

형광체 기반 X선 광 변조기를 위한 비정질 셀레늄 필름 특성

강상식¹, 박지균², 조성호³, 차병열¹, 신정욱³, 이건환⁴, 문치웅⁵, 남상희⁵

¹(재)김해시 차세대 의생명융합산업지원센터, ²(주)리시스템 R&D 센터

³인제대학교 의용공학과, 한국기계연구원, ⁴인제대학교 의료영상연구소

(Received October 27, 2006. Accepted January 29, 2007)

Characterization of the a-Se Film for Phosphor based X-ray Light Modulator

Sang-sik Kang¹, Ji-koon Park², Sung-ho Cho³, Byung-youl Cha¹, Jung-wook Shin³, Kunhwan Lee⁴, Chi-woong Mun⁵, Sang-hee Nam⁵

¹Gimhae Biomedical Industry Supporting Center, Gimhae, Korea, ²R&D Center of LISTEM, Seoul, Korea

³Department of Biomedical Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

⁴Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon, Korea

⁵Medical Imaging Research Center, Inje University, Gimhae, Korea

Abstract

PXLM(Phosphor based x-ray light modulator) has a combined structure by phosphor, photoconductor, and liquid crystal and it can realize x-ray image of high resolution in clinical diagnosis area. In this study, we fabricated a photoconductor and investigated electrical and optical properties to confirm application possibility of radiator detector of PXLM structure. As photoconductor, amorphous selenium(a-Se), which is used most in DR(Digital radiography) of direct conversion method, was used and for formation of thin film, it was formed as 20 μ m-thick by using thermal vacuum evaporation system. For a produced a-Se film, through XRD(X-ray diffraction) and SEM(Scanning electron microscope), we investigated that amorphous structure was uniformly established and through optical measurement, for visible light of 400~630 nm, it had absorption efficiency of 95 % and more. After fabricated a-Se film on the top of ITP substrate, hybrid structure was manufactured through forming Gd₂O₃:Eu phosphor of 270 μ m-thick on the bottom of the substrate. As the result to confirm electrical property of the manufactured hybrid structure, in the case of applying 10 V/ μ m, leakage current of 2.5 nA/cm² and x-ray sensitivity of 7.31 nC/cm²/mR were investigated. Finally, we manufactured PXLM structure combined with hybrid structure and liquid crystal cell of TN(Twisted nematic) mode and then, investigated T-V(Transmission vs. voltage) curve of external light source for induced x-ray energy. PXLM structure showed a similar optical response with T-V curve that common TN mode liquid crystal cell showed according to electric field increase and in applying 50~100 V, it showed linear transmission efficiency of 12~18 %. This result suggested an application possibility of PXLM structure as radiation detector.

Key words : PXLM(Phosphor based x-ray light modulator), amorphous selenium, Gd₂O₃:Eu phosphor, liquid crystal cell, radiation detector

1. 서 론

액정 기반의 디스플레이 장치는 액정 분자들이 인가전압의 증가에 따라 회전하는 정도의 차가 변하여 외부 광원의 투과, 반사 정도를 조절하기 때문에 영상을 구현할 수 있게 된다. 액정에 전압을 인가하면 액정의 배열이 변화하여 이 상태의 액정에 외부 광원을 조사하게 되면 회절이 일어나고 이런 광원의 편광 정도를

이용하여 원하는 영상을 획득하게 되는 것이다. 이런 LCD는 분해능이 수 마이크로 사이즈의 액정 셀에 의하여 결정되므로 고해상도의 영상 획득이 가능하며, 대면적 구현이 용이하다는 장점이 있다[1-2].

XLV(X-ray light valve)는 이런 액정의 고해상도 영상 구현 능력을 이용하여 진단 영역의 방사선 영상 검출기로 적용한 장치로 1997년 Sunnybrook 연구 그룹에 의하여 최초로 소개되었다[3]. 이런 XLV 구조는 입사되는 엑스선 정보를 전기적인 신호로 변환하는 엑스선 변환 층으로 광도전체를 사용하고 전기적인 신호 변화에 의하여 외부 광원의 투과, 반사 정도를 조절하는 광변조 층으로 액정이 사용되었다. 입사 엑스선의 흡수에 의해서 광도전체 층

본 연구는 산업자원부 경상남도 중점기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

Corresponding Author : 남상희

경남 김해시 어방동 인제대학교 의용공학과 방사선영상연구소

Tel : +82-55-320-3296 / Fax : +82-55-325-7931

E-mail : nsh@bme.inje.ac.kr

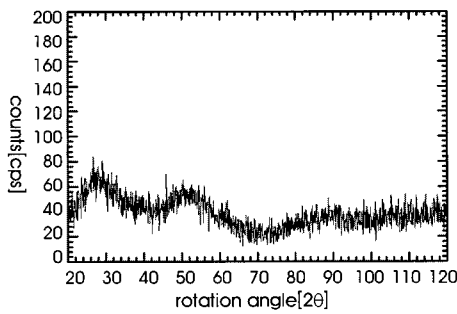


그림 1. 증착된 비정질 셀레늄 필름의 X선 회절 패턴
fig. 1. X-ray diffraction pattern of the evaporated a-Se film

내에서 발생하는 전하 캐리어를 액정 층과의 접합면으로 이동하기 위해서 액정 층의 하부와 광도전체 층의 상부에 전극을 형성하여 상부 전극에 전압을 인가한다. 광도전체 층과 액정 층의 계면에 수 집된 전하들은 액정 셀의 공간적인 전위 변화를 일으킨다. 전위 변화는 액정 분자들의 방향 변화를 야기하여 셀을 통해 전달되는 외부 광원으로부터 빛의 편광 상태(Polarization state)에 영향을 준다. 이 검출기 구조의 하부 면에 위치하는 편광자(Polarizer)는 광 편광의 변화를 광 투과의 변화로 바꾸어 준다. 결론적으로 엑스선이 흡수된 영역에서의 전위 변화는 LC 셀을 통해 투과된 빛 강도의 공간 변화를 야기하여 엑스선 영상의 광학적 표시를 만들어 낸다[3,4]. 이런 검출기 구조는 픽셀화(Pixelate) 되지 않기 때문에 액정 고유의 우수한 공간해상력(Spatial resolution)을 가진다. 즉, 밴드 갭(Band gap)이 2 eV 이상인 광도전체 화합물은 정전기 검출기로 전하들의 측면 확산(Lateral diffusion)이 거의 발생하지 않고, 얇은 LC 셀에서 신호로 야기된 전기장의 퍼짐이 거의 없다. 뿐만 아니라, 외부의 전자 회로가 요구되지 않기 때문에 노이즈가 상대적으로 작다[3-6]. 하지만 입사되는 엑스선을 흡수하기 위해서는 광도전체의 두께를 일정 두께 이상으로 형성하여야 하는 단점이 있다. XLV 구조에서 액정 층은 하부 기판 위에 형성된 광도전체 층과 상부 기판 사이에 주입하게 되는데 이때 광도전체의 두께가 증가할 때 표면 균일도의 편차가 커지게 되며 이로 인하여 위치에 따른 외부 광원의 투과, 반사 정도의 차이가 일어날 수 있다. 이는 엑스선 영상 정보의 왜곡 및 손상의 원인이 될 수 있다. 더욱이 두꺼운 광도전체 층의 형성은 광도전체 층에서 생성된 전하 캐리어를 액정 층과의 접합면으로 이동시키기 위한 고전압의 인가가 필요하다는 문제점도 있다[7].

따라서 이런 XLV 구조가 가지는 문제점을 해결하고 우수한 해상력의 방사선 검출기의 구현을 위하여 PXLM(Phosphor based x-ray light modulator)이라는 새로운 검출 구조를 소개하고자 한다. PXLM 구조는 형광체, 광도전체, 액정이 결합된 다층 구조로써 형광체 층에서 입사되는 엑스선에 의하여 가시영역의 광자를 방출하게 되고 방출된 광자는 광도전체 내에서 전하 캐리어를 발생시켜 액정 층의 전위 변화가 일어나게 한다. 일반적으로 광도전체들은 a-Se, Ge, Si, GaAs 등과 같은 반도체 물질들이 사용되기 때문에 가시영역의 에너지에 대한 전하 캐리어 생성 효율이 우수하다

[8-10]. 더욱이 PXLM 구조의 경우 광도전체가 형광체에서 방출되는 광자에 의하여 전하 캐리어를 발생시키기 때문에 엑스선 변환 층의 두께를 얇게 형성함으로써 인가전압을 낮출 수 있다[11].

본 논문에서는 광도전체의 PXLM 시스템 적용 가능성을 확인하기 위하여 구조를 분석하고 전기적, 광학적 특성을 연구하였다. 이후, PXLM 시스템을 제작하여 전기·광학적 특성을 확인함으로써 방사선 검출기로서의 적용 가능성을 확인하였다.

A. Electro-optical Characteristics of a-Se Films

PXLM 시스템 적용을 위해서 방사선 검출기에 일반적으로 사용되는 광도전체 물질인 비정질 셀레늄(Amorphous selenium, a-Se)을 이용하였으며, 광도전체의 전기적, 광학적 특성을 평가하기 위하여 샘플을 제작하였다. 샘플 제작을 위해서 2 cm × 5 cm 면적의 유기 기판 위에 ITO(Indium tin oxide)를 스퍼터링(Sputtering) 방식으로 코팅하였다. 제작된 하부 기판 위에 a-Se를 열 진공 증착 장치(Thermal vapor evaporation system)를 이용하여 20μm의 두께로 형성하였다. 준비된 시료는 Nippon 社の 99.999%의 셀레늄(Selenium)에 0.3%-wt의 비소(Arsenic)와 30 ppm의 염소(Cloline)가 첨가된 것을 사용하였다. 최종적으로 전압 인가를 위한 상부 전극으로 ITO를 코팅하였다.

제작된 a-Se의 결정화 상태 및 구조를 분석하기 위하여 Rigaku 社の XRD(X-ray diffraction) 시스템을 사용하였으며, 엑스선 소스로는 Cu Kα 방사선을 사용하였다. 그림 1은 제작된 a-Se의 XRD 분석 결과이다. 그래프에서 확인된 것과 같이 어떤 피크(peak)도 나타나지 않았으며, 이런 결과는 열 진공 증착법에 의하여 제작된 a-Se film은 비정질(Amorphous)의 상태임을 나타낸다. 비정질 상태의 셀레늄은 결정화된 셀레늄에 비하여 높은 비저항을 가지기 때문에 누설 전류가 상대적으로 낮다.

제작된 a-se film의 광학적 특성을 측정하기 위하여 Varian 社の UV-VIS-NIR Spectrophotometer를 사용하였으며, 가시영역의 200 ~ 700 nm의 범위 에너지에 대한 흡수 효율을 분석하였다. 각각의 파장에 대하여, 입사되는 광원의 강도는 실리콘(Silicon) 포토다이오드를 검출기로 사용한 newport 835 optical power meter를 사용하여 측정하였다. 그림 2는 a-Se film의 파장에 따른

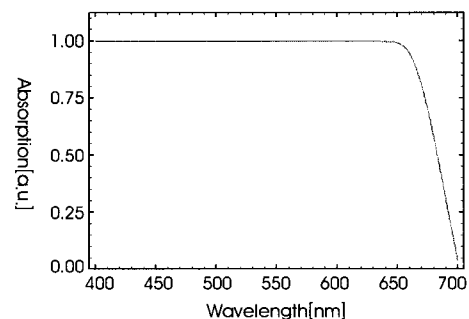


그림 2. 증착된 비정질 셀레늄 필름의 파장에 따른 빛 흡수도
fig. 2. Light absorption as a function of wavelength of the evaporated a-Se film

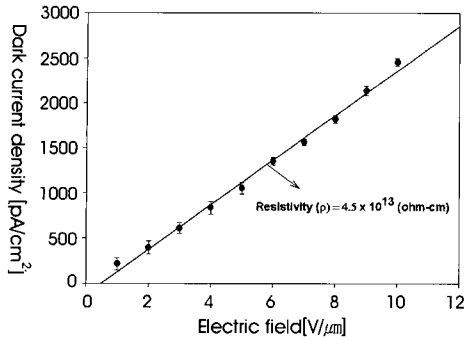


그림 3. 비정질 셀레늄의 인가 전압에 따른 누설 전류
 Fig. 3. The dark current density versus the electric field of the a-Se film

광 흡수 효율이다. 200 ~ 650 nm의 가시 영역 에너지에 대해서는 95% 정도의 흡수 효율을 보이며, 650 nm 이후에는 흡수 효율이 급격히 떨어지는 특성을 나타냈다. 이런 결과를 통해서 PXLN 구조에 사용되는 형광체는 가시 영역의 광자를 방출하는 물질을 이용하여야 함을 알 수 있다.

a-Se film의 전기적인 특성을 확인하기 위하여, 누설 전류 (Leakage current)와 엑스선 민감도(X-ray sensitivity)를 측정하였다. 암 상태(Dark state)에서 인가전압의 증가에 따른 전류 밀도 (Current density)를 측정하였으며, Keithley 社의 6517A Electrometer와 EG & G 社의 558 H power supply가 측정을 위하여 사용되었다. 그림 3은 인가전압의 증가에 따른 누설 전류 측정 결과이며, 누설 전류는 인가전압의 증가에 따라 선형적으로 증가하며, 최종적으로 10 V/μm의 전압 인가 시 2.5 nA/cm²의 결과를 나타냈다. 일반적으로 방사선 검출기에서는 누설 전류 특성이 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR)에 직접적인 영향을 미치고 선형적인 응답 특성을 나타내기 때문에 낮은 누설 전류를 가지는 검출기가 우수한 성능을 나타내는 것으로 보고되고 있다. 그 결과, 광도전체를 이용한 방사선 검출기는 10 pA/mm² 이하의 누설 전류를 가져야 하는데 본 논문에서 제작된 a-Se film은 이런 조건을 충분히 만족시킨다.

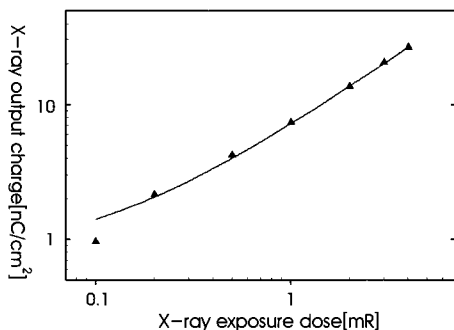


그림 5. 선량에 따른 Gd₂O₃:Eu/a-Se의 X선 생성 전하량
 Fig. 5. The x-ray output charge of the Gd₂O₃:Eu/a-Se versus the exposure dose

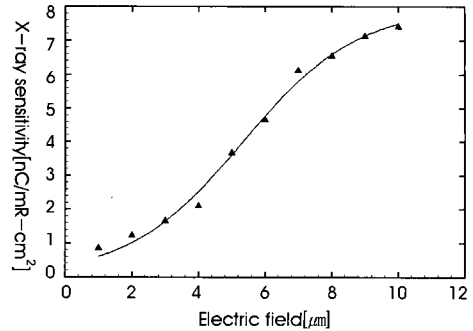


그림 4. 인가전압에 따른 Gd₂O₃:Eu(270μm)/a-Se(20μm)의 X선 민감도
 Fig. 4. The x-ray sensitivity of the Gd₂O₃:Eu(270 μm)/a-Se(20 μm) versus the electric field

PXLN 구조의 형광체로는 Gd₂O₃:Eu가 사용되었으며 입사되는 엑스선 에너지를 충분히 흡수하기 위하여 270 μm의 두께로 제작되었다. 형광체는 상부 a-Se film이 있는 ITO 기판의 하부에 Screen printing 방식에 의하여 형성되었다. 하이브리드 구조의 엑스선 민감도의 분석은 I-V 측정을 통하여 이루어졌으며, 엑스선 발생 장치로는 Shimadzu 社의 TR-500-125가 사용되었다. 입사된 엑스선에 따른 전압 변화를 Lecroy 社의 Oscilloscope로 측정하였으며, 측정된 결과를 AcqKnowledge 3.0을 이용하여 적분함으로써 생성된 전하 캐리어량을 확인하였다. 입사되는 방사선 선량을 측정하기 위한 장비로는 Radical 社의 2060 ion chamber가 사용되었다.

그림 4는 Gd₂O₃:Eu/a-Se 하이브리드 구조의 인가전압 변화에 따른 엑스선 민감도 측정 결과이며, 측정을 위해서 70 kVp, 100 mA, 0.03 s의 조건으로 엑스선을 입사하였다. 측정 결과를 통해서 하이브리드 구조에서 10 V/μm의 전압 인가 시 전하 생성량은 7.31 nC/mR/cm²으로 나타났다. 그림 5는 입사되는 엑스선 에너지의 증가에 따른 엑스선 민감도를 보여주고 있으며, 선량의 증가에 따라 생성되는 전하량도 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

B. Characteristics of a-Se coupled LC Cell

입사되는 엑스선에 의하여 Gd₂O₃:Eu/a-Se 하이브리드 구조에

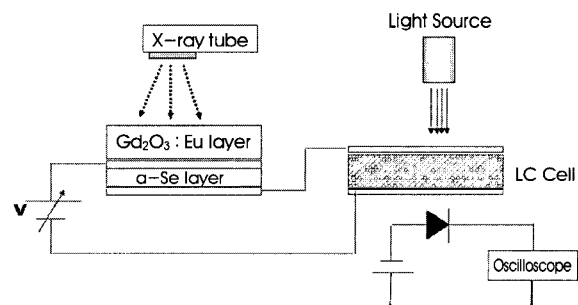


그림 6. PXLN 시스템의 전기-광학적 측정을 위한 모식도
 Fig. 6. The experimental set-up for the electro-optical measurements of PXLN system

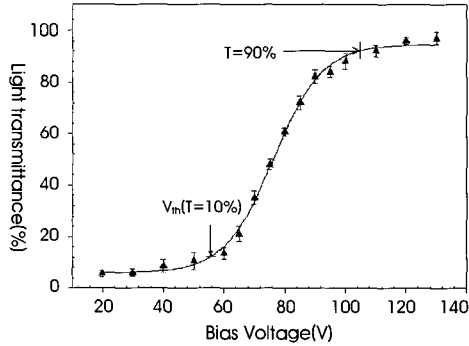


그림 7. 인가 전압에 따른 $Gd_2O_3:Eu/a-Se$ 과 결합된 액정 셀의 T-V 곡선
 Fig. 7. The T-V curve of $Gd_2O_3:Eu/a-Se$ coupled LC cell versus bias voltage

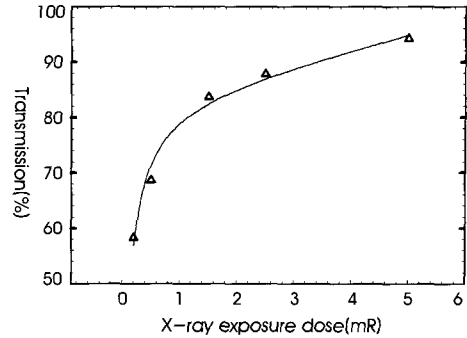


그림 8. 선량에 따른 $Gd_2O_3:Eu/a-Se$ 과 결합된 액정 셀의 T-V 곡선
 Fig. 8. The T-V curve of $Gd_2O_3:Eu/a-Se$ coupled LC cell versus exposure dose

서 생성되는 전하 생성량에 따른 액정의 광학적 특성 변화를 관측함으로써 PXLM 구조의 방사선 검출기로서의 적용 가능성을 확인하였다. 광학적 특성 분석을 위한 측정 모식도는 그림 6과 같다. 광학적 특성 분석을 위하여 사용된 장비는 하이브리드 구조의 전기적 특성 분석 시 사용된 장비와 동일하다. 하이브리드 구조에 엑스선 조사 시 전하 캐리어가 생성되며, 생성된 전하 캐리어는 전체 검출기의 전압 분배를 조절함으로써 액정의 전위 변화를 일으킨다. 액정에 걸리는 전위 변화는 외부 광원의 투과 효율을 조절하게 되며, 이는 실리콘 포토다이오드를 이용하여 측정되었다. 그림 7은 전체 검출기 구조에 인가되는 전압 증가에 따른 액정의 투과 효율 변화를 측정된 결과이다. 제작된 PXLM 구조의 투과 효율 변화는 일반적인 액정의 T-V 특성과 유사한 형태를 나타내고 있으며 60 ~ 100 V의 전압 변화 시 12 ~ 80 %의 선형적인 투과 효율 변화를 나타낸다. 방사선 검출기는 입사되는 엑스선 에너지의 증가에 따라 선형적인 응답 특성을 나타내야 하며, 따라서 본 논문에서 제작된 PXLM 구조는 선형적인 응답 특성 구간의 문턱치(Threshold) 전압인 60 V를 구동전압으로 결정하였다. 그림 8은 제작된 PXLM 구조에 조사되는 선량의 증가에 따른 투과 효율 변화를 측정된 결과이다. 액정의 광 투과 효율은 0.5 ~ 2.5 mR의 엑스선 조사 범위에서 68.6 ~ 87.8 %의 투과 효율 변화를 가진다. 이런 결과는 PXLM 시스템이 낮은 선량의 엑스선 에너지에서 방사선 검출기로 적용될 수 있음을 나타낸다.

II. 결 론

PXLM 시스템은 외부 광원의 투과 효율 변화에 따라 영상 정보를 획득하므로 엑스선 변환 효율에 따른 영상 정보의 손실을 막을 수 있을 뿐만 아니라 외부 광원의 강도 증가에 따라 영상 신호 증폭이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 더욱이 정전기적인 검출 구조를 갖기 때문에 고해상도의 영상 구현이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 PXLM 시스템의 방사선 검출기 적용 가능성을 확인하였다. 이를 위하여 $Gd_2O_3:Eu/a-Se$ 하이브리드 구조의 전기적 특성을 측정하였고, 하이브리드 구조와 액정이 결합된 시스템의 광학적 특성을 분석하였다. 그 결과, PXLM 시스템은 저 선

량의 엑스선 에너지에 대하여 방사선 검출기의 가능성이 우수함을 입증할 수 있었다. 차후, 하이브리드 구조와 액정이 직접적으로 연결된 PXLM 시스템을 제작하여 영상을 획득함으로써 진단의 의료 영상 장치로서의 적용 가능성을 확인하는 실험을 수행할 것이며, 더 넓은 범위의 엑스선 에너지 변화에 따른 특성 분석이 필요하다.

참고문헌

- [1] I.C. Khoo, "Orientation photorefractive effects in nematic liquid crystal films," *IEEE J. Quant. Elec.* 32, pp. 525-534, 1996.
- [2] B. Bahadur, "Liquid crystals. applications and uses," *World Scientific*, vol. 1, pp. 239-240, 1990.
- [3] Rieppo PK and Rowlands JA, "X-ray imaging with amorphous selenium: theoretical feasibility of the liquid crystal light valve for radiography," *Med. Phys.*, vol.124, no.8, pp.1279-1291, 1997.
- [4] SHEN Da-ke and HAN Gao-rong, "ZnS0.8Se0.2 film for high resolution liquid crystal light valve," *J. Zhejiang Univ. SCI.*, vol.5, pp. 212-217, 2004.
- [5] Armitage, D., Thackara, J.I., Eades and W.D., "Photoaddressed liquid crystal spatial light modulators," *Appl. Opt.*, vol.28, no.22, pp. 2763-4771, 1989.
- [6] Aubourg, P., Huignard, J.P., Hareng, M., Mullen, R.A., "Liquid crystal light valve using bulk monocrystalline Bi12SiO20 as the photoconductive material," *Appl. Opt.*, vol.21, no.20, pp. 3706-3712, 1982.
- [7] S.O. Kasap and J.A. Rowlands, "Direct conversion flat-panel X-ray image detectors," *Circuits Devices Syst.*, vol. 149, pp.85-96, 2002.
- [8] Martin Hoheisel, "Requirements on amorphous semiconductors for medical X-ray detectors," *Non-Crystalline Solids*, 266-269, pp.1152-1157, 2000.
- [9] J.P. Ponpon, "Semiconductor detectors for 2DX-ray imaging," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol.551, pp.15-16, 2005.
- [10] N. F. Mott and E. A. Davis, *Electronic Processes in Noncrystalline Materials*, 1979, pp.531.
- [11] D CAVOURAS, "An experimental method to determine the effective luminescence efficiency of scintillator-photodetector combinations used in X-ray medical imaging systems," *The British Journal of Radiology*, vol.71, pp.766, 1998.