

# Evaluation of Dynamic X-ray Imaging Sensor and Detector Composing of Multiple In-Ga-Zn-O Thin Film Transistors in a Pixel

Seung Ik Jun\*, Bong Goo Lee

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

Received: June 05, 2023. Revised: June 28, 2023. Accepted: June 30, 2023.

## ABSTRACT

In order to satisfy the requirements of dynamic X-ray imaging with high frame rate and low image lag, minimizing parasitic capacitance in photodiode and overlapped electrodes in pixels is critically required. This study presents duoPIX™ dynamic X-ray imaging sensor composing of readout thin film transistor, reset thin film transistor and photodiode in a pixel. Furthermore, dynamic X-ray detector using duoPIX™ imaging sensor was manufactured and evaluated its X-ray imaging performances such as frame rate, sensitivity, noise, MTF and image lag. duoPIX™ dynamic X-ray detector has 150 × 150 mm<sup>2</sup> imaging area, 73 um pixel pitch, 2048 × 2048 matrix resolution(4.2M pixels) and maximum 50 frames per second. By means of comparison with conventional dynamic X-ray detector, duoPIX™ dynamic X-ray detector showed overall better performances than conventional dynamic X-ray detector as shown in the previous study.

Keywords: Dynamic X-ray Detector, Dynamic X-ray Imaging Sensor, Thin Film Transistor, Automated X-ray Inspection, Non-destructive Testing

## I. INTRODUCTION

엑스레이 디텍터는 병의원과 치과에서 엑스레이 영산진단 촬영용으로 사용되는 의료용 영산진단 뿐만 아니라, 전기자동차 배터리, 반도체, 전장 부품, 건설, 항공, 선박 등의 내부 결함 검사, 공항과 항만 시설의 선적 물품 및 하역 물품을 검사하기 위한 산업용 장비, 그리고 폭발물 등 위험물을 찾아내는 군사-보안용 검사 장비 등에 사용된다<sup>[1]</sup>.

박막트랜지스터(Thin film transistor)는 평판형 표시장치(Flat panel display) 뿐만 아니라 능동형 바이오센서, 그리고 작은 면적부터 대면적 엑스레이 영상센서의 스위칭 소자로 널리 사용되고 있다<sup>[2,3]</sup>.

선행 연구를 통해 기존 대비 높은 해상력을 구현하면서도 높은 감도와 대조(분별력), 그리고 낮은 영상지연을 구현하기 위해 다수의 박막트랜지스터와

포토다이오드로 구성된 3세대 엑스레이 영상센서(duoPIX™)를 설계, 제작하여 이의 적용 가능성을 제시하였다<sup>[4,5]</sup>.

기존 정지영상과는 달리 동영상 엑스레이 디텍터에 있어서 고속의 영상을 구동하고 취득하기 위해 높은 초당 프레임 속도(Frame rate), 낮은 영상지연(Image lag), 낮은 영상 잔상(Ghost image) 등이 요구된다.

이에 본 연구를 통해 기존 대비 높은 해상력을 구현하면서도 낮은 영상지연을 갖고 높은 초당 프레임 속도의 동영상 구현과 변환 가능한 롤링 셔터링(Rolling shuttering)과 글로벌 셔터링(Global shuttering)이 가능한 동영상 엑스레이 영상센서 duoPIX™ 설계와 구조, 그리고 이를 적용한 동영상 엑스레이 디텍터의 영상 성능을 제시하고자 한다.

\* Corresponding Author: Seung Ik Jun E-mail: daniel.jun@duopixray.com Tel: +82-31-229-3370 Address: B901~905, 357 Guseong-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea 16914

## II. MATERIAL AND METHODS

기존 박막트랜지스터 기반의 엑스레이 디텍터에 적용하고 있는 모든 엑스레이 영상센서의 픽셀 구성은 섬광체로부터의 가시광선을 광전 변환하는 포토다이오드와 이를 스위칭해 리드아웃 IC로 픽셀 정보를 보내는 리드아웃 박막트랜지스터만으로 구성되어 있다. 하지만 포토다이오드에는 상존 내지는 전 프레임에서 완전하게 제거되지 않은 기생 정전용량이 항상 존재하므로 높은 다크 오프셋(Dark offset)으로 인한 포토다이오드의 감도와 대조를 저하시키는 낮은 동적범위(Dynamic range)를 갖게 된다. 또한 본 잔류 기생정전용량은 동영상 구현시 이전 프레임의 영상정보를 담고 있어 높은 영상지연(Image lag)과 잔상(Ghost image) 발생의 원인이 된다.

Fig. 1에서 도시한 바와 같이 높은 동적범위를 확보하고 영상지연과 잔상이 없는 동영상 엑스레이 영상을 구현을 위해서는 엑스레이 조사 이후 포토다이오드에 쌓인 기생정전용량을 완전하고 빠르게 제거해야 하는데, 이전 연구에서 제시한 엑스레이 영상센서 픽셀과 주변 회로 구성(duoPIX™)은 포토다이오드 외에도 리드아웃 박막트랜지스터의 전극간 중첩 영역에 존재하는 기생정전용량을 빠르고 완전하게 제거할 목적으로 형성된 리셋 박막트랜지스터와 포토다이오드 광전 신호를 리드아웃 IC로 보낼 리드아웃 박막트랜지스터로 구성되어 있다<sup>[4]</sup>.

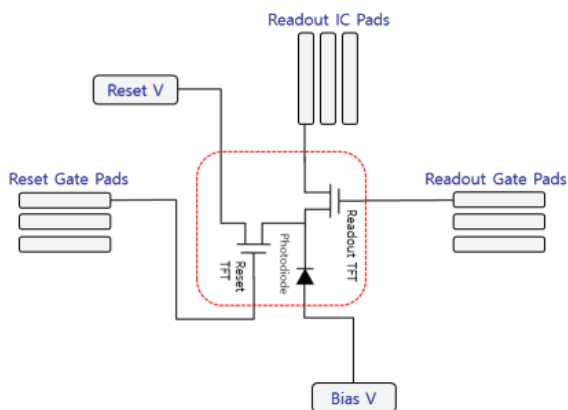


Fig. 1. Circuit diagrams of duoPIX™ X-ray imaging sensor.

Fig. 2는 기존 엑스레이 영상센서의 픽셀 회로로 리드아웃 박막트랜지스터와 리드아웃 IC를 구동함으로써 포토다이오드에 쌓인 기생정전용량을 제거하는 방법을 도식한 것이다. 하지만 각 픽셀의 리드아웃 박막트랜지스터와 리드아웃 IC 사이에 수천개의 라인간 기생정전용량으로 인해 포토다이오드에 쌓인 기생정전용량을 완전하게 제거하기가 사실상 불가능하여 이는 각 프레임간 영상지연과 잔상 발생의 원인이 된다.

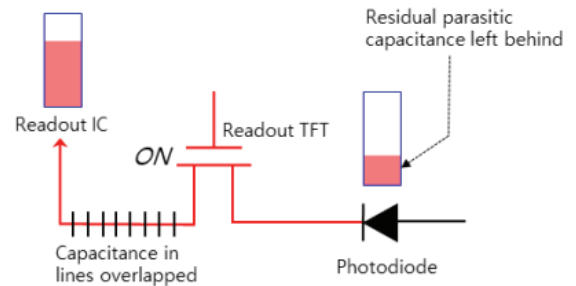


Fig. 2. Pixel diagram of conventional X-ray imaging sensor showing residual parasitic capacitance left behind in photodiode right after readout IC scrubbing.

반면 Fig. 3에서 도시한 것과 같이 픽셀내 별도의 리셋 박막트랜지스터를 구성하여 이를 구동할 경우 포토다이오드에 상존하는 기생정전용량을 전체 픽셀 리셋 구동을 통해 빠르고 완전하게 제거할 수 있다.

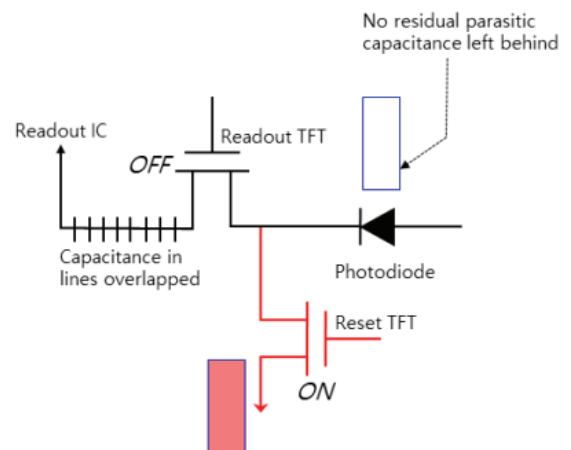


Fig. 3. Pixel diagram of duoPIX™ X-ray imaging sensor showing no residual parasitic capacitance left behind in photodiode right after individual pixel reset through reset TFT.

본 연구를 통해 영상지연이 없는 고속 프레임의 동영상 엑스레이 영상센서를 설계하기 위한 각 인자는 AIM-SPICE; TFT Modeling을 이용하여 단위 픽셀을 구성하는 소자, 즉 리드아웃 박막트랜지스터, 리셋 박막트랜지스터, 그리고 포토다이오드에 대한 모델링을 우선 진행하였으며, duoPIX™ 픽셀과 전체 영상 패널의 각 인자는 biCAL Simulator를 이용하여 추출되어 동영상 엑스레이 영상센서 패널에 대한 설계, 포토마스크 제작과 공정기술에 반영하였다. Table 1에서 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서 설계와 공정기술을 적용한 150 × 150 mm<sup>2</sup> 동영상 패널의 주요 파라미터를 제시하였다.

Table 1. Parameter extraction of duoPIX™ dynamic X-ray Imaging Sensor; mechanical, electrical and noise performance

Parameter	Unit	Targeted Value	Extracted Value
<b>Mechanical</b>			
Imaging area	mm <sup>2</sup>	150 × 150	
Pixel pitch	um	73	
Pixel matrix	Lines	2048 × 2048	
Resolution	Mpixels	4.2	
TFT active layer	-	In-Ga-Zn-Ox	
Max. frame rate	fps	50	
Readout	-	Dual readout	
<b>Electrical</b>			
TFT ON R	MΩ	< 1.7	1.5
Data line R	kΩ	< 0.8	0.7
Data line C	pF	< 30	27
Gate line R	kΩ	< 6.0	5.6
Gate line C	pF	< 100	95
Bias line R	kΩ	< 1.0	0.9
Bias line C	pF	< 45	42
Reset line R	kΩ	< 0.9	0.8
Reset line C	pF	< 37	35
TFT ON time	μsec	< 1.10	1.05
Pixel RC time	μsec	< 0.20	0.16
Photodiode C	pF	0.50	0.47
TFT mobility	cm <sup>2</sup> /Vs	> 15	18
<b>Noise performance</b>			
TFT trap noise	e-	< 150	124
TFT shot noise	e-	< 100	72
PD shot noise	e-	< 200	155
Total pixel noise	e-	< 400	374
Total line noise	e-	< 375	320
Total noise	e-	< 600	493

Fig. 4는 Table 1에서 얻은 각 파라미터 값들에 의거하여 제작된 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서 모듈이다. 본 영상센서 모듈은 게이트 × 리드아웃 2048 × 2048 라인, 해상도 4.2M 픽셀로 구성된 150 × 150 mm<sup>2</sup> 영상영역의 동영상 센서이며 상부와 하부의 리드아웃 패드는 각각의 256 채널을 갖는 리드아웃 IC로 연결되어 이후 아날로그-디지털 변환을 통해 각 픽셀의 영상은 16비트의 디지털 영상으로 구현된다. 패널의 좌측에는 개별 픽셀내 리드아웃 박막트랜지스터의 게이트가 역시 256 채널을 갖는 게이트 IC로 연결이 되며, 우측에는 개별 픽셀내 리셋 박막트랜지스터의 게이트가 256 채널을 갖는 게이트 IC로 연결된다. 본 리셋 게이트 구동은 변환 가능한 글로벌 셔터링과 롤링 셔터링 구현을 제공하게 된다.

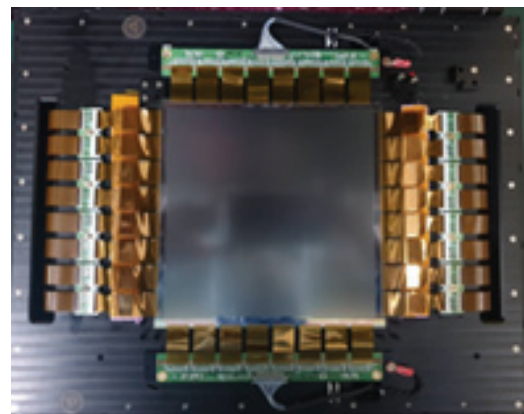


Fig. 4. Photograph of duoPIX™ dynamic X-ray imaging sensor module for 150 × 150 mm<sup>2</sup> imaging.

기존의 픽셀내 리드아웃 박막트랜지스터로만 구성된 영상센서와 본 연구에서 제시하는 리드아웃 박막트랜지스터 외에도 리셋 박막트랜지스터로 구성된 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서의 픽셀 소자 구동을 설명하기 위해 각각의 픽셀 구동 단계를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 5와 같이 기존 동영상 엑스레이 영상센서의 픽셀 구동은 (1) 글로벌 리셋, (2) 엑스레이 조사, 그리고 (3) 리드아웃의 과정을 거치는 픽셀내 소자 구동 방식으로 진행된다.

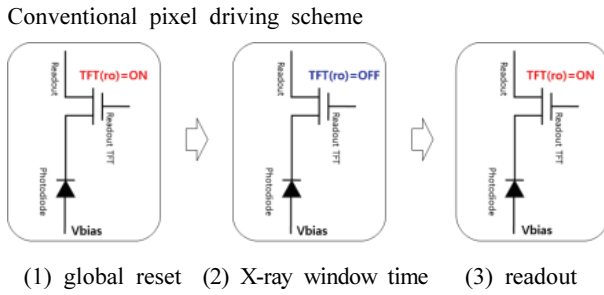


Fig. 5. Conventional pixel driving scheme with readout TFT driving.

반면 본 연구 과제의 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서 구동은 Fig. 6에서 도시한 바와 같이 (1) 개별 픽셀 리셋, (2) 엑스레이 조사, 그리고 (3) 리드아웃 구간으로 나누어지며, 픽셀 리셋 구간에서는 리셋 박막트랜지스터와 리드아웃 박막트랜지스터는 각각 ON과 OFF, 엑스레이 조사 구간에서는 모두 OFF, 리드아웃 구간에서는 각각 OFF와 ON으로 스위칭 구동을 하게 된다.

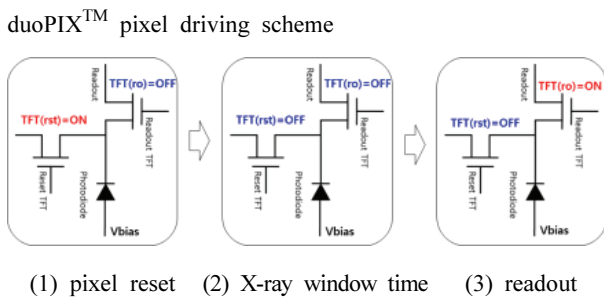


Fig. 6. duoPIX™ pixel driving scheme with readout TFT and reset TFT driving.

동영상 엑스레이 디텍터의 영상 성능을 평가하기 위해 Fig. 7과 같이 엑스선 차폐 설비 내에서 동영상 엑스레이 디텍터에 대한 영상 성능을 평가하였다.

비교 대상 동영상 엑스레이 디텍터로는 기존 동영상 엑스레이 영상센서를 적용한 동급의 A 제품을 선정하여 동일 환경과 조건에서 영상 성능을 비교 평가하였으며 그 조건은 Table 2와 같다.

MTF(Modulation Transfer Function)는 Slanted edge method에 의해 Tungsten edge phantom을 사용하였으며 감도(Sensitivity)는 평가 대상 디텍터의 Dark correction 이후 선량별로 X-ray bright 영상을 획득

하여 선량 조건에 대한 밝기 값을 Dose-gray value 선형 그래프의 기울기 값으로 획득한다. 영상지연 (Image Lag)은 평가 대상 디텍터의 Dark/gain correction 이후 영상지연 측정 표준 팬텀(Tungsten edge phantom)을 사용하여 100 프레임의 영상을 획득한 후 팬텀의 내외부 차이를 계산함으로써 그 값을 얻는다.

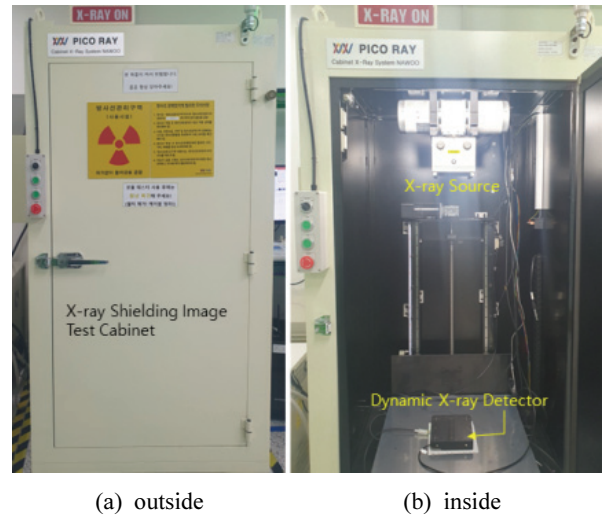


Fig. 7. Photograph of X-ray shielding image test cabinet to acquire dark and bright images of a dynamic X-ray detector.

Table 2. Evaluation conditions for image performance comparison

Evaluation conditions for each parameter			
	MTF (%)	Sensitivity (LSB/ $\mu$ Gy)	Image Lag (%)
	RQA5	RQA5	RQA5
X-ray exposure	70 kV	70 kV	70 kV
	160 mA	25/50/80/160 mA	160 mA
Area	Tungsten edge	1000×1000 ROI	Tungsten edge

### III. RESULT

Table 3은 최종 대상 제품인 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서를 적용한 동영상 엑스레이 디텍터와 기존 엑스레이 영상센서를 적용한 동급의 동영상 엑스레이 디텍터를 동일 조건에서 그 영상 성능을 비교한 것이다. duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터의 최대 프레임 속도는 초당 35 프레임과 50

프레임이었으며, 비교 대상의 동영상 엑스레이 디텍터는 최대 초당 15 프레임이었다.

Table 3. Imaging performance comparison of duoPIX™ and conventional dynamic X-ray detectors

Sensitivity and Total noise		
X-ray Imaging Sensor	duoPIX™	Conventional product A
Pixel size, $\mu\text{m}$	73	~80
Frame rate (1×1), fps	35/50	15
Sensitivity, LSB/ $\mu\text{Gy}$	3275	3270
Total noise, LSB	6.8	24.3
MTF (Modulation Transfer Function)		
X-ray Imaging Sensor	duoPIX™	Conventional product A
1.0 lp/mm, %	71	72
2.0 lp/mm, %	57	48
3.0 lp/mm, %	44	33
5.0 lp/mm, %	23	17
6.0 lp/mm, %	17	-
7.0 lp/mm, %	10	-
Image Lag		
X-ray Imaging Sensor	duoPIX™	Conventional A
1 <sup>st</sup> lag frame	0.43	1.35
2 <sup>nd</sup> lag frame	0.33	0.45
3 <sup>rd</sup> lag frame	0.27	0.30
4 <sup>th</sup> lag frame	0.24	0.26
5 <sup>th</sup> lag frame	0.21	0.22

평가 결과에서 보는 바와 같이 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터는 기존 동영상 엑스레이 디텍터보다 높은 초당 프레임 속도를 갖기에 엑스레이 노출 시간(Window time)이 짧고 그 픽셀 크기가 작아 유효 수광부 면적이 작아 감도 특성이 불리함에도 동일 또는 우세한 감도 특성을 보여주었다.

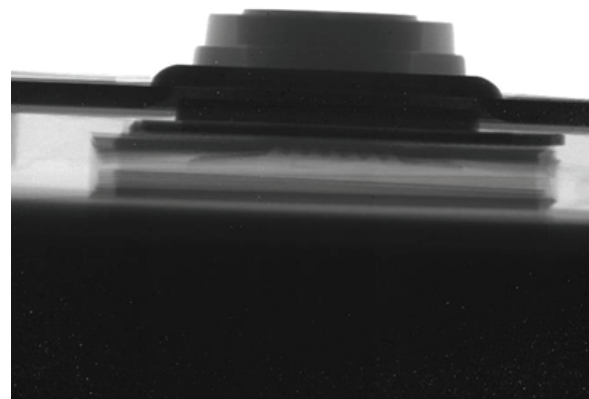
오히려 ROIC 게인(Gain) 값을 조정해 동일한 감도를 맞추었음에도 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터가 비교 대상 대비 3배 이상 낮은 노이즈 성능 값을 보여주고 있다. 또한 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서는 픽셀 내에 두 개의 박막트랜지스터를 구성했음에도 유효하고 높은 개구율(Fill factor)을 구현해 73  $\mu\text{m}$ 의 픽셀 사이즈를 구현하여 비교 대상 보다 오히려 작은 픽셀 사이즈로 높은 해상력의 영상 구현이 가능하였다.

동영상 엑스레이 구현에서 가장 중요한 요소인 영상지연(Image lag)은 첫 번째 프레임에서의 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터가 비교 대상 제품 대비 3배 이상의 낮은 영상지연 값을 보여 주었으며, 이후 프레임에서도 역시 더 낮은 영상지연 값을 얻게 되었다.

Fig. 8은 원통형 배터리를 피사체로 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터와 비교 대상의 동영상 디텍터를 동일한 조건에서 엑스레이 영상을 취득한 것이며, 영상에서 보는 바와 같이 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터가 비교 대상 디텍터 보다 시연성과 분별력 등 우수한 영상 품질을 확보하였음을 확인하였다.



(a) conventional A



(b) duoPIX™

Fig. 9. X-ray images of cylindrical battery for comparison of (a) conventional and (b) duoPIX™ X-ray image sensors at 90 kV, 3 mA and SDD 100 cm.

#### IV. DISCUSSION

기존 픽셀내 한 개의 리드아웃 박막트랜지스터와 포토다이오드로 구성된 엑스레이 영상센서의 문제점인 포토다이오드 내 잔류기생전용량을 빠르고 완전하게 제거하기 위해 리셋 박막트랜지스터를 추가로 구성된 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서 및 패널 설계, 이를 적용한 150 × 150 mm<sup>2</sup> 영상영역의 동영상 엑스레이 디텍터에 대한 영상 성능 평가를 진행하였다.

이후 추가적인 연구개발을 통해 대면적 300 × 300 mm<sup>2</sup> 영상영역의 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서와 디텍터에 대한 고속 프레임에서의 동영상 평가를 진행할 예정이다.

#### V. CONCLUSION

픽셀 내 다중의 박막트랜지스터로 구성된 duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서를 적용하여 150 × 150 mm<sup>2</sup> 영상영역, 73 μm 픽셀크기(4.2M pixels), 초당 35 프레임 또는 50 프레임의 동영상 엑스레이 디텍터를 제작하여 이에 대한 영상 성능을 비교 대상인 기존 동영상 엑스레이 디텍터와 함께 평가하고 비교하였다.

동일한 환경과 조건에서 영상 성능평가 결과, duoPIX™ 동영상 엑스레이 영상센서를 적용한 동영상 디텍터가 기존 영상센서를 적용한 동영상 디텍터 대비 높은 초당 프레임 속도, 동일 감도의 ROIC 게인 셋팅 값에서 더 낮은 영상 노이즈, 낮은 영상지연율을 갖는 등 우위의 동영상 엑스레이 디텍터 영상 성능을 구현함을 확인하였다.

#### Acknowledgement

본 연구는 포스트팁스 프로그램의 지원을 통해 진행되었음(과제번호 10421017).

#### 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, 87, 132108, pp. 87-89, 2005.
- [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/10.1063/1.2061860>
- [4] S. I. Jun, B. G. Lee, "duoPIX X-ray imaging sensor composing of multiple thin film transistors in a pixel for digital X-ray detector", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 16, No. 7, pp. 969-974, 2022. <https://doi.org/10.7742/jksr.2022.16.7.969>
- [5] S. I. Jun, "X-ray detecting panel of X-ray detector and method of manufacturing the same", US Patent 9935150, 2018.

# 픽셀내 다수의 산화물 박막트랜지스터로 구성된 동영상 엑스레이 영상센서와 디텍터에 대한 평가

전승익\*, 이봉구

주식회사 듀오픽스레이 (前 주식회사 바이오센스텍)

## 요 약

높은 초당 프레임 속도와 낮은 영상지연을 갖는 동영상 엑스레이 디텍터의 요구조건을 만족하기 위해서는 픽셀내 포토다이오드와 금속 배선간 중첩 영역의 기생정전용량을 최소화하여야 한다. 본 연구에서는 리드아웃 박막트랜지스터, 리셋 박막트랜지스터, 그리고 포토다이오드로 픽셀이 구성된 듀오픽스™(duoPIX™) 동영상 엑스레이 영상센서를 처음으로 제시하였다. 이후 150 × 150 mm<sup>2</sup> 영상영역, 73 μm 픽셀 크기, 2048 × 2048 해상도(4.2 M pixels), 최대 초당 50 프레임의 특성을 갖는 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터를 제작하여 초당 프레임 속도, 감도, 노이즈, MTF, 영상지연과 같은 엑스레이 영상 성능을 기존 엑스레이 영상센서를 적용한 동영상 엑스레이 디텍터와 비교 평가하였다. 평가 결과 이전 연구에서 기대했던 것과 같이 duoPIX™ 동영상 엑스레이 디텍터가 기존 동영상 엑스레이 디텍터 대비 모든 특성에서 우위의 성능을 보여 주었다.

중심단어: 동영상 엑스레이 디텍터, 동영상 엑스레이 영상센서, 박막트랜지스터, 자동화 엑스레이 검사, 비파괴 검사

## 연구자 정보 이력

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