 위하여 Cadence tool을 사용하고, 해당 공정에 해당하는 design rule을 준수하여 mask layout을 Fig. 3과 Fig. 4 (left)와 같이 하였으며, DRC (Design Rule Check)를 통하여 최종 점검하였다. Europractice의 MPW 프로그램을 통하여 샘플을 제작하였으며, 그 결과는 Fig. 4 (right)에서 보는 바와 같다.

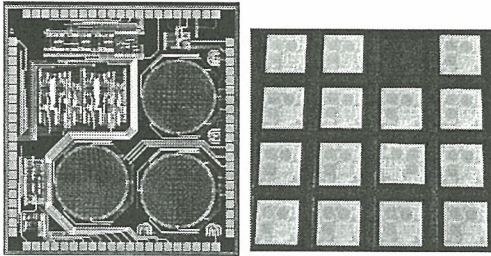


Fig. 4. Mask layout (left) and fabricated samples (right) of CMOS APDs.

2.2 측정 결과

제작된 CMOS APD의 성능을 평가하기 위하여 APD의 성능을 결정하는 주요 인자 중 하나인 dark current와 photocurrent gain을 측정하였다. Reverse bias voltage를 0 V에서 breakdown voltage까지 0.1 V의 간격으로 변화시키면서 picoammeter를 이용하여 dark current를 측정하였으며, monochromator에서 만들어진 550 nm wavelength의 빛을 APD에 조사하여 photocurrent를 측정 한 뒤 식 (1)을 이용하여 gain을 추출하였다.

$$Gain = \frac{I_{ph} - I_d}{I_{ph0} - I_{d0}} \quad (1)$$

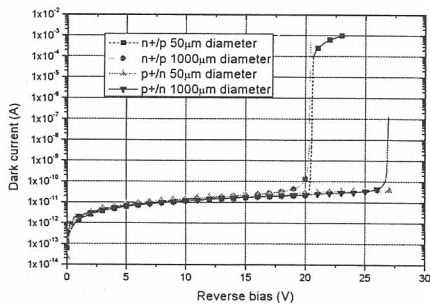


Fig. 5. Dark current for CMOS APDs with 50 µm, 1000 µm and n+/p, p+/n structures.

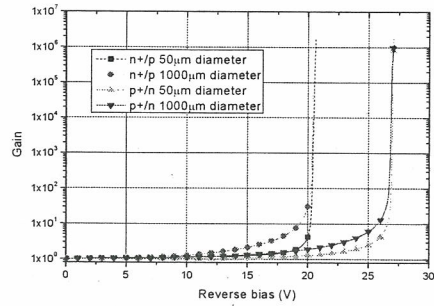


Fig. 6. Photocurrent gain for CMOS APDs with 50 µm, 1000 µm diameter and n+/p, p+/n structures when the light source with 550 nm wavelength is illuminated.

여기서, I_{ph} 와 I_d 는 reverse bias voltage에 대한 photocurrent와 dark current이며, I_{ph0} 와 I_{d0} 는 bias voltage가 인가되지 않았을 때의 photocurrent와 dark current이다.

3. 결론

Dark current를 측정한 결과, p+/n 구조와 비교하여 n+/p 구조에서, APD의 크기가 클수록 breakdown이 낮은 bias voltage에서 발생하였다. 또한 gain은 n+/p 구조와 수광부의 크기가 큰 APD에서 빠르게 증가하였다. 측정된 gain은 약 10^6 으로 PMT를 대체할 수 있을 것으로 보인다. 이후 제작된 APD의 성능을 정확히 평가하기 위해서 photon이 입사되지 않은 상태에서의 계수율인 dark count rate과 입사된 photon의 수에 대한 측정된 photon 수의 비인 detection efficiency, quantum efficiency 등의 측정을 수행 할 예정이다.

4. 참고문헌

- [1] A. Rochas, et al., "Low-noise silicon avalanche photodiodes fabricated in conventional CMOS technologies," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 49, no. 3, pp. 387-394, Mar. 2002.
- [2] A. Biber, et al., "Avalanche photodiode image sensor in standard BiCMOS technology," Sens. Actuators A, Phys., vol. 90, pp. 82-88, 2001.