

# Radiation Resistance Evaluation of Thin Film Transistors

Seung Ik Jun\*, Bong Goo Lee

duoPIX-ray Inc. (Previously, Biosenstech Inc.)

Received: August 16, 2023. Revised: August 30, 2023. Accepted: August 31, 2023.

## ABSTRACT

The important requirement of industrial dynamic X-ray detector operating under high tube voltage up to 450 kVp for 24 hours and 7 days is to obtain significantly high radiation resistance. This study presents the radiation resistance characteristics of various thin film transistors (TFTs) with a-Si, poly-Si and IGZO semiconducting layers. IGZO TFT offering dozens of times higher field effect mobility than a-Si TFT was processed with highly hydrogenated plasma in between IGZO semiconducting layer and inter-layered dielectric. The hydrogenated IGZO TFT showed most sustainable radiation resistance up to 10,000Gy accumulated, thus, concluded that it is a sole switching device in X-ray imaging sensor offering dynamic X-ray imaging at high frame rate under extremely severe radiation environment such as automated X-ray inspection.

Keywords: Dynamic X-ray Detector, Thin Film Transistor, Radiation Resistance, Non-destructive Testing

## I. INTRODUCTION

엑스레이 디텍터는 2010년도 이후 기존 의료용 영상진단 외에도 산업용 검사 영역인 다이-캐스팅, 구조물, 배터리, 반도체, 전장부품 등에 대한 불량 검사용으로 그 적용 영역을 빠르게 넓혀가고 있다. 특히 자동화 엑스레이 검사를 위한 동영상 엑스레이 디텍터는 다양한 검사 대상체에 대한 불량을 빠르고 정확하게 실시간으로 검사하여 제품의 안전과 신뢰성 확보에 크게 기여하고 있다<sup>[1]</sup>.

산업용 엑스레이 검사는 의료용 엑스레이 진단에 일반적으로 사용되는 최대 100 kVp 보다 상대적으로 높은 최대 450 kVp 관전압에서 종일 가동되는 실시간 검사 환경이기 때문에 이에 적용되는 엑스레이 영상센서와 디텍터 역시 높은 방사선 내구성을 확보해야 한다. 특히 방사선이 직접 전면에 조사되는 영상영역의 소자, 즉 엑스레이 영상센서의 픽셀 내 박막트랜지스터(Thin Film Transistor, TFT)의 방사선 내구성 확보는 산업용 엑스레이 검

사 환경에서 매우 중요한 요구 조건이다.

TFT는 평판형 표시장치(Flat Panel Display) 뿐만 아니라 엑스레이 디텍터의 영상센서 소자로 널리 사용되고 있다<sup>[2,3]</sup>.

Table 1은 비정질실리콘 박막트랜지스터(Amorphous Silicon TFT, a-Si TFT), In-Ga-Zn-O 박막트랜지스터(IGZO TFT), 다결정실리콘 박막트랜지스터(Polycrystalline Silicon TFT, Poly-Si TFT)의 전계효과 이동도(Field Effect Mobility)와 적용되는 엑스레이 디텍터의 영상센서를 설명한 것이다. a-Si TFT는 1985년부터 오랜 기간 정지영상용 엑스레이 영상센서로 널리 사용되어 왔다<sup>[4]</sup>. 하지만 낮은 전계효과 이동도로 인해 최근 자동화 엑스레이 검사 영역에서 사용되는 빠른 프레임의 동영상 엑스레이 디텍터에 적용하는 데에는 분명한 한계가 있다<sup>[5]</sup>.

IGZO TFT는 a-Si TFT에 비해 수십 배 높은 전계효과 이동도와 On/Off 전류비를 갖고 있어 최근 동영상 엑스레이 영상센서의 고속 스위칭 소자로 그 사용 범위가 확대되고 있다<sup>[6]</sup>. 하지만 우수한 고속

\* Corresponding Author: Seung Ik Jun

E-mail: daniel.jun@duopixray.com

Tel: +82-31-229-3370

구동 소자임에도 방사선 내구성이 매우 취약해 산업용 영상센서 적용에 어려움을 겪고 있어 내구성을 저하시키는 인자와 이를 해결할 수 있는 설계와 공정 기술 개발이 필요하다.

Poly-Si TFT는 PECVD 또는 LPCVD로 진공 증착된 비정질실리콘을 엑시머 레이저 어닐링 (Excimer Laser Annealing, ELA) 등의 방법으로 결정화된 다결정실리콘을 반도체 층으로 적용한 것으로 높은 전계효과 이동도와 On/Off 전류비를 가짐에도 높은 제조 단가와 낮은 수율, 그리고 낮은 방사선 내구성으로 인해 현재까지 엑스레이 영상센서로 적용되지는 못하고 있다<sup>[5]</sup>.

Table 1. Comparison of various thin film transistors using for X-ray detectors

Switching TFT	Mobility (cm <sup>2</sup> /Vsec)	On/Off Current Ratio	Applications in X-ray Imaging
a-Si TFT	< 1	10 <sup>8</sup>	Static
IGZO TFT	20 ~ 50	10 <sup>9</sup>	Dynamic, Static
Poly-Si TFT	30 ~ 50	10 <sup>10</sup>	Not Applicable

본 연구는 엑스레이 디텍터의 영상센서에서 사용되는 다양한 박막트랜지스터에 대한 방사선 내구성을 평가하여 높은 방사선 내구성이 요구되는 산업용 엑스레이 디텍터에 적절한 소자 적용 가능성을 제시한다.

## II. MATERIAL AND METHODS

엑스레이 디텍터 영상센서의 스위칭 소자로 적용되는 다양한 박막트랜지스터의 방사선 내구성을 평가하기 위하여 한국원자력연구원의 방사선 발생 및 평가 설비를 이용하였으며, 핵종은 Co-60, 허가 용량과 최소선량율은 각각 3 kCi와 2.3 Gy/hr이었으며 건식의 Pencil Type으로 조사시료대 크기는 2 m 지름에 0.38 m 높이를 갖고 있다. 평가에 사용된 설비는 Fig. 1과 같다.

Table 2는 방사선 소스로부터의 거리에 따른 시간당 누적 선량을 선량계를 통해 얻은 값으로 대상 박막트랜지스터 시편은 방사선 소스로부터 112 cm 위

치에서 누적선량 100 Gy로부터 10,000 Gy까지 조사해 전후 시편의 전기적 특성 변화를 분석하였다.

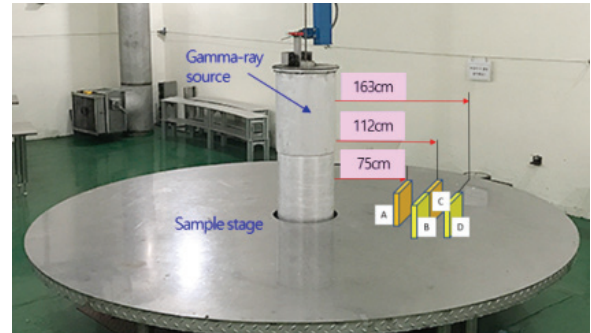


Fig. 1. Photography of testing table for radiation damages on various TFTs with Co-60 radiation source.

Table 2. Hourly radiation rates according to the distance from radiation source

Source to sample distance	Hourly radiation dose
163 cm	7.5 Gy/hr
112 cm	15 Gy/hr
75 cm	30 Gy/hr

Table 3은 엑스레이 영상센서에서 사용 중인 다양한 박막트랜지스터 소자 샘플을 준비하기 위한 소자의 형태와 공정 조건을 설명한 것이다. 우선 가장 기본적인 a-Si TFT는 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 방법에 의해 반도체 층이 형성되었으며, Poly-Si TFT는 PECVD로 증착된 비정질실리콘을 ELA (Excimer Laser Annealing) 방법에 의해 결정화된 실리콘 반도체 층을 형성하였다.

IGZO TFT는 PVD (Physical Vapor Deposition, Sputtering)에 의해 IGZO 반도체 층을 형성하였으며, 반도체 층과 층간절연막 (Inter-dielectric)의 계면 특성에 따른 방사선 내구성을 확인하기 위해 소스-드레인 전극 형성 후, 즉 실리콘 질화막 증착 직전 수소화 처리 유무에 따른 전기적 특성을 확인하였다.

IGZO 반도체 층의 채널에 수소화 처리는 그 전기적 특성을 개선하고 외부로부터의 온도나 전기적 변화에 따른 내구성 개선에 영향을 준다는 이전 연구들이 보고되고 있다<sup>[7,8]</sup>.

Table 3. Sample preparation of various thin film transistors for the comparison of radiation resistance

No	Type	Process condition of semiconductor layer
1	a-Si TFT	PECVD a-Si
2	Poly-Si TFT, n-type	Poly-crystallized silicon by ELA then n-type doped, PH <sub>3</sub>
3	Poly-Si TFT, p-type	Poly-crystallized silicon by ELA then p-type doped, B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
4	IGZO TFT, non-hydrogenated	Non-hydrogenated onto In-Ga-Zn-O film
5	IGZO TFT, hydrogenated	Highly hydrogenated onto In-Ga-Zn-O film

Fig. 2는 IGZO 반도체 층상에 층간절연막을 형성할 때 수소화 처리를 진행하는 영역을 도식한 것으로 높은 수소화를 진행한 공정과 수소화 과정 없이 진행한 두 조건의 시료를 각각 준비해 IGZO TFT의 방사선 내구성을 평가하였다.

IGZO TFT의 수소화 조건별 방사선 내구성을 평가한 이유는 IGZO 반도체는 전자 이동을 주요 전도 매개로 이용하는 a-Si 반도체와는 달리, 전자뿐만 아니라 산소정공(Oxygen Vacancy) 또한 전도 매개로 작용하여, IGZO 반도체의 채널영역과 층간절연막간 계면 특성의 영향을 크게 받게 된다<sup>[9]</sup>. 그 계면 특성은 IGZO 반도체 상부에 층간절연막 증착시 필연적으로 유입되는 수소의 농도에 따라 그 전기적 특성은 물론이고 방사선 내구성 등에 영향을 주게 된다. 즉, 수소 플라즈마 또는 수소 분위기의 열처리 공정은 IGZO 반도체 층과 절연막 사이의 계면에 존재하는 산소 정공을 수소로 채움으로써 박막트랜지스터의 전기적 특성에 영향을 준다<sup>[10]</sup>.

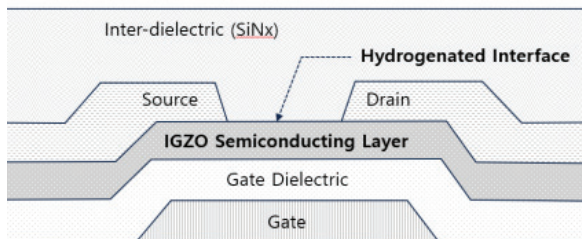


Fig. 2. Cross-sectional view of IGZO thin film transistor showing hydrogenated interface between IGZO semiconducting layer and inter-dielectric SiNx.

Fig. 3은 박막트랜지스터의 전압-전류 특성을 측정하기 위한 테스트 패턴에 대한 디자인이다. 각각 테스트 패턴은 500개의 박막트랜지스터로 구성되어 있으며 이후 단위 박막트랜지스터의 전기적 특성을 얻기 위해 얻어진 전압에 따른 전류 값은 500으로 나누어진 값으로 전류-전압 그래프에 도시하였다.

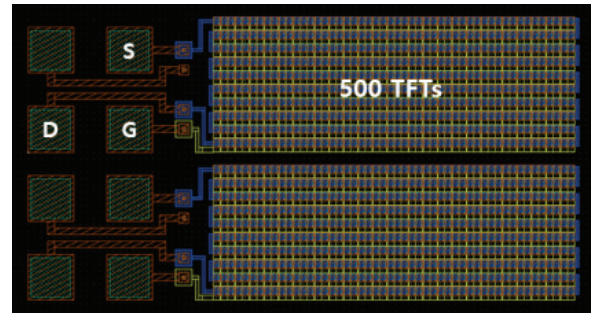


Fig. 3. TFT test patterns with 500 of thin film transistors connected serially to measure voltage-current characteristics (S: source, D: drain, G: gate).

박막트랜지스터의 전압-전류 특성 값을 측정하기 위하여 휴렛패커트사의 HP4145A Semiconductor Parameter Analyzer를 사용하였으며, 게이트 전압은 -15 V에서 +20 V까지 1.0 V 단위로 측정하였으며, 전압간 측정 시간 간격은 0.5 초로 동일하게 정의하였다.

### III. RESULT

정지영상 엑스레이 영상센서의 스위칭 소자로 가장 오랜 기간 동안 널리 사용되어 온 a-Si TFT에 대해 10,000 Gy의 방사선 조사 전과 후의 게이트 전압과 드레인 전류 그래프를 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 a-Si TFT의 10,000 Gy 방사선 조사 전후의 전기적 특성은 변하지 않았으며 이를 통해 우수한 방사선 내구성을 확인할 수 있었다.

하지만 a-Si TFT의 전계효과 이동도는 1.0 cm<sup>2</sup>/Vsec 미만으로 최근 자동차 엑스레이 검사나 의료용 CT향의 고속 동영상 프레임이 필요한 동영상 엑스레이 영상센서의 구동 소자로 적합하지 않고 오직 정지영상 엑스레이 디텍터에만 유효한 스위칭 소자라 우수한 방사선 내구성을 갖고 있음에

도 동영상 엑스레이 영상 구현에는 분명한 한계가 있다.

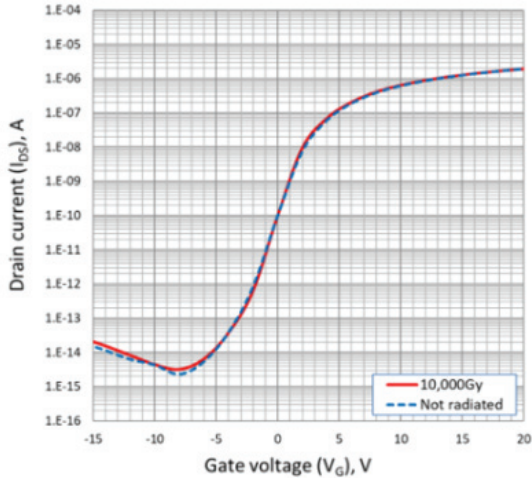


Fig. 4. Gate voltage and drain current characteristics of amorphous silicon thin film transistor (a-Si TFT) after 10,000 Gy radiation.

Fig. 5는 전자가 주요 전도 매개체인 n-type poly-Si TFT에 대해 1,000 Gy 누적선량 조사 전과 후에 측정된 게이트 전압에 따른 드레인 전류 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 단지 1,000 Gy 조사 후임에도 문턱전압이 약 5 V 이상의 전기적 특성 변화가 관찰되었다.

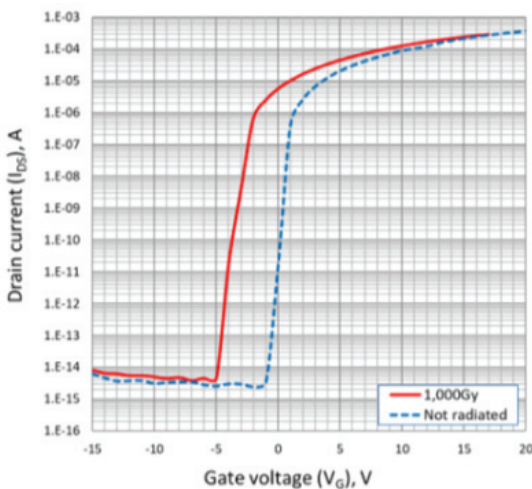


Fig. 5. Gate voltage and drain current characteristics of n-type low temperature n-type polycrystalline silicon thin film transistor (n-type LTPS TFT) after 1,000 Gy radiation.

Fig. 6은 정공이 주요 전도 매개체인 p-type poly-Si TFT에 대해 1,000 Gy 누적선량 조사 전후 측정된 게이트 전압에 따른 드레인 전류 그래프이다. 위의 n-type poly-Si TFT와 마찬가지로 단지 1,000 Gy 조사 후임에도 그 전기적 특성은 크게 변화하였으며, 문턱전압 뿐만 아니라 On-state current가 낮아지고 Off-current는 크게 증가하였다.

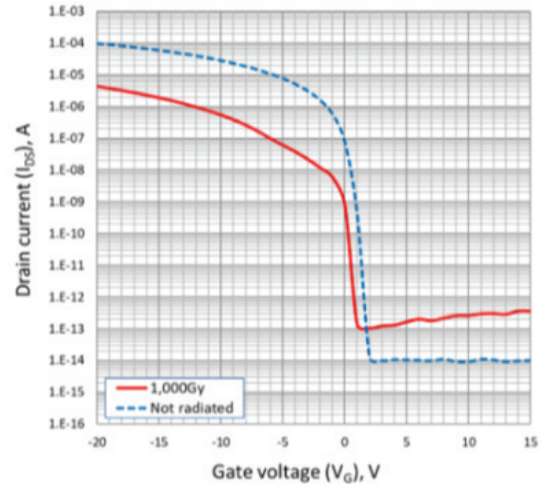


Fig. 6. Gate voltage and drain current characteristics of p-type low temperature polycrystalline silicon thin film transistor (p-type LTPS TFT) after 1,000 Gy radiation.

Fig. 7은 전자가 주요 전도 매개체이지만 산소 정공 (Oxygen Vacancy) 역시 소수의 전도 매개체인 IGZO TFT에 대해 100 Gy 누적선량 조사 전후 측정된 게이트 전압에 따른 드레인 전류 그래프이다. 일반적인 산업용 엑스레이 디텍터의 내구 누적선량 요구 조건인 10,000 Gy에 비해 크게 못 미치는 단지 100 Gy의 누적선량임에도 IGZO TFT의 전기적 특성은 문턱전압은 물론 On-state current와 Off-state current 역시 크게 저하됨을 확인하였다.

Fig. 8은 IGZO TFT 소자 제작시 In-Ga-Zn-O 박막을 PVD 증착법으로 형성하고 이후 소스-드레인 전극을 형성한 이후 수소 플라즈마를 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)를 이용, 수소화 처리를 진행한 이후 실리콘 질화막을 형성한 IGZO TFT의 누적선량에 따른 전기적 특성을 측정하는 것이다. 누적 선량은 10,000 Gy까지 매 1,000 Gy 단위로 조사하여 IGZO TFT의 전기적 특성을 측정하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 수소화 처리된 IGZO TFT의 전기적 특성은 약간의 문턱전압의 변

화를 보일뿐 On-state current와 off-state current 등의 전기적 특성 변화는 관찰되지 않았다. 엑스레이 디텍터는 통상 Off Voltage -10 V ~ -5 V와 On Voltage +15 V ~ +20 V 영역에서 구동하므로 약 1.5 V의 문턱전압 변화는 엑스레이 디텍터의 구동 성능에 전혀 영향을 미치지 않으므로 수소화된 IGZO TFT는 엑스레이 디텍터가 요구하는 10,000 Gy 방사선 내구성을 확보할 수 있다는 결론을 도출하였다.

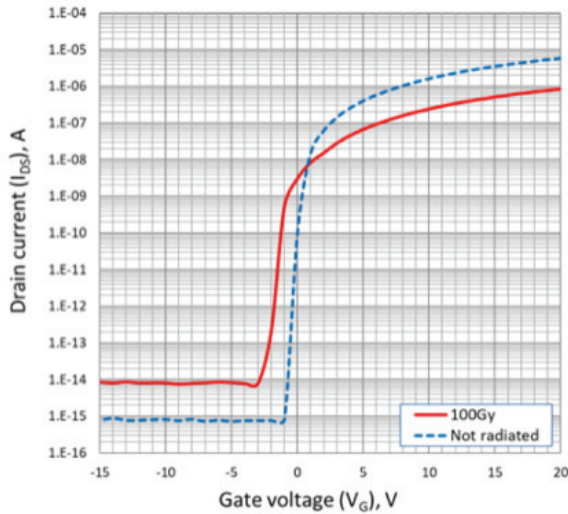


Fig. 7. Gate voltage and drain current characteristics of conventional In-Ga-Zn-Ox thin film transistor (IGZO TFT without hydrogenation on IGZO film) after 100 Gy radiation.

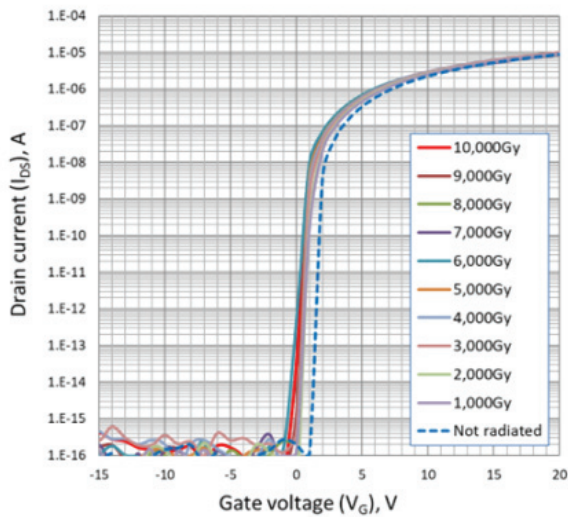


Fig. 8. Gate voltage and drain current characteristics of hydrogenated In-Ga-Zn-Ox thin film transistor (IGZO TFT with highly hydrogenated on IGZO film) after 10,000 Gy radiation.

#### IV. DISCUSSION

아래 Table 4와 같이 a-Si TFT, n-type poly-Si TFT, p-type poly-Si TFT, IGZO TFT 등 다양한 반도체 전도층 소재를 갖는 박막트랜지스터에 대한 누적선량에 따른 방사선 내구성을 확인하면서 각 소재의 전도 매개체, 즉 전자, 정공 등에 따른 방사선 내구성 특성과 그 수준을 확인할 수 있었다.

전자에 의한 전도가 주요 매개체인 a-Si TFT는 누적선량 10,000 Gy까지 그 전기적 특성의 변화는 관찰되지 않았으며, 전자가 주요 전도 매개체이지만 반도체 층의 결정 구조간 결정립계 등의 결함을 갖고 있는 n-type poly-Si TFT의 경우 1,000 Gy 누적선량에서 약 5 V 수준의 문턱전압 변화가 관찰되었다. 정공이 주요 전도 매개체이자 역시 결정립계를 포함한 p-type poly-Si TFT는 1,000 Gy 누적선량에서 문턱전압의 변화는 물론, On-state current와 Off-state current 등 모든 전기적 특성의 저하가 관찰되었다.

Table 4. Summary table of radiation resistance testing for various thin film transistors

No	Type	Semiconductor layer	Voltage-current measurements
1	a-Si TFT	Amorphous silicon	No changes up to 10,000 Gy
2	Poly-Si TFT, n-type	Polycrystalline silicon	Threshold voltage shifted even after 1,000 Gy
3	Poly-Si TFT, p-type	Polycrystalline silicon	Threshold voltage, on-state current and off-state current changed even after 1,000 Gy
4	IGZO TFT (Conventional)	Amorphous In-Ga-Zn-O	Threshold voltage, on-state current and off-state current changed even after 100 Gy
5	IGZO TFT (Hydrogenated)	Amorphous In-Ga-Zn-O	No changes in on-state current and off-state current up to 10,000 Gy. Threshold voltage slightly shifted. (acceptable to be used for X-ray detector)

각각 전자 또는 정공이 전도의 주요 매개체이자 결정 구조간 결함인 결정립계를 포함한 n-type과 p-type poly-Si TFT는 방사선 전후 전기적 특성 변화를 나타냈으며, 이는 결정립계에 의한 준 안정화 상태의 전자 또는 정공이 방사선에 의해 여기 되어

누설전류 등의 전기적 특성 변화를 발생하는 것으로 판단된다. 이전 연구 결과에서는 IGZO TFT와 n-type poly-Si TFT의 방사선 내구성을 2,000 Gy까지 평가하였으며, 이에 대한 반도체 층의 물성 차이에 따른 구체적인 고찰은 제시하지 않았다<sup>[5]</sup>.

## V. CONCLUSION

본 연구는 서로 다른 반도체 층을 갖는 다양한 박막트랜지스터의 방사선 내구성을 평가하였다.

그중에서 고속 프레임의 동영상 엑스레이 영상센서로 적용이 가능한 In-Ga-Zn-O 반도체 층의 산소 정공의 결함을 최소화하기 위한 표면 수소화 공정이 적용된 IGZO TFT 만이 누적선량 10,000 Gy까지 엑스레이 디텍터 적용으로 수용 가능한 1.0 V 수준의 문턱전압 변화만 보여주고 다른 전기적 특성의 변화가 없는 높은 방사선 내구성을 보여 주었다.

박막트랜지스터의 방사선 내구성에 영향을 미치는 인자는 반도체 층의 정공 유무, 결정립계 등 전기 전도에 미치는 반도체 층의 내부의 결함과 관련이 있을 것으로 고찰되어 향후 추가적인 연구를 통해 전자-홀 특성 관찰법 (Hall Measurement) 등을 이용한 각 결함의 유형에 따른 방사선 내구성을 정량적으로 평가할 예정이다.

## Acknowledgement

본 연구는 대전테크노파크가 주관하는 2023년도 뿌리산업 활성화 지원 사업을 통해 진행되었으며, 높은 관전압에서 연속적인 동영상 검사를 위해 영상센서의 방사선 내구성을 확보하여 자동화 엑스레이 검사 신뢰성 확보에 기여함을 목적으로 한다.

## Reference

- [1] S. U. Ryu, "Current status and prospect of non-destructive testing technology", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 56, No. 4, pp. 37-40, 2016.
- [2] S. I. Jun, P. D. Rack, "Direct-current substrate bias effects on amorphous silicon sputter-deposited films for thin film transistor fabrication", Applied Physics Letters, Vol. 87, No. 13, pp. 87-89, 2005. <https://doi.org/10.1063/1.2061860>
- [3] J. W. Park, S. Kwon, S. I. Jun, T. E. Mcknight, A. V. Melechko, M. L. Simpson, M. Dhindsa, J. Heikenfeld, P. D. Rack, "Active-Matrix Microelectrode Arrays Integrated With Vertically Aligned Carbon Nanofibers", IEEE Electron Device Letters, Vol. 30, No. 3, pp. 254-257, 2009. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2011927>
- [4] A. Nathan, B. Park, A. Sazonov, S. Tao, I. Chan, P. Servati, K. Karim, T. Charania, "Amorphous silicon detector and thin film transistor technology for large-area imaging of X-rays", Microelectronics Journal, 31, 883-891, 2000.
- [5] S. Park, M. K. Song, T. H. Sung, J. Y. Kwon, "Effect of X-ray irradiation on a-IGZO and LTPS thin-film transistors for radiography applications", Applied Surface Science, Vol. 550, 149237, 2021.
- [6] S. I. Jun, B. G. Lee, "Evaluation of Dynamic X-ray Imaging Sensor and Detector Composing of Multiple In-Ga-Zn-O Thin Film Transistors in a Pixel", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 17, No. 3, pp. 359-365, 2023. <https://doi.org/10.7742/jksr.2023.17.3.359>
- [7] A. Abliz, "Hydrogenation of Mg-Doped InGaZnO Thin-Film Transistors for Enhanced Electrical Performance and Stability", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 68, No. 7, pp. 3379-3383, 2021. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3077214>
- [8] S. I. Oh, G. Choi, H. S. Hwang, W. Lu, J. H. Jang, "Hydrogenated IGZO Thin-Film Transistors Using High-Pressure Hydrogen Annealing", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 60, No. 8, pp. 2537-2541, 2013. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2265326>
- [9] A. Meux, A. Bhoolokam, G. Pourtois, J. Genoe, Heremans, "Oxygen vacancies effects in a-IGZO: Formation mechanisms, hysteresis, and negative bias stress effects", Physica Status Solidi; Applications and Materials Science, Vol. 214, 6, 2017
- [10] S. I. Oh; G. Choi; H. Hwang; W. Lu; J. H. Jang, "Hydrogenated IGZO Thin-Film Transistors Using High-Pressure Hydrogen Annealing", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 60, 8, pp. 2537, 2013

## 박막트랜지스터의 방사선 내구성 평가

전승익\*, 이봉구

주식회사 듀오픽스레이 (前 주식회사 바이오센스텍)

### 요 약

24시간/7일 동안 높은 관전압 하에서 높은 프레임 속도로 검사 대상체의 불량을 검사하는 산업용 동영상 엑스레이 디텍터의 중요한 요구사항은 높은 방사선 내구성을 확보하는 것이다. 본 연구는 비정질 실리콘 (a-Si), 다결정 실리콘 (Poly-Si), In-Ga-Zn-O 산화물 (IGZO) 등의 반도체 층을 갖는 다양한 박막트랜지스터를 제작하여 각각의 방사선 내구성을 확인하였다. a-Si TFT 대비 수십 배 높은 전계효과 이동도로 고속 동영상 구현이 가능한 IGZO TFT의 경우, IGZO 반도체 층과 층간절연막 사이에 수소화 처리를 진행할 경우 산업용 요구사항인 10,000 Gy 누선선량까지 엑스레이 영상센서로 적용 가능한 수준 이상으로 전기적 특성의 변화가 없음을 확인하였다. 따라서 수소화한 IGZO TFT는 방사선 내구성을 확보함과 동시에 높은 전계효과 이동도로 동영상 디텍터의 영상센서에 적용 가능한 유일한 소자임을 확인하였다.

중심단어: 동영상 엑스레이 디텍터, 박막트랜지스터, 방사선 내구성, 비파괴 검사

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자) (교신저자)	전승익	주식회사 듀오픽스레이	대표이사/공학박사
(공동저자)	이봉구	주식회사 듀오픽스레이	전무/연구소장