

The Fabrication and Property Evaluation of Poly-crystalline CdTe based Photon Counting X-ray Sensor

Sang Sik Kang, Ji Koon Park

Department. of Radiological Science, International University of Korea

다결정 CdTe 기반의 광계수형 X선 센서 제작 및 특성평가

Abstract

An electrical signals of a conventional radiation medical imaging sensor are obtained by charge integration method. In this study, the polycrystalline cadmium telluride(p-CdTe) film was fabricated by a thermal evaporation method for the photon counting sensor development with excellent resolution in low exposure dose. From the fabricated p-CdTe sensor, the physical properties(SEM, XRD) and the electrical properties(leakage current, x-ray sensitivity, SNR) were evaluated. As a result, the leakage current of below 5 nA/cm^2 and $7 \text{ } \mu\text{C/cm}^2\text{-R}$ of the X-ray sensitivity were showed in below $1 \text{ V}/\mu\text{m}$. In addition, the signal to noise ratio showed the values of above 5000 at operating voltage.

Key Words : photon counting, polycrystalline, cadmium telluride, charge collection efficiency, thermal evaporation

요약

종래의 방사선 의료영상 센서는 방사선에 의해 생성된 전하신호를 화소내에서 적분하는 방식이다. 본 연구에서는 저선량에서 우수한 해상력이 가능한 광계수형 영상센서를 개발하기 위해 진공 열증착법을 이용하여 다결정 CdTe(p-CdTe) 필름을 제작하였다. 또한, 광계수형 센서의 성능평가를 위하여 물리적 특성(SEM, XRD) 및 전기적 특성(leakage current, x-ray sensitivity, SNR) 평가를 하였다. 측정 결과, $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 이하의 인가전압에서 5 nA/cm^2 이하의 누설 전류밀도를 보였으며, X선 발생신호량은 $7 \text{ } \mu\text{C/cm}^2\text{-R}$ 으로 광계수형 센서로의 적용에 적합한 것으로 평가되었다. 또한, 신호대잡음비는 동작영역에서 5000 이상의 값을 보였다.

중심단어: 광계수, 다결정, 텔루르화카드뮴, 전하수집효율, 열증착

I. INTRODUCTION

의료진단을 위한 방사선 영상획득 기술이 기존의 필름-스크린 기반의 아날로그 방식에서 반도체 필름을

이용한 디지털 방식으로 급속도로 대체되어 왔으며, 이러한 디지털 방사선 영상센서 기술은 전기적 신호 변환방식에 따라 크게 두가지 평판형 검출방식으로 나눌 수 있다.^{[1],[2]} 먼저, 광도전체(a-Se, HgI₂, PbO, PbI₂, CdTe 등) 필름을 이용하여 X선을 직접 전기적 신호

로 변환하는 직접변환 방식이 있다. 이러한 방식은 해상력이 우수한 장점이 있지만, 전하수집효율 및 신호대 잡음비 등이 낮은 단점이 있다. 한편, 섬광체(CsI:N a, Gd₂O₂S:Tb 등)를 이용하여 1차적으로 X선을 가시광으로 변환한 후, 가시광을 화소내에서 광소자에 의해 전기적 신호로 변환되는 방식을 간접변환방식 이라 하는데, 이러한 방식은 가시광의 산란에 의한 공간해상력이 낮은 문제점이 보고되고 있다.^[1] 특히, 이러한 두 영상화 기술 모두 인체에 조사된 X선 강도에 비례한 전기적 신호를 영상신호로 변환하는 전하적분형(charge integration) 방식으로 화소내에서 잡음(noise) 신호도 동시에 획득되기 때문에 저선량에 대한 신호대 잡음비가 낮아 영상의 해상력이 저하되어 환자의 피폭선량의 증가를 가져오게 된다.

이에 비해 광계수 방식의 검출 기술은 화소내에 입사되는 전자파 방사선의 광자를 각각 계수(counting)하는 방식으로 노이즈 성분이 포함되지 않기 때문에 낮은 선량에서도 고해상도의 영상화가 가능한 기수로 최근 치과영상 센서로 적용된 소면적(<10cm²)의 결정구조의 CdTe에 대한 연구가 보고되었다.^[4] 하지만, 결정성장에 의한 CdTe 센서는 대면적으로 제작하기 어려워 흉부 및 유방영상 등과 같은 의료 진단영역에 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서, 이러한 광계수형 영상센서의 적용분야를 확대하기 위해서는 진공열증착 기술을 이용한 다결정 CdTe 필름 제작기술이 요구되고 있다.^{[5],[6]}

본 연구에서는 이러한 대면적 제작 기술이 가능한 진공열증착 기술을 적용하여 다결정 CdTe 필름을 제작하여 구조를 분석하고, 유방영상 분야에서 광계수형 영상센서로의 적용 가능성을 평가하기 위한 전기적 특성 평가를 하고자 하였다.

II. MATERIALS AND METHOD

1. 시편 제작 및 구조분석

본 연구에서는 광계수형 센서로 적용 가능한 광도 전체 물질 중에서 높은 밴드갭(~2.3 eV)에 의한 열적 잡음이 낮고, 일함수(W)가 약 5 eV 정도이며, 진공 열증착 방식에 의해 대면적 제작이 가능한 텔루르화카

드뎀(CdTe) 반도체화합물을 이용하여 시편을 제작하였다. 시편 제작에 이용된 물질은 Cerac 社 의 순도 99.9 %를 이용하였으며, 자체 제작한 진공 열증착 장비를 이용하여 ITO 유리기판 위에 증착하였다. 진공도는 3×10^{-5} Torr를 유지하였으며, 증착시간을 조절하여 CdTe의 필름 두께를 조절하였다. CdTe의 면적은 2 cm × 2 cm로 증착하였고, 전기적 특성평가를 위해 상부전극으로 ITO 박막을 스퍼터링 방식을 이용하여 1 cm × 1 cm 면적으로 증착하여 시편을 제작하였다.

증착된 CdTe 필름의 형상을 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM) 사진을 분석하였으며, 결정성장 구조를 분석하기 위해 X선 회절분석(XRD)을 하였다.

2. X선 양자효율 평가

X선 양자효율은 물질내에 입사된 X선 광자가 물질을 투과하면서 감약되는 비율로써 광자의 에너지와 물질의 물리적 특성에 의존한다. 유방영상용 X선 광자는 저에너지 영역의 연속에너지 광자들을 이용하기 때문에 양자효율을 이론적으로 계산하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램인 MCNPX 광자모의 수송코드를 이용하여 CdTe 필름의 두께에 따른 양자효율을 모의 추정하였다. 시뮬레이션에 이용된 소스 광자는 Mo 타겟의 30 kVp 관전압에서 발생된 광자 스펙트럼을 이용하였다. 또한, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 CdTe 필름의 제작 두께에 활용하였으며, 제작된 CdTe 필름에 대해 유방촬영장치치를 이용하여 30 kVp에 대한 두께별 양자효율을 측정하여 시뮬레이션 값과 비교 분석하였다.

3. 제작된 p-CdTe 센서의 전기적 특성 평가

제작된 p-CdTe 필름의 광계수형 영상센서 적용을 위한 전기적 특성 요건은 저에너지에 대한 펄스신호를 계수하기 위해 낮은 누설전류와 높은 전하발생량이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 유방촬영 영역인 30 kVp 관전압 조건에서 제작된 시편에 대한 인가전압에 따른 누설전류와 X선 민감도를 측정하여 전기적 특성을 분석하였으며, 광계수형 센서로의 적용 가능성을 알아보기 위하여 신호대잡음비를 평가하였다. Fig. 1. 은 인가전압에 따른 누설전류 및 X선 민감도 측정을 위한

측정 개략도를 나타낸 것이다.

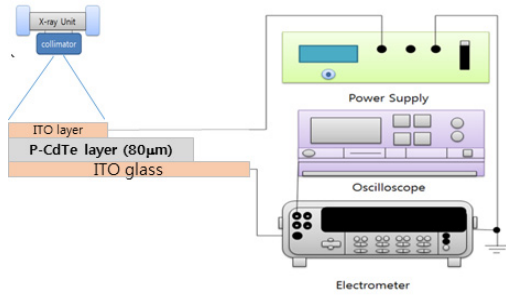


Fig. 1. Schematic diagram for electrical signal measurement of p-CdTe sensor.

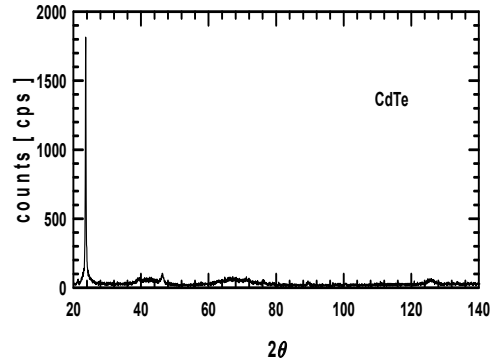
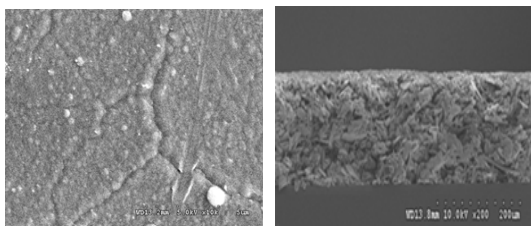


Fig. 3. XRD pattern of the fabricated CdTe film.

III. RESULT AND DISCUSSION

1. 제작된 p-CdTe 센서의 물리적 특성

제작된 다결정 CdTe 시편에 대한 표면 및 단면 형상 분석을 위한 SEM 사진이 Fig. 2. 에 보여주고 있다. Fig. 2(a). 에서와 같이 CdTe 필름의 표면은 다수의 불순물과 크랙(crack) 결함이 존재하였고, Fig. 2(b). 의 단면사진에서 알 수 있듯이 승화된 CdTe가 덩어리 형태로 기관에 형성되어 많은 빈공간(vacancy)가 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 증착실의 청정도와 증착장비 내부에 존재하는 불순물 및 증착시 진공도 등의 외적 환경에 의한 것으로 향후 개선이 가능한 것으로 판단된다. 한편, Fig. 2는 제작된 CdTe 필름의 XRD 분석결과를 보여주고 있다. 결과와 같이, 기존에 결정 성장에 의한 결정구조와 다른 회절 패턴을 보이고 있으며, 전형적인 다결정 구조로 성장하였음을 확인할 수 있었다.



(a) Surface view (b) Cross-section view

Fig. 2. SEM images of the fabricated CdTe film.

2. CdTe 두께별 양자효율

Fig. 4는 MCNPX 코드를 이용하여 Mo 타겟의 30 kVp 연속 X선 광자에 대한 CdTe 두께별 양자효율 시뮬레이션 값과 측정값을 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 100 µm 두께에서 72 %의 효율을 보였으며, 그 이후의 두께에서 포화되는 경향을 보였다. 이에 비해 측정 결과는 100 µm 두께에서 약 55 %의 양자효율 값을 가짐을 알 수 있었고, 200 µm 두께에서 약 70%의 값을 나타내었다. 이러한 값의 차이는 증착에 의해 제작된 CdTe는 다결정 구조를 가지며, Fig. 2의 SEM 결과에서 보듯이, 벌크 내부에 다수의 빈공간(vacancy)이 존재함으로써 광자와의 상호작용 확률이 낮아진 것에 기인한 것이다. 향후, 이러한 양자효율을 개선시키기 위한 공정연구가 필요할 것으로 판단된다.

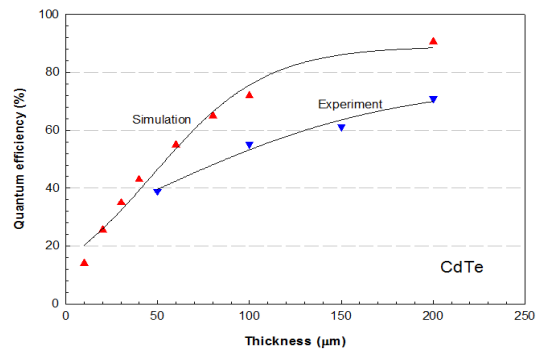


Fig. 4. Quantum efficiency of CdTe as a function of film thickness at 30 kVp.

3. 제작된 p-CdTe 센서의 전기적 특성

Fig 5.는 제작된 다결정 CdTe 센서의 누설전류 측정 결과를 나타내었다. Fig.에서와 같이, 1.6 V/ μm 이하에서 5 nA/ cm^2 이하의 누설전류 밀도를 보였으며, 일반적인 동작전압인 1 V/ μm 의 인가전압에서 약 2.5 nA/ cm^2 의 누설전류 값을 얻었다.

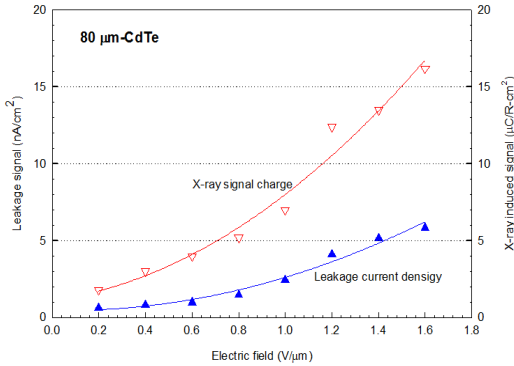


Fig. 5. Leakage signal and x-ray induced signal as a function of electric field.

이러한 값은 문헌에서 보고되고 있는 전하적분형 센서인 a-Se 에 비해 다소 높으나, X선 민감도 측정 결과, 1 V/ μm 에서 7 $\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{R}$ 으로 전하적분형 검출센서인 a-Se 센서보다 10배 이상 높은 특성을 보였다.^[7]

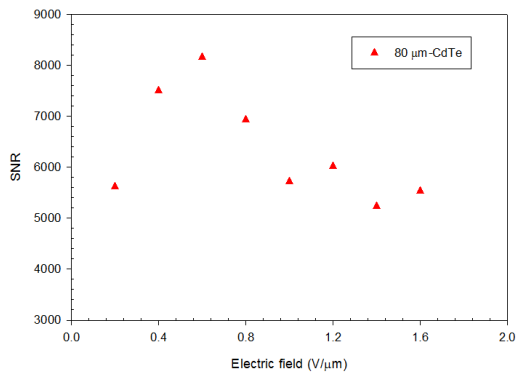


Fig. 6. Signal to noise ratio of p-CdTe film as a function of electric field.

또한, Fig. 6.에서와 같이 측정한 누설전하와 X선에 의한 신호전하의 비인 픽셀당 신호대잡음비(SNR)은

전 동작영역에서 5000 이상의 높은 값을 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터, 향후 공정개선 및 노이즈 저감을 위한 보호막층 등의 구조개선을 위한 전기적 특성을 향상시킨다면, 유방영상을 위한 광계수형 영상센서로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

IV. CONCLUSION

종래의 비정질 셀레늄(a-Se)를 이용한 직접변환 방식의 평판형 X선 영상센서는 전하적분형 신호검출 방식으로 공간해상력은 우수하나, 노이즈 성분이 영상신호에 포함되어 저선량에서 해상력이 저하되고, 신호효율을 높이기 위해 고전압 인가에 따른 검출기의 수명 저감 및 재현성이 낮은 문제점이 있다. 이러한 전하적분형 센서를 대체하기 위해 본 연구에서는 다결정 CdTe 방사선 필름을 제작하여 광계수형 방사선 영상센서를 개발하기 위한 기초연구를 수행하였다. 광계수형 영상센서는 기존의 전하 적분형 디지털 영상센서와는 다른 변환물질의 물성이 요구된다. 이에 본 연구에서 제시한 p-CdTe 센서는 기존 a-Se 센서에 비해 월등히 우수한 1 V/ μm 의 인가전압에서 7 $\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{R}$ 의 높은 X선 신호발생량과 5000 이상의 신호대잡음비를 가짐을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과, 다결정 CdTe는 높은 원자번호를 가져 우수한 양자효율이 가질 뿐만 아니라, 낮은 일함수(~5eV)에 의해 광자 한 개당 높은 전하를 발생시켜 광계수형 센서 물질로 적합하였으며, 향후 차세대 광계수형 기반의 디지털 X선 영상센서 개발을 위한 후보물질로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] Kyung-O KIM, "Measurement of the electrical properties of a polycrystalline cadmium telluride for direct conversion flat panel x-ray detector", 2014 JINST, pp. 1-4, 2014
- [2] Kyung-O KIM, et al, "Radiation detector material development with multi-layer by hetero-junction for the reduction of leakage current", The Korean Society of Radiology, Vol. 3, No. 1, pp 11-15, 2009.
- [3] Ji-Koon Park, et al, "X-ray sensitivity of hybrid-type sensor based on CaWO₄-selenium for digital X-ray imager", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 5, No.

4, pp 133-134, 2004.

- [4] Ji-Koon Park, et al, "Performance evaluation of a selenium based prototype digital radiation detector", J. Biomed. Eng, Res, pp. 300-305, 2007.
- [5] Heo-Ye-Ji, et al, "A study of the photon counting sensor setup for the evaluation of the photon count efficiency, The Korean Society of Radiology Proceeding of 2012 Autumn conference. pp. 177-180, 2012.
- [6] Fred P. Vaccaro, "Limitations of the Hecht equation encountered in measuring μ products in Mercuric Iodine", Vol. 50, pp. 1-5, 2003.
- [7] Safa Kasap, et al, "Amorphous and polycrystalline photoconductors for direct conversion flat panel x-ray image sensors", Sensor, Vol. 11, pp. 5112-5157, 2011.