

The Fabrication and Evaluation of HgI₂ Semiconductor Detector as High Energy X-ray Dosimeter Application

Il Hong Choi*, Sung Jin Noh**, Jung Eun Park***, Ji Koon Park*, Sang Sik Kang*

*Department of Radiological Science, International University of Korea**

*Research Center, Dongnam Inst. of Radiological & Medical Sciences***

*Department of Biomedical Engineering, INJE University of Korea****

고에너지 X선 선량계 적용을 위한 TiO₂ 첨가된 요오드화수은 반도체 검출기 제작 및 평가

최일홍*, 노성진**, 박정은***, 박지균*, 강상식*

한국국제대학교 방사선학과*, 동남권 원자력의학원**, 인제대학교 의용공학과***

Abstract

In this paper, for a new detection system development with the better accurate dose evaluation and beam distribution imaging using the small field irradiation of linear accelerator, the compound semiconductor based detection sensors were fabricated and the performance evaluation was investigated. The special particle-in-binder sedimentation was used for a large area film sensor fabrication. The detection properties for high energy x-rays were investigated from a dark current, an output current, a rising time, a falling time, and response delay measurement. The experimental results, the TiO₂ mixed HgI₂ sensor showed the best electrical characteristics than PbI₂, PbO, pure HgI₂. Linearity, repeatability, and accuracy tests from LINAC were tested, the TiO₂ mixed HgI₂ sensor showed the better performance than the commercially available dosimetry devices.

Key Words : Semiconductor sensor, Linear accelerator, Quality control, Dosimeter

요 약

본 연구에서는 선형가속기의 소조사면에 보다 정확한 선량계측이 가능하고, 빔 분포 영상화가 가능 계측시스템 개발을 위해 반도체화합물을 이용한 검출 센서를 제작하여 성능평가를 하였다. 센서 제작은 대면적 필름 형성을 위해 입자침전법을 이용하였다. 고에너지 X선에 대한 검출 특성은 암전류, 출력전류, 상승시간, 하강시간, 응답 지연 측정을 통해 조사되었다. 측정 결과, TiO₂가 혼합된 HgI₂ 센서가 PbI₂, PbO, HgI₂ 보다 우수한 특성을 보였다. 선형가속기를 이용하여 선형성, 재현성 및 정확성 평가를 수행하였으며, 결과적으로 실제 임상에 적용되고 있는 선량 검출기와 감응 특성을 비교 시 재현성, 선형성 및 정확성 등에서 매우 우수한 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

중심단어 : 반도체 센서, 선형가속기, 정도관리, 선량계

I. INTRODUCTION

반도체 화합물(HgI₂, PbI₂, CdTe, CdS 등)을 이용한 방사선 검출기는 기체 및 섬광 검출기에 비해 대면적으로 제작이 용이하여 영상의 해상력이 우수한 장점이 있다. 또한, 실리콘(Si) 또는 게르마늄(Ge)에 비해 일반적으로 높은 밴드갭(> 2 eV)을 가져 상온에서 동작이 가능할 뿐만 아니라, 높은 원자번호에 의해 고에너지 방사선에 대한 흡수율이 높아 의료 방사선치료분야 및 산업검사용으로 적용이 유리한 장점을 가진다^{[1]-[2]}.

한편, 선형가속기를 기반으로 한 방사선수술에 이용되는 조사면의 크기는 0.5 ~ 3 cm로서 통상적인 방사선치료에 사용되는 조사면의 크기보다 현저히 작으며, 이에 따른 소조사면의 선량특성에 관한 정확한 측정이 필요하게 된다.

일반적으로 소조사면의 선량특성을 측정하기 위해서는 열형광선량계(TLD), 다이오드 검출기, 이온전리함, 다이아몬드 검출기, 필름 등이 사용되며, 각 검출기의 소조사면 선량계측에 있어 장점 및 단점은 여러 문헌에서 소개되었다^[3].

Bjarngard 등^[4]은 소조사면의 선량계측을 위해서는 조사면 직경의 절반 보다 작은 크기의 검출기 사용을 제안하였으며, Surendra 등^[5]과 Heydarian 등^[6]은 다이오드 검출기 및 이온전리함 보다 조직등가물질에 가까운(Z=6) 다이아몬드 검출기가 정확한 선량계측을 할 수 있다고 제안하였다. 하지만 다이아몬드 검출기는 선량률 의존성이 높고 검출기 비용이 매우 비싸다는 단점이 있다. 그리고 Dawson 등은 실험을 통하여 이온전리함으로 소조사면의 20 ~ 80%의 반응영역을 측정하기 위해서는 필름이나 다이오드 검출기와는 다르게 보정계수의 적용이 필요한 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 소조사면의 정확한 선량 측정과 동시에 광량 측정이 가능한 반도체화합물 기반의 방사선 검출 센서를 개발함으로써, 기존에 사용되어 왔던 선량계의 대체 가능성을 확인하고, 새로운 QA 프로그램 프로토콜을 제시하고자 하였다.

II. RESEACH METHOD

1. 반도체화합물 기반 방사선 센서 제작

입자프린팅(Particle-in-Binder Printing; PBP)법은 디스플레이의 백라이트, 광도전체 필름 등 다양한 분야의 대면적 필름 제작법으로 널리 이용되고 있는 공정이다. 현재 이러한 PBP법에 의해 제작된 필름은 진공증착법에 비해 낮은 제조비용으로 상온, 대기압에서 쉽게 제조가 가능하다는 장점이 있지만, 전기-광학적인 신뢰성 및 효율이 낮은 단점이 있다. 한편, 방사선 영상검출기는 인체의 영상을 얻기 위해 넓은 면적(~14 × 17 inch²)을 요구하고 있는데, 현재까지 a-Se 및 a-Si 이외의 높은 원자번호를 가진 반도체화합물에 대해서는 진공 증착법으로 대면적 필름을 제작하기 어려운 제조공정 기술이다.

이에 본 연구에서는 반도체화합물을 이용하여 수백 마이크로 이상의 필름 두께를 가진 검출센서를 제작하기 위해 입자침전법(Particle-in-Binder Sedimentation; PIB)법을 이용하였다.^[7] 시편 제작에 사용된 반도체 화합물 재료는 Kojundo chemical laboratory 社의 순도 99.999%의 mercury(II) iodide, lead(II) oxide와 순도 99.99%의 lead(II) iodide 및 CERAC 社에서 제작된 순도 99.5%의 titanium dioxide이다.

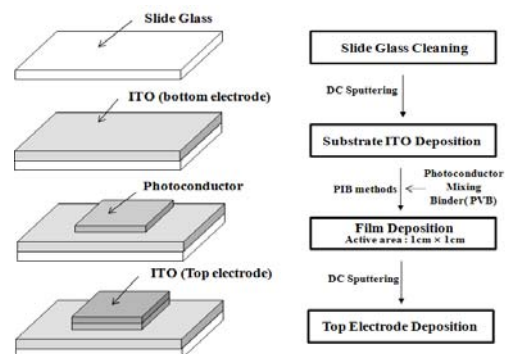


Fig. 1. Fabrication process for semiconductor film sensor using particle-in-binder sedimentation(PIB) method.

필름 제조를 위한 바인더는 DGMA(Diethylen Glycol Monobutyl Ether Acetate)와 분산제 DGME(Diethylen Glycol Monoethyl Ether)를 혼합한 용매에 폴리머 물질

(Poly-Vinyl-Butral)을 첨가하여 제조하였다. 시편은 ITO(Indium Thin Oxide)가 형성되어 있는 유리 기판 상부에 PbI_2 , PbO , HgI_2 그리고 HgI_2 와 TiO_2 의 혼합물을 각각 PBS 방식으로 형성한 이후, 상부 전극으로 ITO를 DC magnetron sputtering 장비를 이용하여 형성하였다. 제작된 시편의 방사선 검출면적은 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 이며, 반도체화합물 필름층의 두께는 약 $400\text{ }\mu\text{m}$ 내외로 제작하였다. Figure 1. 은 시편 제작을 위한 공정 과정을 도식화 한 것을 나타내었으며, figure 2. 는 제작된 시편의 단면도 및 사진을 보여주고 있다.

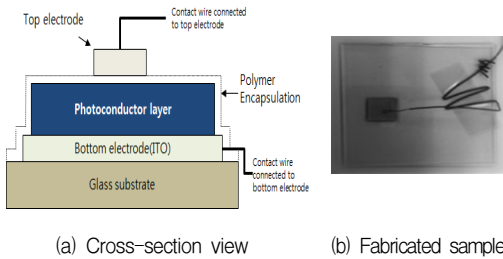


Fig. 2. (a) The cross-section view and (b) the fabricated sample of fabricated radiation detection sensor.

2. 고에너지 X선에 대한 반응특성 평가

방사선치료 장비의 소조사면에서의 효율이 우수한 고에너지 방사선에 대한 선량을 측정하는 정도관리 장치 개발을 위해서 전기적인 특성 평가가 매우 중요하다. Figure 3. 은 제작된 검출 센서에 대한 전기적 특성을 확인하기 위한 모식도로써 SSD(source to surface distance)를 100 cm 으로 고정시킨 이후에 방사선 에너지와 에너지 세기의 변화에 따른 방사선 응답 특성을 확인하였다.

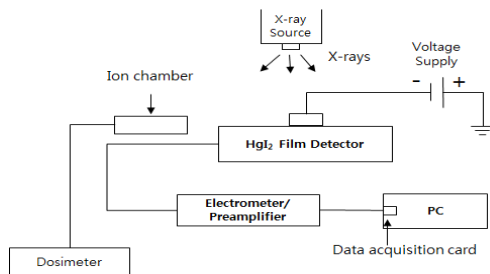


Fig. 3. Schematic diagram for x-ray induced response measurement of semiconductor sensor.

X선 반응신호 측정에 사용된 계측기는 미소전위계(Keithley, 6517A, USA)와 오실로스코프(LeCroy, 62 Xi, USA)이며, 구동전압은 $1\text{ V}/\mu\text{m}$ 가 인가되었으며, 미소전위계를 통하여 수집된 전하의 출력 신호를 오실로스코프로 확인 후 디지털 데이터로 저장하였다.

고에너지 X선에 우수한 검출특성 가진 반도체화합물을 선정하기 위하여 누설전류(Dark current), 출력전류(Output current), 상승시간(Rising time), 하강시간(Falling time), 응답지연(Response delay)에 대한 실험을 통하여 검출 특성을 분석하였으며, 선형가속기의 빔펄스(beam pulse) 신호와 검출 신호와의 일치성 여부도 조사하였다. 또한 특성 분석을 통해 선정된 반도체화합물을 이용하여 제작된 센서 성능을 검증하기 위해 재현성, 정확성, 선형성을 조사하였다.

선형가속기의 빔 펄스에 따른 검출 시편 신호와의 일치성 평가, 가속전압 6 MV 와 15 MV 에서 선량을 $400\text{ MU}/\text{min}$, 100 MU 로 고정하여 고에너지 X선을 10회 반복 조사 시 일정한 양의 선량을 확인 하는 재현성 평가, MU를 선형적으로 증가하여 고에너지를 조사 시, 시편에서 발생하는 선량이 일정한 값으로 증가하는 선형성 평가를 실시하였다.

III. RESULT AND DISCUSSION

1. 제작된 반도체화합물 센서의 고에너지 X선에 대한 검출특성 비교

제작된 4종류의 시편(PbI_2 , PbO , HgI_2 그리고 HgI_2 와 TiO_2 의 혼합물)에 대한 우수한 고에너지 X선에 대한 검출 특성 분석을 하였다.

미소전위계를 통하여 -400V 로 제작된 시편에 인가 후 Elekta 社의 Synergy 선형가속기를 사용하여 가속전압 10 MV 에 선량을 $400(\text{MU}/\text{min})$ 로 X-선을 시편에 조사 시 검출 특성들은 table 1. 에 나타내었으며, 출력전압을 figure 4. 에 나타내었다.

그림에서와 같이 출력전압의 경우 HgI_2 에 TiO_2 가 첨가된 시편에서 $4.003\text{E}+00\text{A}$ 로 가장 우수한 특성을 가진 반면, PbO 의 경우 $1.017\text{E}-01\text{A}$ 로 가장 낮은 값을 가짐을 확인 할 수 있었다.

Table 1. High energy x-ray induced response properties of the fabricated semiconductor compound sensor

시편종류 항목	에너지 (MV) : 10			
	선량을 (MU/min):400		인가전압(v):-400	
	HgI ₂	TiO ₂ mixed HgI ₂	PbO	PbI ₂
누설전류(A)	1.218E - 01	1.255E - 01	-3.481E - 02	-6.868E - 02
출력전류(A)	2.108E + 00	4.003E + 00	1.017E - 01	1.071E - 01
상승시간(10% ~ 90%, s)	1.453E - 05	1.514E - 05	9.467E - 06	1.153E - 05
하강시간(90% ~ 10%, s)	2.200E - 04	3.147E - 04	3.287 - 05	2.884E - 05
응답지연(s)	1.619E - 05	1.270E - 05	1.883E - 06	3.567E - 06

그 외에 특성 결과도 HgI₂에 TiO₂가 혼합된 시편이 비교적 우수한 검출 특성들을 가짐을 알 수 있었다.

2. TiO₂ 첨가된 HgI₂방사선 센서의 성능 평가

검출 특성의 결과를 바탕으로 선정된 HgI₂와 TiO₂ 물질로 제작된 Uni-cell type의 시편에 대해서 좀 더 정확한 검증을 하기 위하여 선형가속기에서 X선이 조사될 때 빔 펄스와 Uni-cell type 시편에서 발생하는 검출 신호와 일치성 여부를 평가 하였으며, 일정한 X선 조사시 검출 시편에서 동일한 선량 값에 대한 검출 여부를 판단하기 위한 재현성 평가를 하였다. 또한 동일한 선량을(MU/min)에 선형적으로 MU값을 증가하여 X선을 조사 시 검출신호에 대한 선형성 평가를 실시하였다.

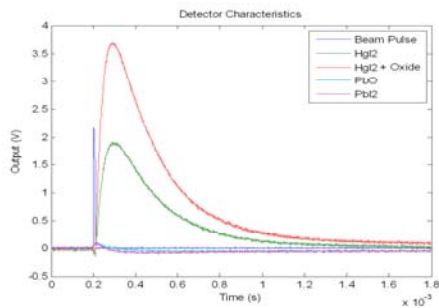


Fig. 4. The high energy x-ray induced response properties of fabricated semiconductor sensor.

선형가속기에서 X선이 조사 될 때 빔 펄스와 X선 검출시편에 대한 일치 여부를 평가하기 위하여 검출 시편에서 발생하는 검출 신호와 타겟의 입력 펄스의 일치성 여부를 측정 하였으며, 타겟의 입력 펄스에 대해서 동일한 시간에 검출시편에서 신호를 확인 할 수 있었다. 측정결과, figure 5. 에 나타난 것과 같이 X

선 검출물질이 치료방사선으로부터 받아드린 광자에 대한 반응성을 확인 하는 동시에 빔 펄스와 X선에 의한 검출시편간의 두 신호에 대한 일치성을 확인할 수 있었다. QA(Quality assurance)용의 방사선 측정 시스템에 있어서 가장 중요한 조건은 바로 재현성이라 할 수 있으며, 그 이유는 방사선 발생장치가 항상 일정한 양의 방사선을 발생하고 있는지를 알기 위해서 방사선 측정 시스템이 같은 방사선에 대하여 항상 일정한 반응을 보여야 하기 때문이다.

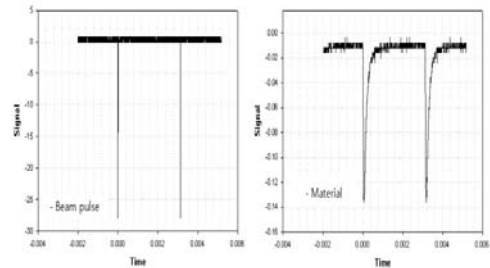


Fig. 5. The signal conformity of TiO₂ mixed HgI₂ semiconductor sensor as function of input beam pulse.

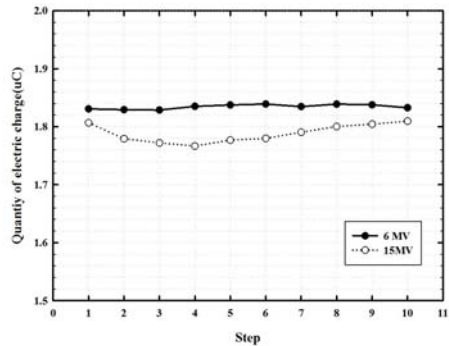


Fig. 6. The signal reproductivity of TiO₂ mixed HgI₂ semiconductor sensor at 6 MV, 15 MV.

이를 위하여 6 MV와 15 MV의 가속전압을 이용하였으며, 모든 기하학적 조건(SSD: 100 cm, 조사면 크기: $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 선량률: 400 MU/min)을 같게 하고 100 MU의 동일한 방사선을 10회 반복 조사하였다.

측정한 방사선량에 대한 검출시편의 신호의 재현성 결과는 100 MU 반복 조사 시 검출시편의 반응은 6 MV의 경우 최대선량 1.8390 μC , 최소선량 1.8287 μC 로 평균선량 1.8344 μC , 표준 편차 0.0039에 표준 오차율 0.124% 나타냈으며, 15 MV의 경우 최대선량 1.8096 μC , 최소선량 1.7664 μC 로 평균선량 1.78857 μC , 표준편차 0.0157에 표준 오차율 0.496%로 우수한 재현성이 있음을 확인 하였다. 이는 제작된 Uni-cell type의 X선 검출 물질 시편이 방사선의 일상적인 점검에 충분히 사용될 수 있음을 의미한다.

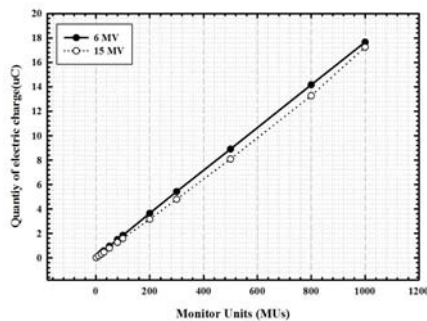


Fig. 7. The linearity of TiO_2 mixed HgI_2 semiconductor sensor at 6 MV, 15 MV.

선형가속기의 광자 에너지가 6 MV, 15 MV로 시편에 조사 시, MU(monitor unit)값을 일정한 기준으로 10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 200, 300, 500, 800, 1000 MU로 변화시켜 제작된 X선 변환 물질의 검출신호를 측정하고 동일한 400 MU/min의 선량율에서 MU를 일정하게 증가시켰을 때, 측정된 Uni-cell type 시편의 검출 신호는 figure 7. 에서 나타나듯이 우수한 선형성을 가지고 있었으며, 가속전압 6 MV의 R^2 ($R^2 = \text{SSR}/\text{SST}$)의 경우 1, 15 MV는 $R^2=0.999$ 인 것을 확인하였다.

IV. CONCLUSION

본 연구는 의료용 선형가속기의 고에너지 X선 소조사야 정도관리 및 선량검증을 위한 선량계 개발을 위

한 기초연구로서 최근 방사선 검출 물질로 연구되고 있는 4종류의 반도체화합물을 이용하여 PBS법으로 제작된 센서의 검출 특성들을 분석한 결과, HgI_2 에 TiO_2 를 혼합한 물질이 가장 우수한 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. TiO_2 가 첨가된 HgI_2 필름 센서의 선형가속기에 대한 QA 성능평가 결과, 선형가속기의 빔 펄스 파형과 검출 신호에 대해 약 0.0032s 진폭에 대한 동일한 신호를 확인 하였으며, 15 MV 가속전압을 이용하여 100 MU를 10회 조사 한 재현성 평가는 최대선량 1.8096 μC , 최소선량 1.7664 μC 로 평균선량 1.7886 μC , 표준 편차 0.0157에 표준오차율 0.496% 내외로 오차범위 내의 비교적 우수한 재현성을 나타내었다. 또한 선형성 평가 시 측정된 검출선량은 오차범위 1% 이내에 일치하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 선정된 방사선 검출 물질이 의료용 선형가속기 고에너지 X선의 정도관리를 위한 선량계로 적용 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This work was supported by International University of Korea's research fund in 2014.

Reference

- [1] Sesik Kang, Inho Go etc: *radiation therapy*; dehaeserim; 106-108; 2001
- [2] Duggan DM, Coffey CW: *Small photon field dosimetry for stereotactic radiosurgery*. Med Dosim 1998;23:153-159
- [3] Surendra N, Rustgi, Douglas M. DFrye: *Dosimetric characterization of radiosurgical beams with a diamond detector*. Med Phys 1995;22:2117-2121
- [4] Heydarian M, Hoban PW, Beddoe AK: *A comparison of dosimetry technique in stereotactic radiosurgery*, Phys MedBiol 1996;41
- [5] Angeol F. Monti, Milena Frigerio, and Giovanna Frigerio. *Visual verification of LINAC light and radiation fields coincidence*, Medcial Dosimetry, 2003, 28:91-93
- [6] D.A. Low et al., *Dosimetry tools and techniques for IMRT*, Med. Phys. 38 (2011) 1313
- [7] S.W. Kim, J.W. Shin, K.M. Oh et al., *Study on the feasibility of the HgI_2 dosimeter for quality assurance of radiotherapy*, Journal of Instrumentation, Vol. 8, 2013