

방사선 영상 장치용 반도체 검출기

Semiconductor Detectors for Radiation Imaging Applications

IT 융합 · 부품 기술 특집

| | |
|-----------------|-------------|
| 박건식 (K.S. Park) | 공정기술팀 선임연구원 |
| 박종문 (J.M. Park) | 공정기술팀 책임연구원 |
| 윤용선 (Y.S. Yoon) | 공정기술팀 책임연구원 |
| 김보우 (B.W. Kim) | 공정기술팀 책임연구원 |
| 강진영 (J.Y. Kang) | 공정기술팀 책임연구원 |

목 차

-
- I. 서론
 - II. 반도체 재료의 특성
 - III. 디지털 방사선 영상 장치용 반도체 디바이스
 - IV. 결론

X-선 측정 및 영상장치를 포함한 다양한 응용분야에서 방사선에 대한 고해상도의 영상을 얻기 위한 목적으로 반도체 검출기에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 고에서는 방사선 검출을 위해 요구되는 반도체 물질의 주요 특성에 대해서 조사하였다. 또한 반도체를 이용한 플랫 패널(flat panel) 시스템, 픽셀 디텍터(pixel detector)와 스트립 디텍터(strip detector) 등의 혼성형 디텍터(hybrid detector), MAPS와 DEPFET 등의 단일형 픽셀 디텍터(monolithic pixel detector)의 디바이스 동작 원리 및 특성과 국내외 기술 동향에 대하여 살펴보았다.

I. 서론

최근 10여 년 동안 방사선 검출 및 X-선 등의 영상 구현을 위하여 다양한 반도체 물질과 이를 이용한 반도체 디바이스 및 회로 시스템에 대한 연구가 이루어져 왔고, 의료기기 등에서 X-선 디지털 영상 시스템이 본격적으로 적용되기 시작하고 있다. 반도체 디텍터를 사용한 영상 시스템의 경우 종래의 필름이나 가스 디텍터를 이용한 디지털 영상장치와 비교하여 높은 해상도, 넓은 동적 영역(dynamic range), 높은 전기적 신호의 생성, 손쉬운 데이터 처리 및 저장 등의 장점을 가진다. 또한 실시간 영상 처리 및 재생이 가능할 뿐만 아니라 고해상도의 영상을 획득하는 데 더 적은 양의 방사선을 필요로 한다는 것은 매우 큰 장점이다. 이러한 장점으로 인하여 반도체 방사선 영상 시스템은 의료 장비, 재료 과학 분야, 우주 물리학, 물류 감시 및 관리 시스템 등 다양한 분야로 응용이 확대되고 있다.

본 원고에서는 X-선 검출용 반도체 디바이스를 중심으로 방사선 검출에 사용되는 반도체 재료들의 특성에 대하여 살펴보았다. 또한 단결정, 다결정 또는 비정질의 반도체 박막으로 제작되는 반도체 디바이스의 구조 및 동작 원리와 특성을 서술하고, 더불어 국내외 기술 동향 및 새로운 반도체 물질과 디바이스의 개발 방향에 대하여 함께 언급하고자 한다.

II. 반도체 재료의 특성

2차원 X-선 영상 시스템은 용도에 따라 다소 다

른 사양을 요구하고 있다. 응용 분야에 따른 X-선 영상 장치는 다음과 같이 요약할 수 있다[1].

- 재료 과학: 결정학, 상전이 연구
- 의료용 영상 장치: X-선 방사선 사진, 유방 X-선 조영 진단, 치과용 진단
- 우주 물리학: 우주 입자 연구, 태양 및 은하계 방사선 방출 연구
- 검사 및 관리 시스템: 보안 검색, 비파괴 검사, 전자 산업의 공정 또는 완제품 검사 및 진단

일반적으로 X-선 방사선 사진 장치에는 높은 방사선 조사량과 함께 우수한 공간 분해능(spatial resolution)이 요구되며, 유방 X-선 조영 진단 등의 의료용 영상 장치와 우주 과학용 방사선 검출기에는 낮은 방사선 조사량에 대한 우수한 감도 및 실시간 영상처리 기술이 요구된다.

상기 방사선 검출 시스템에 대한 요구사항을 <표 1>에 요약하였다[1]. X-선 영상 시스템에 사용되는 X-선의 에너지는 용도에 따라 5~600keV의 범위를 가지지만, 중성자나 γ -선 등의 고에너지 입자의 영상 장치에도 유사한 반도체 물질과 디바이스가 사용된다. 방사선 디텍터의 크기는 수 cm^2 에서 2500cm^2 까지 요구되고 있으며 $50\mu\text{m}$ 이하 피치의 픽셀크기로 10^6 이상의 픽셀 수가 필요하다. 동적영역(dynamic range)은 최소 12bits를 넘어야 하고, 초당 수십 프레임의 속도가 요구된다.

반도체 재료는 X-선을 포함한 핵 방사선에 대한 고해상도의 분광 특성을 얻기 위하여 수십 년간 연구되어 왔으며, 2차원의 X-선 영상을 획득하는 데 있어서 아래와 같은 많은 장점을 지니고 있다.

<표 1> 응용 분야별 X-선 영상 시스템의 요구 사양

| | Medical | Material science | Astrophysics | Inspection & control |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|
| Energy range(keV) | 20~120 | 5~30 | 20~120 | 20~120 |
| Size(cm^2) | Up to 40×40 | Up to 40×40 | > 2500 | > 40×40 |
| Pixel pitch | 50~500 μm | 25 μm ~mm | mm | < 100 μm |
| Number of pixel | > 10^6 | > 10^6 | > 10^4 | > 10^6 |
| Dynamic range(bits) | 12 | 16 | 8 | 12 |
| Readout time | 10^{-2} ~10s | Down to μs | Down to 100 μs | 10^{-3} ~10s |

- 높은 방사선 흡수 계수를 가지기 때문에 (특히 높은 원자량을 가진 재료의 경우) 얇은 두께의 박막으로 방사선 반응층을 구현할 수 있다.
- 가스 디텍터나 방사선 섬광체(scintillator)에 비하여 전자-전공 쌍의 형성 에너지가 낮다.
- 빠른 전하 이동도로 인하여 반응속도가 빠르다.
- 잡음 특성이 우수하여 작은 신호를 감지할 수 있고 매우 큰 신호에서도 포화(saturation)되지 않기 때문에 넓은 동적 영역을 가진다.
- 전달되는 신호는 입사된 방사선의 에너지 또는 방사선량에 비례하기 때문에 선형 특성이 좋다.
- 공간 분해능은 디텍터의 구조에 좌우되며 수십 μm 이하의 해상도를 구현할 수 있다.
- 전기적 신호의 증폭 및 디지털화가 용이하다.

그러나 방사선 검출용 반도체 디텍터의 제작에 있어 몇 가지 장애가 있다. 첫째는 대부분 반도체 디텍터는 단결정의 재료를 요구하고 있으며, 이는 디텍터의 크기를 제한하는 요인이 된다. 그러므로 큰 크기의 디텍터를 제작하기 위해서는 여러 개의 디바이스를 조립해야 하는 어려움이 있다. 두번째로 실리콘과 게르마늄을 제외한 대부분의 반도체 재료를 재현성있게 제작할 수 있는 기술이 부족하다. 또한 반도체 디바이스의 제작 공정이 복잡하고 비용이 비싸며, 마지막으로 과도한 방사선 조사 환경 하에서

디바이스 특성이 열화된다는 점이다.

<표 2>에 방사선 디텍터로 사용되는 반도체 재료의 주요 특성을 나타내었다[1]. 밴드갭 에너지(E_g)를 고려하면 게르마늄을 제외한 대부분의 재료가 상온에서 동작 가능하고, 높은 원자량을 가진 물질이 큰 장점을 가짐을 알 수 있다. 즉, 원자량이 작은 실리콘의 경우 50keV의 X-선이 흡수되는데 2.3cm의 두께가 필요하지만, Ge이나 GaAs의 경우 1.3mm, CdTe 등의 무거운 물질의 경우 100 μm 이하의 두께만으로도 90% 이상의 X-선을 흡수할 수 있다. 또한 앞서 언급한 것처럼 가스 디텍터나 섬광체에 비하여 전자-전공 쌍 형성 에너지(W)가 낮다는 것도 반도체 물질의 큰 장점 중 하나이다. 대부분의 경우 W 는 E_g 의 3배 정도의 값을 갖는데, 비정질이나 다결정 물질의 경우 이보다 큰 값을 갖는다.

방사선에 의해 생성된 전하들의 이송 특성(transport property)의 경우 비정질이나 다결정 물질보다 단결정 물질이 유리한데, 이는 다결정의 경우 결정입계(grain boundary) 등의 결함이 전하들의 재결합 장소(recombination center)로 작용하기 때문이다. 한편 단결정 Si나 Ge의 경우 기판 제조 기술과 디바이스 제작 기술의 발전으로 전하의 수명(lifetime)이 길고, 이동도가 빨라 우수한 이송 특성을 나타낸다. 반면 단결정의 화합물 반도체는 결함

<표 2> 입자 및 방사선 검출용으로 사용되는 반도체 재료들의 특성

| Material | Atomic number | Relative density | $E_g(\text{eV})$ | Pair creation energy, $W(\text{eV})$ | Resistivity(Ωcm) | Thickness to stop 90% of 50keV |
|------------------|---------------|------------------|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Si | 14 | 2.33 | 1.12 | 3.62 | Adjustable | 2.3cm |
| a-Si:H | 14 | 2.3 | ~1.7 | 4 | 10^{12} | 2.3cm |
| Ge | 32 | 5.32 | 0.7 | 2.97 | Adjustable | 1.3mm |
| GaAs | 31-33 | 5.32 | 1.42 | 1.43 | Adjustable | 1.3mm |
| a-Se | 34 | 4.3 | 2.3 | 40 | 10^{12} | 1.4mm |
| CdTe | 48-52 | 6.2 | 1.44 | 4.42 | 10^9 | 66 μm |
| TlBr | 81-85 | 7.6 | 2.68 | 6.5 | $10^9 \sim 10^{12}$ | 52 μm |
| HgI ₂ | 80-83 | 6.4 | 2.13 | 4.15 | 10^{13} | 65 μm |
| PbO | 82-81 | 9.53 | 1.9 | 14.8 | | 71 μm |
| PbI ₂ | 82-83 | 6.2 | 2.32 | 4.9 | 10^{12} | 64 μm |
| BiI ₃ | 83-83 | 5.8 | 1.7 | | 10^{12} | 63 μm |

이 적은 기판을 제작하기 힘들고 화학양론(stoichiometry)을 조절하기 어려우며, 넓은 면적에 균일한 막을 형성하기 힘들기 때문에 넓은 면적을 요구하는 2차원의 픽셀화된 디텍터를 제작하는 데 어려움이 있다.

높은 원자량을 갖는 반도체는 얇은 두께만으로도 높은 방사선 흡수율을 가지기 때문에 낮은 에너지의 방사선 영상분야 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 예를 들어 CdTe, CdZnTe, GaAs, Se, PBI₂ 등의 물질을 이용하여 픽셀크기가 50 μ m \times 50 μ m 이하인 디지털 유방 X-선 조영 진단용 픽셀 디텍터 어레이가 개발중이며, 큰 면적의 영상이 필요치 않는 응용분야에 먼저 적용될 것으로 예상되지만, 결정의 품질과 표면 처리 기술, 균일한 박막 형성 기술 등에 대한 기술 개발이 필요하다.

Ⅲ. 디지털 방사선 영상 장치용 반도체 디바이스

디지털 방사선 사진장치(DRS)는 피사체에 조사된 X-선이 피사체를 투과하면서 피사체의 두께나 밀도차이에 의해 X-선의 에너지와 양의 변화가 생기는데, 투과된 X-선을 방사선 영상검출기들이 흡수하여 물리적 반응의 결과로 전기적 신호를 발생시키고 그것들을 위치정보와 함께 읽어 들여 디지털화하고 최종적으로 영상처리 알고리즘을 이용하여 완성된 하나의 방사선 영상을 구성하는 역할을 수행한다.

반도체 소자를 기반으로 이루어진 DRS는 소자의 물질구성에 따라 단일물질로 이루어진 단일형(monolithic type) 소자와 이종물질로 구성된 혼성형(hybrid type)으로 분류가 가능하다. 단일형 소자는 전기적 신호 발생부와 이의 전기적 신호 처리부가 단일 소재의 반도체 물질을 이용하거나 단일 공정에 의해 제작된 경우를 말하며 CCD 광소자만을 이용한 DRS 또는 CMOS 광소자만을 이용한 DRS 등이 여기에 속한다. 혼성형 소자는 전기적 신호 발생부

와 전기적 신호 처리부가 각각의 다른 재질 또는 공정에 의해 제작된 경우로 PIN 디텍터, CCD, CdZnTe 등의 광소자와 CMOS ROIC, 스트립 디텍터와 CMOS ROIC, a-Si 또는 a-Se 플랫 패널 시스템 등이 있으며, DRS의 성능을 향상시키기 위해 이 종간의 물질들이 조합된 방사선 영상검출소자가 개발되고 있다.

한편 DRS는 X-선을 전기적 신호로 전환되는 방식에 따라 직접변환방식(direct conversion method)과 간접변환방식(indirect conversion method)으로 구분할 수 있다. 직접변환방식은 X-선의 흡수에 의해서 중간 단계를 거치지 않고 바로 전기적인 신호를 발생시키는 광전물질(photoconductors)을 사용한다. X-선이 조사되면 일시적으로 광전물질 내부에서 전자-정공 쌍이 생성된다. 이들은 물질 양단에 인가되어 있는 전장에 의해 전자는 양극으로, 정공은 음극으로 이동한다. 직접변환방식의 방사선영상검출소자로 제작되고 있는 것으로 a-Se, CdZnTe, HgI₂ 등이 있다. 한편 간접변환방식은 피사체를 투과한 X-선이 섬광체와 반응하여 가시광영역의 파장을 갖는 광자(photon)를 방출하고, 이를 광소자가 전기적 신호로 변환하는 방식이다. X-선을 가시광으로 전환하는 이유는 직접변환방식에서의 X-선의 흡수율이 상대적으로 떨어져 일정 두께의 섬광체를 이용하여 흡수율을 높여 전기적신호(signal) 성능을 향상시키려는 데 있다. 간접변환방식의 방사선영상검출소자로는 CCD, CMOS, a-Si 등이 현재 상용화된 DRS로 응용되고 있으며, 이때 사용되는 섬광체는 박막 형태의 GADOX 섬광체와 마이크로기동형 또는 바늘구조형 CsI(Tl) 섬광체가 주로 사용되고 있다.

● 용어해설 ●

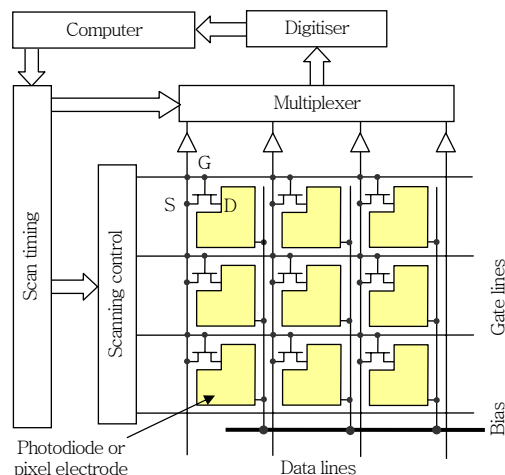
광소자와 광전물질: 광소자는 가전자대(valence band)의 전자가 빛을 흡수하여 전도대(conduction band)로 여기하여 전자-정공 쌍을 형성하는 소자이며, 광전물질은 빛이나 방사선이 가전자대의 전자와 충돌하여 전자를 자유공간으로 여기시키고 반도체를 이온화시켜 전자-정공 쌍을 형성하는 물질임.

방사선에 의해 생성된 전기적 신호를 획득하는 방식은 전하를 일정시간 동안 저장한 후 읽어 들이는 전하누적방식(charge integration mode)과 연속적으로 신호를 읽는 광자계수방식(photon pulse counting mode)으로 구분할 수 있고, 후자의 경우 해상도 등 영상 특성이 우수하지만 단위 픽셀 당 많은 수의 트랜지스터가 포함되는 회로상의 어려움이 있어 전자의 경우가 보편적으로 사용되고 있다.

이상과 같이 디지털 방사선 사진 장치는 반도체 물질의 종류, 방사선을 전기적 신호로 전환하는 방식, 전기적 신호를 읽는 방식, 영상검출소자의 구성에 따른 분류에 따라 다양한 형태의 반도체 디바이스에 대한 개발이 이루어지고 있으며, 대표적인 방사선 사진 장치용 반도체 디바이스의 구성과 동작원리를 살펴보고자 한다.

1. 플랫 패널 시스템

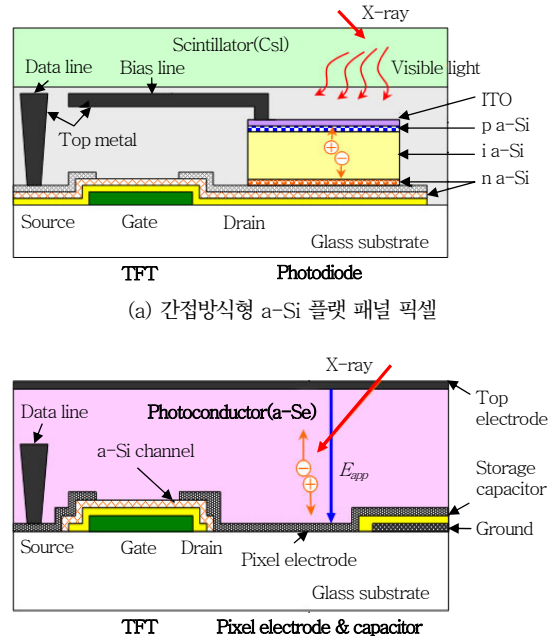
플랫 패널(flat panel) 시스템은 반도체를 이용한 방사선 영상장치로서 가장 널리 사용되고 있으며, 넓은 면적에 대한 X-선 영상을 얻을 수 있다. 현재 주류를 이루고 있는 플랫패널 시스템은 넓은 면적의 TFT-AMA를 기반으로 하고, 섬광체와 a-Si 등의 포토다이오드를 이용하는 간접변환방식과[2], a-



(그림 1) X-선 영상 촬영용 플랫 패널 시스템에 적용되는 Thin-film Transistor Active Matrix Array

Se 등의 광전물질을 사용하는 직접변환방식에서의 접근이 이루어지고 있다[3]. TFT-AMA는 (그림 1)에 나타난 것처럼 X-선에 의하여 생성되어 커패시터에 저장된 전하를 횡렬(row)을 바꾸어가며 각 종렬(column)의 신호를 주변회로부에서 다중 수신하는 방법으로 신호를 읽으며, 현재 3,000×3,000 픽셀 개수에 총 영상 면적은 43cm×43cm의 크기까지 보고되고 있다[1].

(그림 2a)의 a-Si 플랫 패널 시스템의 경우 a-Si TFT, a-Si으로 형성된 PIN 포토다이오드 및 섬광체로 구성된다[2]. 주입된 X-선을 섬광체에서 흡수하여 가시광선을 발생시키며, 이 빛을 포토다이오드에서 감지하여 전기적 신호로 변환시키고 포토다이오드 자체에 저장한 후 TFT의 동작에 의하여 저장된 전기적 신호를 읽는다. a-Si 플랫 패널 시스템의 단점은 공정이 다소 복잡하고 섬광체의 기하학적 구조에 따른 광퍼짐 현상(light spreading)에 의하여 해상도를 100μm 이하로 줄이기 힘들다고 보고되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 고해상도를 실현할 수 있는 섬광체의 개발이 이루어져야 한다.



(그림 2) 플랫 패널의 단면 구조 및 동작 원리

한편 a-Se 플랫 패널의 경우 (그림 2b) 섬광체에 의한 광피침 현상이 없기 때문에 고해상도의 영상 획득이 가능하고 제작 공정이 간단하다. 주입된 X-선에 의하여 a-Se에서 발생한 전자-정공 쌍은 상부전극(top electrode)과 픽셀전극(pixel electrode) 사이에 인가된 전계에 의하여 이동하고 커패시터에 저장된 후 TFT의 동작에 의하여 전기적 신호를 읽는다. A-Se 플랫패널의 가장 큰 단점은 a-Se를 광도전체로 활성화시키기 위하여 수천 볼트의 고전압이 인가되어야 하며 이것은 AMA에 손상을 줄 우려가 크다. 또한 전자-정공 쌍 형성 에너지(W)가 크고 다른 화합물 반도체에 비해 원자량이 작기 때문에 높은 광효율을 위해서는 두꺼운 막을 성장시켜야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 대체 물질은 높은 흡수 계수, 높은 비저항, 낮은 암 전류, 낮은 전자-정공 쌍 형성 에너지, 우수한 전하 이동 특성을 가져야 한다. 또한 낮은 온도에서 넓은 면적에 대하여 균일한 박막을 증착할 수 있어야 하며 a-Si TFT와 화학적으로 양립할 수 있어야 하는데, 후보 물질로서 CdTe, CdZnTe, PbO, PbI₂, HgI₂ 등에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

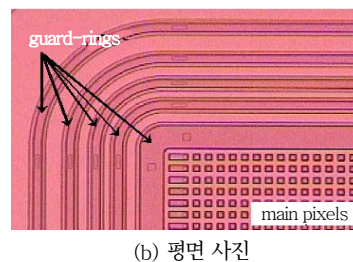
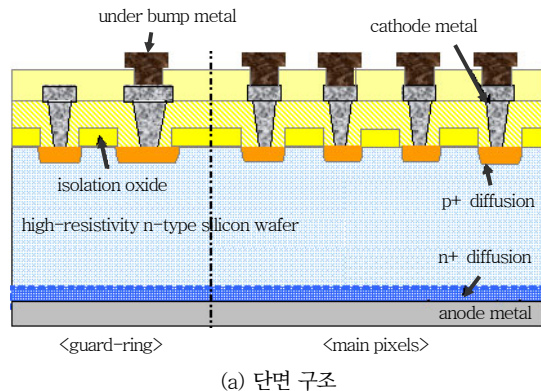
2. 단결정 반도체를 사용한 혼성형 디텍터

혼성형 디텍터(hybrid detectors)는 고에너지 입자실험의 용도로 주로 개발되어 왔으며 높은 공간 분해능, 정확한 시간 정보 및 방사선 내성이 요구된다. 영상 장치용 혼성형 디텍터의 경우 플랫 패널 시스템에서 실현하기 어려운 낮은 에너지와 적은 방사선량에서의 높은 해상도와 빠른 응답시간 및 높은 동적영역을 확보하기 위하여 단결정 반도체 물질을 주로 사용한다. 단결정 반도체 물질은 p-n 접합 다이오드 또는 쇼키 다이오드 형태의 고체전리상자(solid ionization chamber) 구조를 가지는데, 방사선에 의해 생성된 전자와 정공들이 두 전극으로 이동하는 펄스를 계수계산함으로써 입사된 방사선의 에너지를 측정할 수 있고, 생성 전류의 누적으로부터 입사 방사선의 에너지와 방사선량의 곱의 정보를 얻을 수 있다. 고체전리상자는 1차원 또는 2차원의

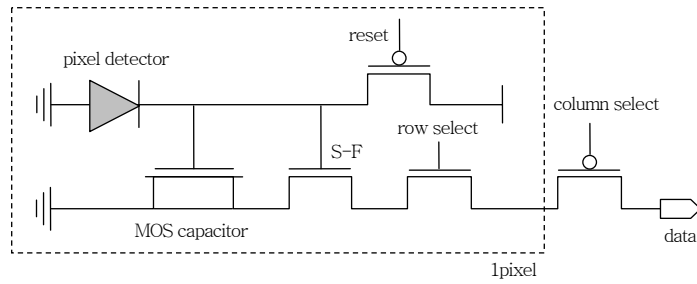
어레이에 동일하게 적용될 수 있으며, Si, Ge, CdTe, CdZnTe, GaAs 등의 단결정 반도체를 이용한 다양한 형태의 반도체 영상소자가 연구되고 있다 [4]. 실리콘을 중심으로 연구되고 있는 혼성형 디텍터의 몇 가지를 아래에 서술하였다.

가. 2차원 실리콘 픽셀 디텍터

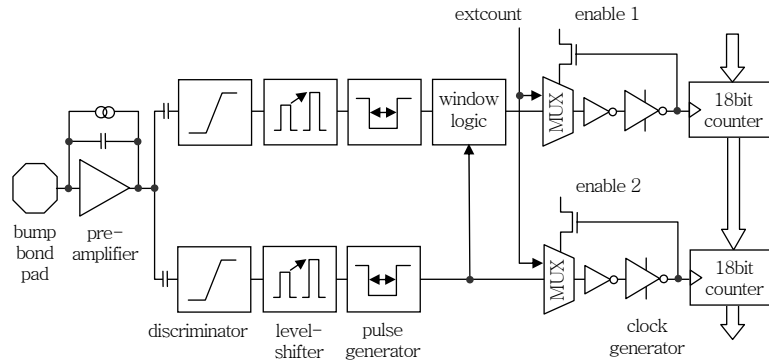
실리콘 픽셀 디텍터는 고저항의 n형 기판을 이용하여 앞면에는 2차원 픽셀형태의 p+ 층을 형성하고 뒷면에 n+ 층을 형성한 PIN 다이오드이다[5],[6]. p+ 층과 n+ 층에 메탈 전극을 형성한 후 100V 이상의 전압에서 기판 전체를 공핍시켜 동작하는데, 방사선에 의해 생성된 전자-정공 쌍은 인가된 전계에 의하여 이동하며 픽셀화된 p+ 영역으로 이동한 정공에 의하여 신호가 형성된다. (그림 3)에 한국전자통신연구원(이하 ETRI)과 (주)바텍에서 공동 제작한 치아 X-선 영상용 2차원 실리콘 픽셀 디텍터의 단면과 평면 구조를 나타내었다. 픽셀 영역은 35 μ m의 피치 거리로 64만 개의 p+ 확산 영역으로 이루어져



(그림 3) 치아 X-선 영상 촬영용 실리콘 픽셀 디텍터



(a) 3T-APS

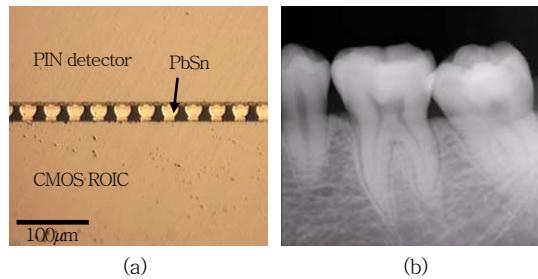


(b) MEDIPIX2 CMOS 칩

(그림 4) 단위 픽셀에 대한 회로 모식도

있고, 항복전압을 향상시키기 위하여 5겹의 p+ 가드링이 픽셀 영역을 둘러싸도록 설계되었다. 각 픽셀 상부의 메탈은 후속 플립칩 본딩(flip-chip bonding)을 위해 알루미늄 위에 Ti/Ni/Au의 3중 메탈이 UBM으로 구성되어 있다.

한편 CMOS ROIC는 전하누적방식과 광자계수방식이 모두 적용될 수 있으며, 전하누적방식의 대표적인 예인 3T-APS와 최근 유럽공동원자핵연구기구인 CERN에서 개발한 광자계수방식 CMOS 칩인 MEDIPIX2의 회로 모식도를 (그림 4)에 나타내었다[7]-[9]. 3T-APS는 reset 트랜지스터, row-select 트랜지스터, source-follower 트랜지스터로 구성되며 전하 저장을 위한 커패시터가 추가될 수 있다. MEDIPIX2는 0.25 μm CMOS 공정을 이용하여 단위 픽셀 당 504개의 트랜지스터로 구성되어 있으며, 55 μm 의 픽셀 피치와 256 \times 256개의 픽셀 개수를 가지는데, 낮은 에너지와 적은 방사선량에 대하여 높은 해상도와 동적영역을 확보할 수 있는 것으로 보고되고 있다.



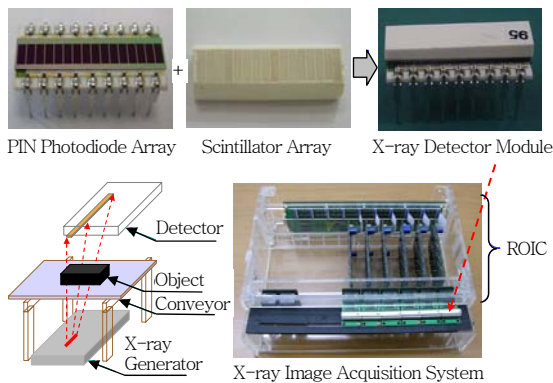
(그림 5) (a) 땀납(PbSn)을 이용한 픽셀 디텍터와 CMOS 칩의 플립칩 본딩 사진, (b) 이차원 실리콘 픽셀 디텍터로 촬영한 치아의 X-선 영상(ETRI, (주)바텍 공동제작)

픽셀 디텍터와 CMOS 칩은 범프를 형성한 후 플립칩 본딩으로 조립하는데, 땀납(PbSn)의 범퍼를 형성하거나 인듐 범퍼를 형성한 후 reflow하고 열을 가하며 압착하여 조립한다[10]. 불량이 적고 재현성있는 플립칩 본딩 기술이 디텍터의 픽셀 크기를 좌우할 만큼 까다로우며 현재까지 20 μm 피치의 플립칩 본딩이 보고된 바 있다. (그림 5a)는 땀납 범퍼를 이용한 35 μm 피치의 픽셀 디텍터와 CMOS 칩의

본딩 상태를 보여주고 있으며, (그림 5b)는 이를 이용하여 ETRI와 (주)바텍에서 공동 제작한 X-선 디텍터로 촬영한 치아의 X-선 사진이다.

나. 1차원 실리콘 포토다이오드 어레이

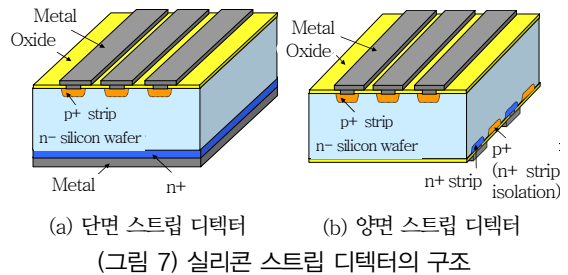
2차원 픽셀 디텍터의 경우 데이터 송신이 빠르다는 장점이 있지만 많은 수의 채널로 구성되어 회로 시스템이 복잡하고 플립칩 본딩 등의 까다로운 조립 공정이 요구된다. 반면 1차원의 어레이형(x-방향) 실리콘 포토다이오드를 이용하여 y-방향으로 스캐닝하여 영상을 얻을 경우 간단한 회로 시스템의 구현이 가능하다[11]. 반면 이 경우 정교한 y-방향의 스캐닝 장치가 요구되며, 또한 포토다이오드에서 방사선을 감지하기 위해서는 섬광체가 필요하기 때문에 전체 시스템의 해상도는 섬광체의 해상도에 제한을 받는 단점이 있다. (그림 6)은 ETRI와 (주)라드텍이 공동 제작한 1차원 실리콘 포토다이오드 어레이를 이용한 물류검색용 X-선 영상장치를 보여주고 있다.



(그림 6) 1차원 실리콘 포토다이오드 어레이를 이용한 X-선 영상 시스템(ETRI, (주)라드텍 공동제작)

다. 1차원 및 2차원 스트립 디텍터

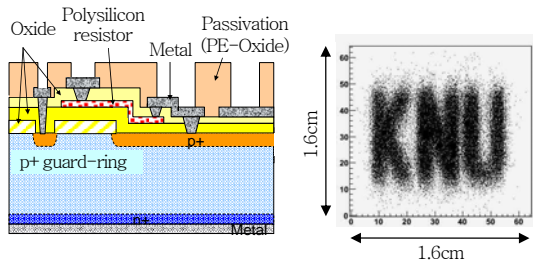
스트립 디텍터(strip detectors)는 고에너지 입자가속기 내에서 입자의 위치 및 에너지를 측정하기 위한 센서로 주로 개발되고 있으며, 최근 스트립 디텍터를 이용하여 방사선 영상 장치에도 응용되고 있



(그림 7) 실리콘 스트립 디텍터의 구조

다[12]. 실리콘 스트립 디텍터는 픽셀 디텍터와 유사하게 고저항의 기관 전체를 공핍시켜 동작하는 PIN 다이오드이며, (그림 7)에 나타난 것처럼 길이가 수 cm이고 피치가 수십 μm 인 긴 스트립의 구조를 가진다. 이러한 스트립이 기관의 한쪽 면에만 형성된 단면 스트립 디텍터(SSSD)와 상부의 p+ 스트립과 하부의 n+ 스트립이 교차하는 양면 스트립 디텍터(DSSD)가 있다. SSSD의 경우 방사선 영상을 얻기 위해서는 스트립을 따라 스캐닝하거나, 두 개의 SSSD를 교차하게 조립한 후 영상을 얻는 방법도 시도되고 있다. DSSD는 스캐닝 장치 없이 방사선에 대한 위치와 에너지 정보를 동시에 얻을 수 있지만 반도체 제조 공정에서 양면 공정이 어렵고 수율이 낮다는 문제점이 있다.

스트립 디텍터는 방사선에 의하여 생성된 전하를 DC 전류로 읽는 DC 방식과, RC 성분이 디텍터에 내장되어서 생성된 전하에 의한 정전용량 변화를 읽어 들이는 AC 방식이 있다[13]. AC 방식은 저항과 커패시터를 제작하기 위한 추가 공정이 필요하지만 PIN 다이오드의 누설전류 성분이 바이어스 배선으로 제거되기 때문에 작은 잡음특성을 나타낸다. (그림 8)에 ETRI와 경북대학교에서 공동 제작한 AC 방식 SSSD의 단면도와 두 개의 SSSD를 교차하도록 조립한 후 양성자 빔에 대한 영상을 획득한 결과를 나타내었다. 얻어진 영상은 $256\mu\text{m}$ 피치의 제품에 의한 것이며, 현재 $64\mu\text{m}$ 피치의 SSSD가 제작 중에 있다. 실리콘 스트립 디텍터의 경우 반도체 제조 기술의 발전으로 스트립 피치를 $10\mu\text{m}$ 이하로도 줄일 수 있지만, $50\mu\text{m}$ 이하의 피치에서는 방사선 영상의 해상도가 Compton 산란에 의하여 제한되기 때문에 의미가 없는 것으로 보고되고 있다[14].

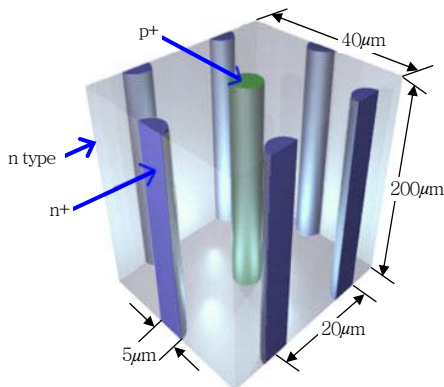


(그림 8) AC형 단면 실리콘 스트립 디텍터의 단면 구조와 양성자 영상 테스트 결과(ETRI, 경북대학교 공동 제작)

앞에서 살펴본 바와 같이 실리콘은 방사선의 흡수 계수가 낮아, 낮은 에너지와 적은 방사선량의 X-선에 대하여 우수한 영상을 얻기는 어렵다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 한 가지 방법은 스트립 디텍터의 측면으로 방사선을 조사하는 것이다[15]. 이 경우 방사선 감지영역의 두께가 수 cm 이상으로 길기 때문에 방사선 흡수를 높일 수 있다. 방사선 흡수를 높이는 근본적인 방법은 원자량이 큰 물질을 사용하는 것이며 Ge, GaAs, HgI₂ 등을 이용한 스트립 디텍터도 시도되고 있다.

라. 3차원 실리콘 디텍터

3차원 실리콘 디텍터는 수십 μm 의 간격으로 p+와 n+ 전극을 교대로 바늘 모양의 깊은 홈을 채워서 형성하는 PIN 다이오드 구조이다(그림 9) 참조 [16]. 3차원 디텍터는 기존의 평면 PIN 다이오드에서 웨이퍼 전체에 가해지는 수직 전계를 이용하는



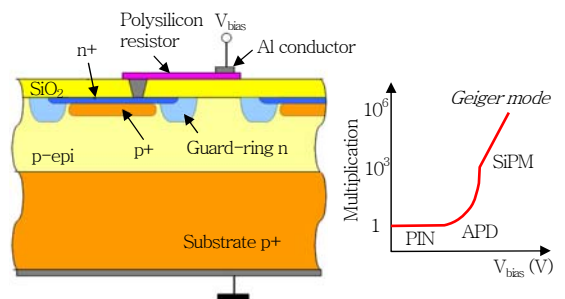
(그림 9) 3차원 실리콘 디텍터의 단위 픽셀 구조

것과 달리 홈을 매운 n+와 p+ 전극 간의 수평 전계를 이용한다. 이러한 3차원 구조는 방사선에 의하여 생성된 전하가 전극에 도달하는 시간이 매우 빠르고 (1-2ns), 10V 이하의 낮은 전압으로 기판을 공핍시킬 수 있다는 장점이 있지만 깊은 홈의 형성과 전극의 매립 등 공정이 어려워지는 단점이 있다[16].

마. 실리콘 광전증배관

고성능 방사선 센서는 낮은 조사량에 대하여 민감하여야 하고 극단적으로는 단일 광자에 대한 정보를 얻을 수 있어야 하는데, 이러한 센서로 기존의 PMT가 주로 사용되고 있으며, 방사능을 이용한 암진단 영상 장치인 PET와 MRI 혹은 PET-CT와의 융합 장치에 적용하기 위한 노력이 진행중이다. 그러나 PMT는 부피가 크고 약 3,000V의 높은 전압을 사용하여야 하며, 전자의 흐름인 전류특성을 이용하기 때문에 MRI와 같이 큰 자기장 내에서 전류의 왜곡이 생겨 원하는 영상을 얻기가 어렵다.

실리콘 광전증배관(SiPM)은 원리적으로 기존의 PMT를 완전히 대체할 수 있으며, 반도체 소자 및 공정기술로 소형화와 낮은 동작 전압 특성을 이룰 수 있고, 자기장으로 인한 영향도 완전히 배제할 수 있는 특성을 가지게 된다[17],[18]. (그림 10)에서 보는 바와 같이 SiPM은 애벌런치 포토다이오드(APD)와 유사하지만, 애벌런치 항복현상이 일어난 후의 Geiger 모드에서 동작하는 차이가 있으며, 이득이 10⁶ 정도로 매우 우수한 감도 특성을 나타낸다 [17]. SiPM의 단위 픽셀은 입사광의 유무만 판별할



(그림 10) SiPM 단위 픽셀에 대한 단면 구조 및 Geiger Mode 동작의 설명

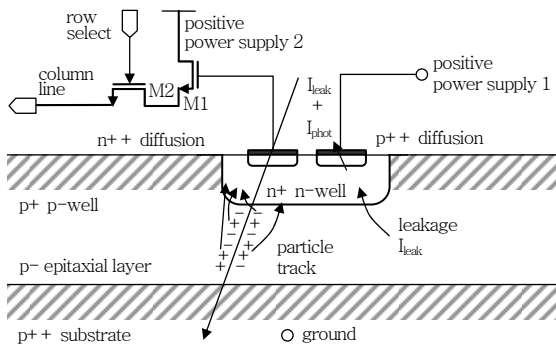
수 있지만 출력신호는 모든 픽셀 신호의 합이 되기 때문에 디지털 디바이스로 입사광의 수를 측정하는 아날로그식 광센서이며, 센서의 동적영역은 픽셀의 수와 동일한 큰 값을 가진다. SiPM은 단일 광자를 감지할 수 있는 차세대 센서로서 연구되고 있지만, 잡음, 방사선 내성 등의 문제가 해결되어 상품화되기까지는 추가적인 기술개발이 필요할 것으로 생각된다.

3. 단일형 픽셀 디텍터

가시광 영상소자인 CMOS 영상소자와 마찬가지로 방사선 영상 장치 역시 디텍터 개발의 궁극적인 목표는 센서 부분과 증폭 및 출력 회로를 하나의 기판 위에서 구현하는 것이다. 아직까지 단일형 픽셀 디텍터(monolithic pixel detectors)가 실용화된 예는 없지만, 1992년 고저항 p형 기판에 PIN 디텍터와 n-well 내에 형성한 pMOS 트랜지스터 회로를 구현한 이래로 다양한 연구가 진행되고 있다[19]. 대표적인 연구 사례를 아래에 살펴보았다.

가. 에피텍셀 층을 이용한 MAPS

일반적인 CMOS 공정은 낮은 저항의 실리콘 기판을 사용하기 때문에 방사선에 의한 전하 수집(charge collection)에 적합하지 않다. 이를 해결하기 위한 방법으로 수십 μm 의 고저항 에피텍셀 층이 형성된 기판을 사용하거나 고저항 기판을 사용하여

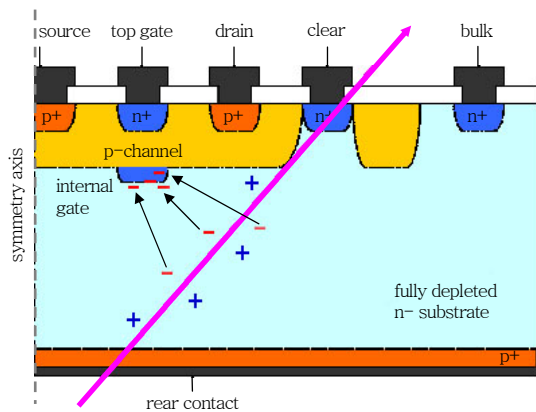


(그림 11) 에피텍셀 층의 방사선 감지 영역과 nMOS로 구성된 단일형 방사선 디텍터

방사선 감지 부분과 CMOS를 동시에 제작하려는 시도가 이루어지고 있으며, 에피텍셀 층을 이용한 예를 (그림 11)에 나타내었다[20]. 방사선에 의하여 생성된 전하는 열 확산에 의하여 n-well/p-epi의 다이오드로 수집되고, p-well 내부의 nMOS로 형성된 증폭 및 출력 회로로 전달된다. 이 경우 신호 전하량이 매우 작기 때문에 저잡음 회로가 요구되고, nMOS와 pMOS를 같이 제작할 수 없는 단점이 있다.

나. DEPFET 픽셀

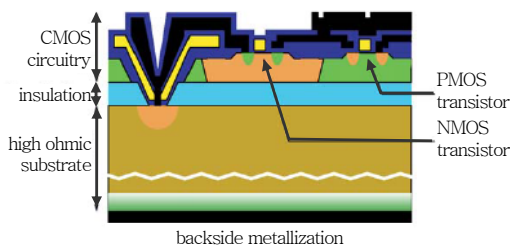
DEPFET는 n형 고저항 실리콘 기판 위에 p-well을 형성하여 p 채널 JFET을 형성하고 측면에 기판을 공핍시키기 위한 n+ bulk 영역을 형성하는 구조이다(그림 12 참조)[21]. JFET의 전류는 top gate와 internal gate에 의하여 조절되는데, 방사선에 의해 생성된 전하는 internal gate에 수집되어 채널의 전도도를 변화시킴으로써 JFET 전류를 변화시키며, 수집된 전하는 clear 접촉에 신호를 보냄으로써 제거된다. DEPFET 픽셀은 internal gate의 정전용량이 작아 우수한 잡음 특성을 가지기 때문에 작은 방사선 신호도 감지할 수 있지만 표준 CMOS 공정과 함께 하기에는 어려움이 있다. 또한 실리콘 소자의 방사선에 대한 신뢰성 문제는 여전히 숙제로 남아 있다.



(그림 12) 대칭축을 중심으로 DEPFET 디텍터의 1/2 픽셀에 대한 단면 구조

다. 고저항 기판의 SOI를 이용한 CMOS의 구현

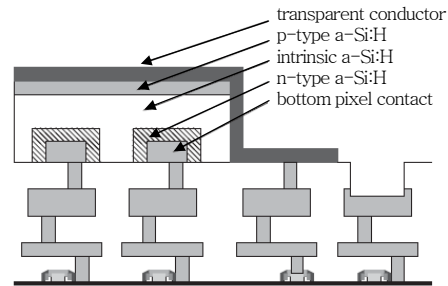
방사선 감지를 위한 고저항 실리콘 기판과 CMOS를 제작하기 위한 저저항 실리콘 층을 같이 사용하기 위하여 고저항 기판 위의 SOI를 이용하여 CMOS를 형성하는 방법이 시도되고 있다[22]. (그림 13)에 나타난 것처럼 저저항의 SOI 위에 CMOS 제작이 가능하며 방사선 감지를 위한 고저항 기판의 감지 영역과는 산화막의 via를 통하여 연결된다[22]. SOI 기판의 비싼 가격이 상용화의 걸림돌이지만, SOI 기판 제작 기술이 발달함에 따라 기판 제작 단가가 낮아질 경우 유망한 단일형 픽셀 디텍터로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.



(그림 13) 고저항 기판 위의 SOI 층을 이용한 단일형 방사선 디텍터의 단면 구조

라. CMOS ASIC과 비정질 실리콘 디텍터

수소의 함량이 20% 정도 되는 비정질 실리콘(a-Si:H) 물질은 방사선 감지 물질로 오래 전부터 연구되어 왔으며, 저잡음 및 저전력 회로 구현이 가능해짐에 따라 다시 주목을 받고 있다. CMOS ASIC 칩 상부에 방사선 감지를 위한 a-Si:H를 직접 증착하여 디텍터를 제작한 예를 (그림 14)에 나타내었다[23]. a-Si:H 경우 전하의 이동도가 낮지만, 높은 밴드갭 에너지를 갖고 비정질이기 때문에 방사선에 대한 내구성이 우수하며 CMOS 영역에 어떠한 회로 및 IC 기술도 구현될 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 a-Si:H를 대체할 수 있는 높은 원자량의 다결정 HgI₂에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 우수한 특성의 비정질 또는 다결정질 방사선 감지 물질을 용이하게 형성할 수 있는 증착기술의 개발이 주된 과제이다.



(그림 14) CMOS ASIC 상부에 비정질 실리콘을 증착하여 제작한 단일형 방사선 디텍터의 예

지금까지 살펴본 것 이외에도 CCD와 섬광체의 조합, 고저항 실리콘 웨이퍼를 이용한 p-n 접합 CCD 소자, APD와 섬광체의 조합, 실리콘 드리프트 디텍터(SDDs) 등 다양한 방법으로 반도체를 이용한 방사선 영상 장치용 디텍터에 대한 개발이 진행되고 있다[24].

IV. 결론

방사선 검출 및 영상 구현을 위하여 사용되는 다양한 반도체 물질과 이를 이용한 반도체 디바이스에 대해 살펴보았다. 재료 측면에서는 방사선의 흡수율이 높고 내방사선 특성이 우수한 CdTe, CdZnTe, GaAs, Se, PBI₂ 등의 무거운 원자량의 물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 이들이 실용화되기 위해서는 결함이 적고 넓은 면적에 균일한 막을 형성하는 공정 기술이 선결되어야 할 것이다. 한편 실리콘의 경우 방사선 효율이 낮고 방사선에 의한 열화의 문제점이 있지만, 우수한 기판 제작 및 공정 기술을 바탕으로 광자계수방식 CMOS ROIC나 측면 방사선 조사법 등으로 적은 방사선량으로도 영상을 얻을 수 있는 다양한 방법이 시도되고 있다. 뿐만 아니라 영상소자의 최종 목표라 할 수 있는 단일형 디텍터의 경우 CMOS 칩을 구현할 수 있는 실리콘 기판의 사용이 불가피할 것으로 생각된다.

방사선 영상소자에 대한 국내의 개발 현황은 아직 초보 단계라 할 수 있다. 삼성전자와 LG 필립스에서 a-Si 또는 a-Se 플랫 패널 시스템에 대한

개발이 진행되고 있지만, 다양한 픽셀 디텍터, 스트립 디텍터 및 단일형 픽셀 디텍터에 대한 연구는 일부 벤처 기업 및 학교에서만 이루어지고 있다. 또한 실리콘 기반의 방사선 디텍터를 제작하기 위해서는 CMOS 이상의 고청정 공정기술이 요구되지만 이를 실현할 수 있는 반도체 실험실이 여의치 않은 상황이다. 그러나 한국전자통신연구원 등의 국가출연연구원에서 방사선 영상 장치용의 다양한 디바이스를 개발할 수 있는 반도체종합실험실의 기반이 조성되어 있음은 큰 다행이며 앞으로도 지속적인 기술개발이 요구된다.

● 용어해설 ●

PIN 다이오드: PN 다이오드의 p형 반도체와 n형 반도체의 접합 사이에 불순물이 도핑되지 않거나 저농도로 도핑된 진성반도체 층(intrinsic layer)이 삽입된 구조로서, 다이오드의 공핍층(depletion layer)을 확대하여 빛과 방사선에 대한 감지 영역을 넓게 한 구조이며 반도체 디텍터로 많이 사용됨

약어 정리

| | |
|--------|---|
| 3T-APS | 3-Transistor Active Pixel Sensor |
| AMA | Active Matrix Array |
| APD | Avalanche Photodiode |
| APS | Active Pixel Sensor |
| ASIC | Application Specific Integrated Circuit |
| CCDs | Charge Coupled Devices |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CT | Computed Tomography |
| DEPFET | Depletion p-channel Field Effect Transistor |
| DRS | Digital Radiography System |
| DSSD | Double Side Strip Detector |
| JFET | Junction Field Effect Transistor |
| MAPS | Monolithic Active Pixel Sensor |
| MRI | Magnetic Resonance Imaging |
| PET | Positron Emission Tomography |
| PMT | Photo-Multiplier Tube |
| ROIC | Readout Integrated Circuit |
| SDDs | Silicon Drift Detectors |

| | |
|------|----------------------------|
| SiPM | Silicon Photo-Multiplier |
| SOI | Silicon on Insulator |
| SSSD | Single Side Strip Detector |
| TFT | Thin Film Transistor |
| UBM | Under Bump Metal |

참고 문헌

[1] J.P. Ponpon, "Semiconductor Detectors for 2D X-ray Imaging," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A551, 2005, p.15.

[2] J.P. Moy, "Large Area X-ray Detectors based on Amorphous Silicon Technology," *Thin Solid Films*, Vol.337, 1999, p.213.

[3] S.O. Kasap and J.A. Rowlands, "Direct-Conversion Flat-Panel X-ray Image Sensors for Digital Radiography," *Proc. IEEE*, Vol.90, 2002, p.591.

[4] N. Wermes, "Pixel Detectors for Particle Physics and Imaging Applications," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A512, 2003, p.277.

[5] J. Chaput, M. Caria, F. Laverroux, B. Surre, and J. Maublant, "Results on a Prototype of a Large-area X-ray Imaging Device Using CMOS Hybrid Detectors," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A555, 2005, p.236.

[6] C.R. Tull et al., "New High Sensitivity Silicon Photodetectors for Medical Imaging Applications," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol.50, 2003, p.1225.

[7] M.H. Izadi et al., "Low-noise Pixel Architecture for Advanced Diagnostic Medical X-ray Imaging Applications," in *Proc. of SPIE*, Vol.6142, San Diego, California, Mar. 2006, p.61420T.

[8] M. Locker et al., "Single Photon Counting X-ray Imaging with Si and CdTe Chip Pixel Detectors and Multichip Pixel Modules," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol.51, 2004, p.1717.

[9] X. Llopart and M. Campbell, "First Test Measurement of a 64K Pixel Readout Chip Working in Single Photon Counting Mode," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A509, 2003, p.157.

[10] H. Kruger, "2D Detectors for Particle Physics and for Imaging Applications," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A551, 2005, p.1.

[11] S.M. Ignatov et al., "Scintillator-Photodiode Linear Arrays for X-ray Inspection System," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol.487, 1998, p.545.

- [12] G.J. Royle et al., "Development of a 2D Silicon Strip Detector System for Mammographic Imaging Using Particle Physics Technology," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A493, 2002, p.176.
- [13] D.H. Kah et al., "Development and Test of Silicon Strip Detector for International Linear Collider," *Nucl. Instrum. Meth.*, in press.
- [14] L. Ramello, "Medical Imaging with Semiconductor Detectors," in *Proc. of AIP Conf.*, Vol.809, Melville, NY, Jan. 2006, p.263.
- [15] A. Bergamaschi et al., "Edge on Silicon Microstrip Detectors for Medical Imaging," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A549, 2005, p.199.
- [16] J. Kalliopuska, S. Eranen, and R. Orava, "3D Simulation of 3D Silicon Radiation Detector Structures," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A568, 2006, p.27.
- [17] A.N. Otte et al., "New Results from a Test of Silicon Photomultiplier as Readout for PET," in *Proc. IEEE Nuclear Science Symp.*, Rome, Italy, Oct. 2004, p.3738.
- [18] V. Saveliev, "The Recent Development and Study of Silicon Photomultiplier," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A535, 2004, p.528.
- [19] W. Snoeys, J. Plummer, S. Parker, and C. Kenney, "A New Integrated Pixel Detector for High Energy Physics," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol.39, Oct. 1992, p.1263.
- [20] G. Deptuch et al., "Monolithic Active Pixel Sensor with On-Pixel Amplification and Double Sampling Operation," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A512, 2003, p.299.
- [21] J. Ulrici et al., "Spectroscopic and Imaging Performance of DEPFET Pixel Sensors," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol.A465, 2001, p.247.
- [22] J. Marczewski et al., "SOI Active Pixel Detectors of Ionizing Radiation – Technology and Design Development," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol.51, 2004, p. 1025.
- [23] J.A. Theil et al., "Performance of a-Si:H Photodiode Technology-Based Advanced CMOS Active Pixel Sensor Imagers," in *Proc. of SPIE*, Vol.4435, San Diego, California, Dec. 2001, p.206
- [24] Y.K. Akimov, "Silicon Radiation Detectors(Review)," *Instrum. Exp. Tech.*, Vol.50, 2007, p.1.