

헤테르접합을 이용한 누설전류 저감을 위한 다층구조의 방사선 검출 물질 개발

오경민*, 윤민석*, 김민우*, 조성호*, 남상희*, 박지균**

인제대학교 방사선영상연구실*, 국제대학교 방사선학과**

Radiation detector material development with multi-layer by hetero-junction for the reduction of leakage current

Kyungmin Oh*, Minseok Yoon*, Minwoo Kim*, Sungho Cho*, Sanghee Nam*, Jigoon Park**

Radiation Image Laboratory, Inje University, Radiology Science, International University***

요 약

본 연구에서는 헤테로 접합을 이용하여 누설전류를 저감 시키는 기술을 적용하여 Particle-In -Binder을 이용한 방사선 영상 센서의 변환 물질을 개발하였다. 이는 디지털 방사선 영상 검출기의 두 가지 방식 중 하나인 직접방식에 사용되는 핵심 소자로 기존의 비정질 셀레늄(Amorphous Selenium)을 대체하여 더욱 효율이 높은 후보 물질들이 연구되어지는 가운데 태양전지와 반도체 분야에서 이미 많이 사용되어온 이종접합(Hetero junction)을 이용해 누설 전류를 저감 시키는데 그 목적이 있다. 본 연구에서 사용되는 Particle-In -Binder 제작 방법은 검출 물질 제작이 용이하고 높은 수율과 대면적의 검출기 제작에 적합하나 높은 누설 전류가 의료 영상 시스템에 있어서 문제가 되어 오고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 다층 구조를 이용하여 누설 전류를 저감시킨다면 Particle-In -Binder을 이용하여 간편하게 향상된 효율의 디지털 방사선 검출기를 제작 할 수 있다고 사료 되어 진다. 본 연구에서는 누설전류 및 민감도, 그리고 선형성에 대한 전기적 신호를 측정하여 제작된 다층 구조의 방사선 검출 물질의 특성 평가가 이루어 졌다.

keyword : hetero-junction, multi-layer, Digital Radiography

Abstract

In this study, the basic research verifying possibility of applications as radiology image sensor in Digital Radiography was performed, the radiology image sensor was fabricated using a multi-layer technique to decrease dark current. High efficiency materials in substitution for Amorphous Selenium(a-Se) have been studied as a direct method of imaging detector in Digital Radiography to decrease dark current by using PN junction or Hetero junction already used as solar cell, semiconductor. Particle-In -Binder method is used to fabricate radiology image sensor because it has a lot of advantages such as fabrication convenient, high yield, suitability for large area sensor. But high leakage current is one of main problem in Particle-In -Binder method. To make up for the weak points, multi-layer technique is used, and it is considered that high efficient

digital radiation sensor can be fabricated with easy and convenient process. In this study, electrical properties such as leakage current, sensitivity, signal linearity is measured to evaluate multi-layer radiation sensor material.

I. 서론

1. 직접 방식의 방사선 검출기

Image receptor에서 X-선 흡수에 의해 전기적 신호를 발생시키는 물질을 이용하는 방식으로 이런 물질을 광도전체물질(photoconductors)이라 하며 일반적으로 반도체라고 알려진 물질들이 이에 속한다. 이와 같이 Image receptor 내에서 X-선의 흡수에 의해서 야기되는 전자-정공쌍(electron-hole pairs:EHP)을 생성시키는 방식을 직접변환방식(direct conversion method)이라 한다. 직접변환방식의 신호 특성은 간접변환방식에 비해 훨씬 더 파장이 짧은 신호 특성을 보인다. 즉 분해능이 좋으므로 간접변환방식에 비해서 우수한 해상도를 가진다.²¹⁾ 직접변환용 receptor 물질로는 a-Se, CdTe, CdZnTe, PbI₂, HgI₂ 등이 있으며, 아직까지 a-Se를 제외한 물질들은 높은 암전류(Dark Current)에 의해 신호대 잡음비(SNR)가 낮아 궁극적으로 좁은 Dynamic Range를 나타낼 수밖에 없으며, 대면적 증착의 난점을 지니고 있다. 또 동시에 발생한 전자정공쌍의 효율적인 발생과 검출을 위해서 변환물질 내에 강한 전기장을 인가해 주어야 한다는 단점이 있다^{21,22)}.

2. 헤테로접합 구조

PIN 구조는 PN 접합을 이루고 있는 구조에서 순방향으로 전압을 인가하면 PN 경계면에 전자-정공쌍이 형성된다. 이 경우에 전자와 정공이 PN 경계면에만 국한되지 않고 일부 전자가 P형 반도체로 확산되면서 P형 반도체 내부로 들어가며 마찬가지로 일부 정공이 N형 반도체로 확산되어 N형 반도체 내부로 들어간다. 이런 문제를 해결하기 위하여 P형과 N형과의 접합부분 즉, 경계면에 공핍층 에너지가 작은 물질에 아무런 acceptor 나 donor를 첨가하지 않아 P형도 아니고 N형

도 아닌 중성(intrinsic)반도체를 삽입한 구조이다. 반면에 이종접합 구조는 PIN 구조와 비슷한 구조이지만 4족 원소를 주로 사용하여 3가의 원소와 5가의 원소를 주입하여 만들어진 PIN 구조에 반해, 에너지 준위가 각각 다른 물질을 접합하여 만들어진 구조이다. 에너지 준위에서 다른 2개의 물질을 접촉시킨 것 갈륨비소 GaAs 소자와 게르마늄 Ge 과 같은 2개의 다른 반도체 간의 접합 반도체와 금속 간의 접합 등은 헤테로 접합의 예이다. 본 논문에서는 요오드화납(PbI₂)을 산화납(PbO)과 접합 하였다.

헤테로 접합이 가진 고유의 성질을 발휘하려면 2개 물질 간의 결정 구조나 열팽창 계수 등이 아주 비슷해야 하는데, 그렇지 않은 경우 접합부에 여러 가지 계면 준위(interface state)가 형성되어 접합 고유의 성질을 잃게 된다.

3. 누설전류

누설전류의 측정을 위해서는 적절한 전극의 형성이 매우 중요하다. 상단전극(top electrode)과 하단전극(bottom electrode)의 종류와 각 계면에 전하의 유입을 막는 차단막의 종류에 따른 실질적인 성능 등이 조사되어야 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 일반적으로 반도체 이론에서는 반도체 층위에 직접 금속 전극을 증착할 경우 Schottky 장벽을 이루어 동작하는 것으로 알려져 있다. 이러한 금속-반도체층에서의 전하의 흐름은 공간 전하 층 단에서 금속까지의 전하 이동에 지배를 받는데 대부분의 Schottky 장벽 다이오드에서는 전자가 금속에서 반도체를 확산하고, 반도체에서는 금속으로 방출된다. 상온에서는 확산이 방출보다 빠르므로 전류전송이 방출에 의해서 제한을 받게 된다. 전자들이 금속으로 방출될 때 이들은 금속의 자유전자보다 높은 에너지를 갖고 있으며 아주 짧은 시간에 금속의 전자와 평형을 이루게 된다.

금속과 반도체의 접합에 있어서 전하의 이동을 자유롭게 하기 위해서는 저항성 접촉(ohmic contact)이 이루어져야 한다. 저항성 접촉은 기판에 대해서 기생 임피던스를 유기시키지 않으므로 소자특성에 영향을 주는 반도체내의 평형 carrier 농도를 변화시키지 않은 접합을 말하며, 금속의 일함수 ϕ_m 가 반도체의 일함수 ϕ_s , 보다 반드시 작아야한다. 높은 일함수를 가지기 때문에 적은 일함수를 가지는 거의 모든 금속이 저항성 접촉을 형성하여 금속전극으로부터의 전하유입을 최소화하는 전위막을 형성하게 된다. a-Se 기반의 직접 변환 방식의 방사선 검출기에 대해 Polischuk의 연구 결과를 보면 금속의 종류와 누설전류(dark current)의 크기에는 크게 연관성이 없는 것을 알 수 있다. 오히려 그 계면에 형성될 수 있는 화합물이나 결정화 상태에 더 영향을 받는 것으로 보고 되고 있다.

II. 실험 방법

1. 시편 제작

본 연구에서 사용된 기판(substrate, corning glass, 0.7t)은 ITO glass이고, 광전도체 물질 코팅을 위해 이 물질 제거가 이루어 졌다. 제거 과정은 aqua regia(황수: 진한 질산과 염산 혼합물의 통칭)로 12시간 정도 세척한 뒤, 초음파 세척기로 3.4시간 세척 후 마지막으로 증류수를 흘려 glass를 행구었다. 이렇게 기판을 세척한 뒤 5cm×2cm/8inch×10inch의 크기로 절단 후 산화납(PbO)과 요오드화납(PbI2)을 앞에서 설명한 PIB 법을 이용하여 200 μ m-250 μ m 박막을 제작하였다. 시편 제조를 위해 산화납(PbO)과 요오드화납(PbI2) powder(99.999%, 고순도社, Japan)를 폴리머 물질에 교반 하여 금속-폴리머(Polyvinylbutral, across) 결합을 가진 페이스트를 제조 한 뒤 300 μ m 정도의 마스크가 부착된 기판위에 코팅한 후 상온에서 2시간 건조 후 40-60 $^{\circ}$ C에서 6시간 정도 건조를 통해 1차 단일층(Single layer) 시편을 제작하였다. Fig. 4는 이러한 과정을 도식화 한 것 있다. 건조가 완료 된 후 100 μ m의 마스크를 이용해 두 번째 층(layer)인 요오드화비스무스(BiI3)와

산화납(PbO)을 코팅 하여 약 50 μ m-100 μ m 정도의 층을 제작하여 적층구조(Double layer)를 형성하였다. 앞서 언급된 방식과 동일하게 건조 시키지만 물질 특성에 따라 건조 시간은 조금씩 다르다. 제작된 시편은 2cm×2cm 크기로 시편이 제작 되었고, 450 μ m에서 500 μ m의 두께를 가지며 1015-1016 Ω ·cm의 비저항을 가진 유전체를 열증착법(Thermal evaporating system)을 통해 증착 하였다. 샘플시편의 최상단에는 ITO 전극을 스퍼터링법(Sputtering method)을 이용하여 증착 하였다. 최종적으로 제작 된 시편의 모식도가 Fig. 1이다.

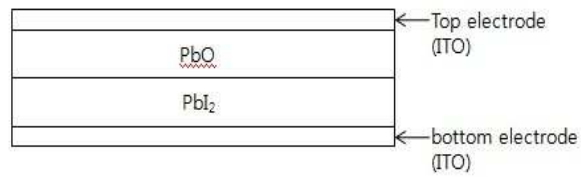


Fig. 1 제작된 시편의 모식도

2. 특성 평가

본 연구에서는 PIB 법으로 제작된 시편 위해 버퍼층(Buffer layer)을 삽입하고 누설전류(Dark current)의 저감 확인을 위해 인가전압은 전압발생기(EG&G 558H, USA)를 이용하여 측정 하였고 이때 발생하는 누설전류(Dark current)를 동일한 조건하에서 측정하기 위하여 전압 인가 후 1분 후 전류측정기(Keithley 6517, USA)를 이용하여 측정하였다.

$$J_{dark} = -qD_n \left. \frac{dn(x)}{dx} \right|_{x=0}$$

Fig. 2은 이러한 누설 전류(Dark current) 측정의 개요도를 나타내고 있다.



Fig. 2 누설전류 측정 개요도

본 연구에서 사용된 방사선량 검출기는 Ion chamber 2060(radical cooperation 社)으로 정교한 제품을 이용하여 검출기 표면에 도달하는 선량을 1mR/cm2으로 정확히 제어하였다. 또한 제작된 시편에 적절한 X-선을 노출시키기 위해 콜리메이터를 이용하여 조사야를 제어하였다. 주위 X-선 측정을 위한 여러 계측장비의 오동작을 막기 위하여 납으로써 계측기기를 차폐하였다. 제작된 시편의 측정은 전극 양단에 전압을 인가한 후, X-선을 조사한 다음 광도전체에서 생성된 광전류(Photocurrent)는 일정한 저항의 전위차로써 획득된다. 획득은 다음 수식 (1)을 통해 간단히 설명된다.

$$\Delta Q = \frac{\int_0^T V dt}{R} \quad (1)$$

오실로스코프를 통해 획득된 전압의 파형을 matlab으로 저장하여 ACQ 프로그램을 통해 적분된 값을 획득하여 사용된 저항 성분으로 나눠주면 광전류는 쉽게 구할 수 있다. Fig. 6은 광전류(Photocurrent) 측정방법 모식도를 간단하게 나타내었다.

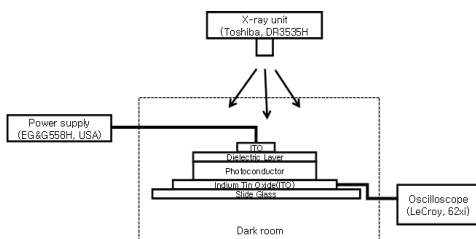


Fig. 3 X선에 대한 민감도 측정 개요도

III. 결과

1. 구조적 특성 평가

진공증착법과는 달리 PIB 법으로 시편을 제작할 때는 시료의 조건이 매우 중요하다. 이는 시료의 grain size가 박막의 표면 상태 등을 포함하는 물리적 성질 및 전기적 성질 등에 큰 영향을 미치기 때문이다^{[3][4]}. 따라서 본 연구에 앞서 시료의 상태를 관측하기 위해 주사 전자현미경(SEM)으로 촬영하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 다결정 입자는 5 μm의 grain size에 직사각형 모양으로 침전 시 조밀하게 쌓기 좋은 형태이다. 기존의 쉬버저서의 문헌에서 언급 되었다시피 알갱이의 형태와 크기에 따라 필름 제작의 특성에 큰 변화를 보이고 충전율에 영향을 주므로 전기적 특성에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

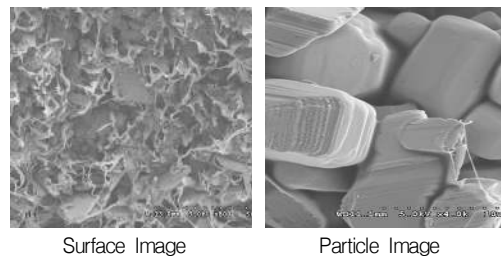


Fig. 4. 제작된 시편의 SEM Image

2. 전기적 특성 평가

모든 시편의 누설전류(Dark current)는 0.2-2.0V/μm 범위의 인가전압에서 안정화 된 상태 이후에 측정되었다. Fig. 5는 제작된 검출기의 동차전압에서 측정된 누설전류(Dark current) 결과 값이다. 인가전압에 따른 non-ohmic, super-linear fashion으로 인해 누설전류(Dark current)가 상승되었음이 확인 되었다. 본 논문에서는 두 종류의 시편에 대해서 1V/μm이하에서 10pA/cm2 이하로 앞서 언급 된 기준 값의 범위 안에서 측정되었다. 획득된 누설전류(Dark current)는 PVD 방법으로 제작된 검출기에 비해 상당히 낮은 수치로 기존 문헌들

과 비교 했을 때 PIB 방법으로 제작된 광도전체(Photo conductor)에 대해서 누설전류(Dark current) 특성이 상당히 향상되었음을 보여준다.

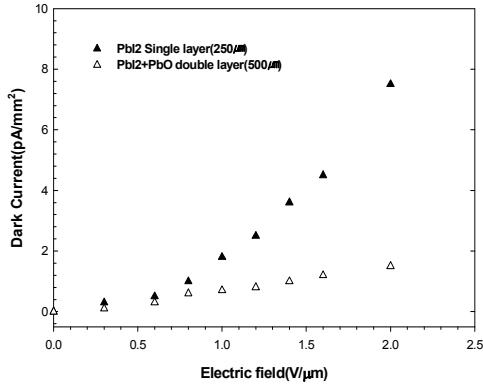


Fig. 5 제작된 시편의 측정된 누설전류

X-선 광전류(Photocurrent) 측정은 검출기에 입사된 X-선의 단위 노출과 면적에 수집된 전류량으로 정의 내려진다. 영상 시스템의 민감도는 Quantum efficiency, Primary conversion efficiency, Optical quanta and Electric charge 에 의존 된다. Fig. 6은 X-선에 대한 민감도 (sensitivity)를 나타내었다

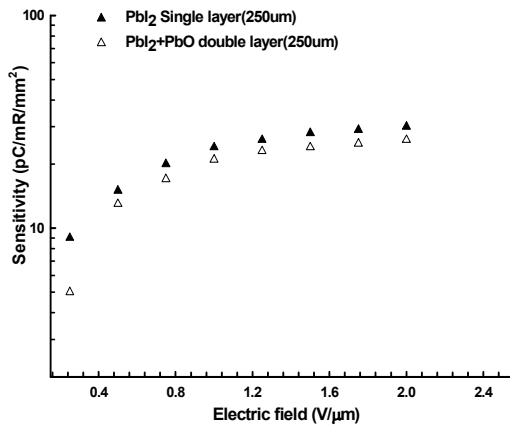


Fig. 6 제작된 시편의 측정된 X선에 대한 민감도

본 연구에서는 누설전류(Dark current) 저감을 가장 큰 목표로 하였고, 수 pA/mm² 정도까지 누설전류 (Dark current)를 저감 시킬 수 있었다. X-선 민감도 (Sensitivity)는 단일 시편에 비해 크게 떨어지지 않은 각각 2.3nC/mR/cm² 으로 측정되어 SNR을 높일 수 있었다. Signal lag 특성에 있어서 적층구조(Double layer)에 따른 Charge-trapping으로 단일시편(Single layer)에 비해 두 배 정도 높은 결과를 보였으나 연구 자체가 처음 시도 되었고 차후 세부적인 공정상의 개선으로 보완 해야 할 사항 이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 남상희, 윤정기 : 디지털 X선 detector 설계를 위한 비정질 실리콘 박막 트랜지스터의 특성해석. 대한의용생체공학회지, 1998, vol 20/1, p228-229
- [2] 남상희, 박성광, 최준영 등 : 비접촉식 Probe를 이용한 Digital Image의 구현, 대한의용생체 공학회지, 1998, vol 1, p224-225
- [3] Safa O. Kasap, John A. Rowlands : Direct conversion flat panel X-ray image sensors for digital radiography, IEEE, 2002, vol 90, p591-604
- [4] Barski LL, Wang X, Wandtke J, et al : Comparison of a-Se direct-conversion and CsI(Tl) indirect-conversion flat-panel digital detectors: a clinical assessment of image quality for general radiography applications, Proc. of SPIE, 2006, vol 6142
- [5] Denny L. Lee Lawrence K. Chung, Brian Rodricks, Gregory Fpowell : Improved imaging performance of a 14×17-inch direct radiography system using Se/TFT detector, SPIE Medical Imaging. 1998, Vol. 3336, p14-23
- [6] L. S. Jeromin, D. Lee : Application of a-Si active-matrix technology in a X-ray detector panel, Sid 97 Digest, 1997, vol 91
- [7] Denny L. Lee Lawrence K. Chung, Lothar S. Jeromin : A new digital detector for projection radiography, SPIE, 1995

IV. 고찰 및 결론