

논문 2012-49-10-23

## 2차원 소자 시뮬레이터를 이용한 비정질 셀레늄(a-Se) 분석 (Study of The Amorphous Selenium (a-Se) using 2-dimensional Device Simulator)

김시형\*, 김창만\*\*, 남기창\*\*\*, 김상희\*, 송광섭\*\*\*\*

(Si-Hyoung Kim, Chang-Man Kim, Ki-Chang Nam, Sang-Hee Kim, and Kwang-Soup Song)

### 요약

디지털 X-ray 영상 디텍터는 의료용 및 산업용으로 널리 이용되고 있다. 직접방식(direct method)의 디지털 X-ray 영상 디텍터는 X-ray 에너지를 전기적 신호로 변환하기 위하여 광도전체(photoconductor)를 이용하며 일반적으로 비정질 셀레늄(a-Se)을 사용하고 있다. 본 연구는 비정질 셀레늄 표면에 파장 486 nm의 전자방사선을 조사할 경우 내부에서 일어나는 물리적 현상들을 분석하기 위하여 2차원 소자 시뮬레이터를 이용하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 비정질 셀레늄 내부 전자-정공 생성율, 전자-정공 재결합율, 전자/정공 분포에 대한 분석을 수행하였다. 사용된 시뮬레이터는 디바이스 내부를 삼각형으로 나누어 보간법을 사용하여 계산하는 방식이다. 본 시뮬레이션 방법은 직접방식 디지털 X-ray 영상 디텍터 분석을 위하여 처음으로 제안되었고 유용한 방법이다. 이러한 2차원 소자 시뮬레이터를 이용한 연구방법은 향후 디지털 방사선 영상 디텍터 개발에 많이 응용될 것으로 예상된다.

### Abstract

Digital X-ray image detector has been applied for medical and industrial fields. Photoconductors have been used to convert the X-ray energy to electrical signal on the direct digital X-ray image detector and amorphous selenium (a-Se) has been used as a photoconductor, normally. In this work, we use 2-dimensional device (2-D) simulator to study about physical phenomena in the a-Se, when we irradiate electromagnetic radiation ( $\lambda=486$  nm) on the a-Se surface. We evaluate the electron-hole generation rate, electron-hole recombination rate, and electron/hole distribution in the a-Se using 2-D simulator. This simulator divides the device into triangle and calculates using interpolation method. This simulation method has been proposed for the first time and we expect that it will be applied for the development of digital X-ray image detector.

**Keywords :** X-ray detector, direct method, photoconductor, a-Se, 2-dimensional device simulator

---

\* 정회원, 금오공과대학교 전자공학부

(School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

\*\* 정회원, 구미전자정보기술원 IT의료융합기술사업단

(Biomedical IT Convergence Center, Gumi Electronics & Information Technology Research Institute)

\*\*\* 평생회원, 연세대학교 의과대학 의학공학연구소, 세브란스 의료기기임상시험센터

(Department of Medical Engineering, Yonsei University College of Medicine & Severance MDCTC)

\*\*\*\* 정회원-교신저자, 금오공과대학교 메디컬IT융합공학과

(Department of Medical IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

※ 본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

접수일자: 2012년8월17일, 수정완료일: 2012년10월5일

## I. 서 론

의료용 및 산업용 디지털 방사선 촬영 방식(digital radiography system, DR)은 방사선의 변환 방식에 의해 간접 방식과 직접 방식 두 종류로 나누어진다.<sup>[1~3]</sup> 간접 방식은 형광체(scintillator)가 피사체를 투과한 X-ray를 가시광선으로 변환 시키고 가시광선은 포토다이오드(photodiode)에 의해 전기적 신호로 변환 되어 해당 픽셀의 영상정보가 전기적 신호로 각 픽셀의 커패시터에 저장되는 방식이다. 직접 방식은 광도전체(photoconductor) 재질에 X-ray가 조사되고 이로 인해 포토컨덕터 내부에 전자-정공 쌍(electron-hole pair)이 발생한다. X-ray 조사에 의해 생성된 전자-정공 쌍은 전극에 가해진 고전압(high voltage, 10 V/ $\mu$ m)에 의해 분리되고 분리된 전하를 각 픽셀 커패시터에 저장 하여 픽셀을 구현하는 방식이다.<sup>[4~5]</sup> TFT 패널을 이용하는 경우 직접 방식과 간접 방식 모두 각 픽셀별 커패시터를 가지고 있으며 TFT는 각 커패시터의 스위칭 기능을 한다. 스위칭 기능을 가진 TFT의 게이트 라인에 ON전압이 가해지면 각 픽셀의 커패시터에 저장 되어 있던 전하들이 데이터 라인(data line)을 통하여 각 픽셀의 리드아웃 회로(readout circuit)에 전송되어 각 픽셀에 해당하는 신호를 구현하게 된다. 일반적으로 직접 방식은 간접 방식에 비해 포토다이오드(photodiode) 공간이 필요하지 않아 필 팩터(fill factor)가 높고, 상대적으로 적은 에너지 변환 단계를 거쳐 높은 효율을 나타내고 있다.

광도전체 재질중 비정질 셀레늄(amorphous selenium, a-Se)은 HgI<sub>2</sub>, PbI<sub>2</sub>, CdTe, CdZnTe등의 재질들과는 다르게 중금속을 포함하지 않고 X-ray에 의한 구조적 데미지의 저항력이 높으며 대면적에 대한 장점을 가지고 있다.<sup>[6]</sup> 또한, 비정질 셀레늄은 중금속을 제외한 다른 재질에 비해 누설전류(dark current)가 낮고 높은 효율을 보여주며 특히 빛 혹은 X-ray의 입사에 따라서 높은 검출 효율(detective efficiency)을 보여준다.<sup>[4]</sup> 이러한 이유로 산업용 및 의료용으로 비정질 셀레늄 기반의 직접 방식을 사용한 디지털 방사선 촬영 방식의 발전은 빠르게 진행 되고 있다. 직접방식의 방사선 촬영에 널리 사용되고 있는 비정질 셀레늄을 분석한 결과로 지금까지 발표된 많은 연구 결과들은 실험을 근거로 한 분석 방법이 널리 사용되어 왔다. 비정질 셀

레늄 기관에 고전압 인가 후 X-ray 및 가시광선(파장 486 nm) 조사에 따른 신호크기를 측정하여 비정질 셀레늄 전자/정공 이동도, 전자/정공 재결합 수명(life time)등 많은 물리적 현상을 분석하고 발표하였다.<sup>[7]</sup> 그 외 보조수단으로 전계 해석 시뮬레이터를 이용한 비정질 셀레늄 분석 연구 결과가 발표되고 있으나, 기존에 발표된 시뮬레이션을 이용한 분석 결과들은 고전압이 인가된 상태에서 비정질 셀레늄 내부의 전계 분포도 및 등전위차에 국한하여 시뮬레이션 연구결과들을 발표하고 있다.<sup>[8~9]</sup> 이러한 시뮬레이션 관련 연구결과들은 시뮬레이션을 이용한 연구 방법이 갖고 있는 장점을 충분히 활용하지 못한 제한적 연구결과들이다. 일반적으로 시뮬레이션을 이용한 연구는 실험적 방법으로는 알 수 없는 디바이스 내부 현상을 분석하고 규명할 수 있어 디바이스 최적화에 많이 활용되고 있다. 따라서 새로운 방법의 시뮬레이션을 이용한 비정질 셀레늄 분석 관련 연구 방법은 디지털 X-ray 영상 디텍터 개발에 널리 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 기존 시뮬레이션을 이용한 연구 결과에서는 규명하지 못한 전자 방사선 조사에 따른 비정질 셀레늄 내부에서 일어나는 전자-정공 생성율(electron-hole pair generation rate), 전자-정공 농도(electron-hole concentration), 전자-정공 재결합율(electron-hole recombination rate) 및 광전류(photocurrent), 누설전류(dark current)등 비정질 셀레늄 내부 현상을 2차원 시뮬레이터를 사용하여 분석하였다. 본 연구에서 사용한 2차원 시뮬레이터 (ATLAS)는 반도체를 비롯한 여러 분야에서 디바이스 내부에서 발생하는 여러 현상을 분석하고 규명하기 위해 널리 사용하는 신뢰성 있는 시뮬레이터이다.<sup>[10, 11]</sup>

## II. 본 론

### 1. 구조

그림 1 (a)에서는 직접방식 디지털 X-ray 영상 디텍터의 단일 픽셀을 나타내고 있다. 단일 픽셀 구조에서 상판 바이어스 전극은 고전압을 인가하여 X-ray 조사에 의해 발생한 전자-정공쌍을 분리하며, 하판 전극은 전자 또는 정공을 수집하여 TFT와 하판 전극사이 커패시터에 X-ray 조사에 의해 발생한 전하를 충전한다. 커패시터에 충전된 전하는 스위치 기능의 TFT가 ON

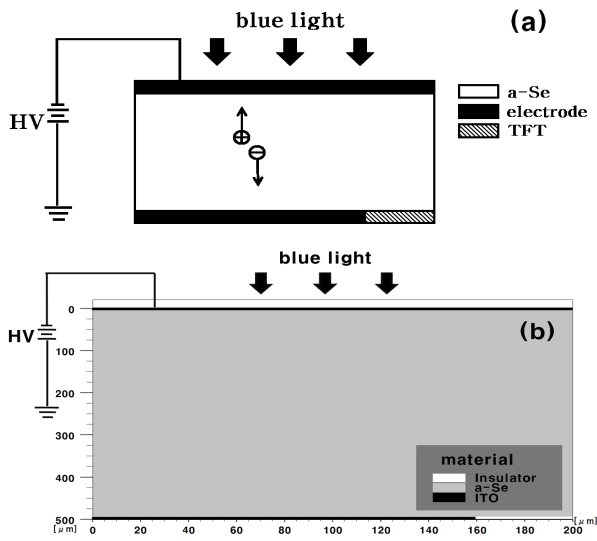


그림 1. (a) 직접 방식 디지털 X-ray 디텍터 단일 픽셀 도식화 및 (b) 단일 픽셀 시뮬레이션을 위한 등가구조

Fig. 1. a) Schematic diagram of single pixel in the direct method digital X-ray detector and (b) the equivalent structure of single pixel for simulation.

이 되면 데이터 라인을 통해 리드아웃 회로로 전달되고 단일 픽셀 영상을 구현하게 된다.

실험 데이터를 바탕으로 비정질 셀레늄을 분석하기 위해서 사용하는 광원으로는 레이저, UV 또는 파란색 계열의 가시광선을 이용하고 있다.<sup>[12]</sup> X-ray 대비 에너지가 낮은 광원을 사용하는 이유는 X-ray 튜브에서 조사되어 나오는 포톤에너지가 멀티스펙트럼(multi-spectrum)을 나타내고, 높은 에너지로 인해 비정질 셀레늄 표면을 투과해 벌크 내부 전체에서 반응하기 때문에 물리적 현상을 분석하기에는 어려움이 있다.<sup>[13]</sup> 이에 본 논문에서는 시뮬레이션의 광원 소스로 X-ray 대비 파장이 크고 에너지가 낮은 파란색(486 nm) 광원을 사용하였다. 비정질 셀레늄은 가시광선 중 파란색 계열 파장에서 제일 민감하게 반응을 하고, 그 에너지가 X-ray 에너지에 비해 낮아 비정질 셀레늄 표면에서만 반응하고 단일 에너지 대역 광원으로 분석하기에 용이하다.<sup>[14]</sup> 그로인하여 비정질 셀레늄 표면에서 생성된 전자-정공쌍이 전계에 의해 양쪽 전극으로 향하는 동안 여러 물리적 현상을 분석 할 수 있어 파란색 파장의 빛을 광원으로 사용 하였다.

## 2. 시뮬레이션 구조

그림 1 (b) 에서는 시뮬레이션을 위한 구조적 그림을 나타내고 있다. 디텍터 단일 픽셀 시뮬레이션을 위해 설정한 구조적인 데이터는 비정질 셀레늄 두께 500  $\mu\text{m}$ , 폭 200  $\mu\text{m}$ , 상판 ITO 전극은 두께 1  $\mu\text{m}$ , 폭 200  $\mu\text{m}$  전극을 사용하였다. 하판 전극의 경우 단일 픽셀의 필 팩터(fill factor)를 80 %로 간주하여 폭 160  $\mu\text{m}$ , 두께 1  $\mu\text{m}$  ITO를 사용하였다. 나머지 폭 40  $\mu\text{m}$ 는 하판 픽셀 전극의 TFT 면적을 고려하여 절연층으로 대체하였다. 비정질 셀레늄의 두께는 500  $\mu\text{m}$ 이므로 상판 전극에는 -5000 V (10 V/ $\mu\text{m}$ )를 인가하였다. 상판 전극에 -5000 V를 인가함으로 두 전극 사이 전계에 의해 정공은 상판 음전극(cathode)으로 올라가고 전자는 하판 양전극(anode)으로 수집된다. 시뮬레이션에 사용한 비정질 셀레늄의 파라미터와 광원의 세기를 표 1에 나타내었다.<sup>[6,11]</sup> 비정질 셀레늄 파라미터의 경우 실험과 유사한 시뮬레이션 수행을 위해 기존 발표된 실험치 값을 적용 하였다.<sup>[6, 11]</sup>

시뮬레이션 모델 설정에 있어 가능한 한 시뮬레이션의 정확도를 높여 실제에 가까운 시뮬레이션을 위해 전자, 정공에 영향을 미치는 영향들을 고려하여 쇼클리리드 홀 재결합(shockley-read-hall recombination), 전계에 의존하는 이동도(parallel electric field dependence), 오제 재결합(Auger recombination)들을 고려하여 시뮬레이션을 진행 하였다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 비정질 셀레늄 파라미터 및 광원 강도

Table 1. Parameters of a-Se and light intensity for the simulation.

파라미터 (parameter)		값 (Value)
비정질 셀레늄 (a-Se)	홀 라이프 타임 (Hole lifetime)	$20 \times 10^{-6}\text{s}$
	전자 라이프 타임 (Electron lifetime)	$200 \times 10^{-6}\text{s}$
	정공 이동도 (Hole mobility)	0.12 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
	전자 이동도 (Electron mobility)	0.003 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
	에너지 밴드갭 (Energy band gap)	2.2 eV
	비유전율 (Relative permittivity)	6.2
	흡광 계수 (Extinction coefficient)	2.1
빛 (Light)	굴절률 (Refractive index)	3
	파장 (Wave length)	486 nm
	세기 (Intensity)	5.74 mW, 19.21 mW

3. 시뮬레이션 결과

그림 2에서는 조사되는 광원의 강도에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 상판 음전극에 인가전압을 0 V에서 -5000 V까지 순차적으로 증가시키면서 광원의 에너지 강도에 따라 음전극에 흐르는 정공 전류 크기를 그래프로 나타내었다. 또한, 누설전류(dark current)의 크기를 평가하기 위해 단지 상판 음전극에 동일한 전압을 인가할 때 나타나는 누설전류 특성도 나타내고 있다. 위쪽 선은 누설 전류로써 빛을 조사하지 않고 고전압에 의해 흐르는 누설 전류에 대한 시뮬레이션 결과로 광원이 조사되지 않기 때문에 흐르는 전류의 크기가 매우 작아 상판 음전극에 -5000 V의 고전압을 인가했을 경우 흐르는 누설전류는  $-1 \times 10^{-17}$  A/ $\mu\text{m}$ 이다. 이 값은 일반적인 실험치보다 작은 값으로 이는 시뮬레이션 조건을 설정할 때 비정질 셀레늄 내부에 불규칙적으로 분포하는 결정화 구조의 결점(defects)들을 설정해 주지 않았기 때문으로 판단된다.

가운데 선은 조사되는 광원이 5.74 mW일 때 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 맨 아래쪽 선은 조사되는 광원이 19.21 mW일 때이다. 파장 486 nm를 갖는 단일 광자의 에너지는  $4.09 \times 10^{-19}$  J이므로 5.74 mW의 광원의 경우 1초 동안 조사되는 광자의 개수는  $1.40 \times 10^{16}$ 개이며 19.21 mW 광원에서는 1초 동안  $7.70 \times 10^{16}$ 개의 광자가 비정질 셀레늄 표면에 조사 된다. 비정질 셀레늄 원자는 이온화 에너지를 갖고 입사하는 광자와 충돌로 인해 이온화 되고, 이온화된 셀레늄 원자는 전자를 잃어버리고 정공

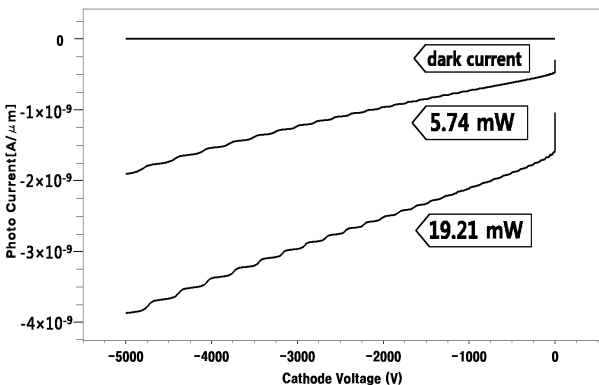


그림 2. 광원(파장 486 nm) 강도(19.21 mW, 5.74 mW)에 따른 광전류 크기 및 비정질 셀레늄의 누설전류(dark current)

Fig. 2. Photocurrent depending on the light (wavelength 486 nm) intensity (19.21 mW, 5.74 mW) and dark current on the a-Se.

이 남게 된다. 음전하(negative charge)를 갖는 전자는 하판 양전극으로 끌려가게 되고 양전하(positive charge)인 정공은 상대적으로 상판 음전극으로 흐른다. 일정 시간동안 조사되는 광자의 개수가 증가할수록 비정질 셀레늄 원자와 충돌하는 광자의 개수는 증가하고 이에 따라 이온화되는 셀레늄 원자가 증가하여 상판 음전극과 하판 음전극에서 검출되는 광전류는 증가하는 것으로 그림 2에서와 같이 나타나게 된다. 바이어스 전극에 인가하는 전압이 증가할수록 광전류가 증가한다. 이는 높은 인가 전압에 따라 비정질 셀레늄 내부에 고전계가 형성되고 광자와 충돌로 인해 생성된 정공과 전자가 재결합에 의해 소멸하지 않고 강한 전계에 의해 상판 음전극으로 정공이 이동하고 하판 양전극으로는 전자가 이동하기 때문이다.

그림 3의 (a)와 (b)는 파장 486 nm, 19.21 mW 강도의 광원이 조사되었을 때 비정질 셀레늄 내부를 투과하는 빛의 깊이와 이에 따른 포토제너레이션율(photogeneration rate)을 나타내고 있다. 파장 486 nm 빛이 비정질 셀레늄 표면에서 투과하는 깊이는 간섭 및 회절 현상에 의해 벌크(약 400  $\mu\text{m}$ )까지 투과하나 포토제너레이션 현상은 160  $\mu\text{m}$  이상의 깊이에서는 발생

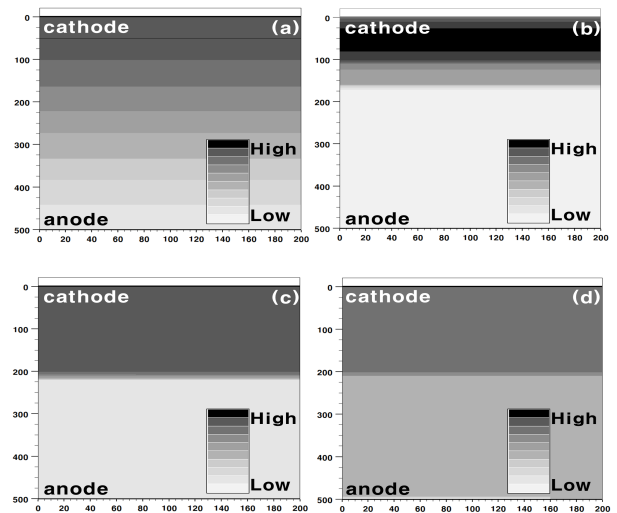


그림 3. 비정질 셀레늄 표면에 광원(파장 486 nm, 19.21 mW) 조사 후 -5000 V인가에 따른 셀레늄 내부 (a)투과되는 빛의 강도, (b) 포토제너레이션율, (c) 홀 농도, (d) 전자 농도

Fig. 3. When light (wavelength 486 nm, 19.21 mW) is irradiated and -5000 V voltage is biased on the a-Se surface, (a) generated optical intensity, (b) photogeneration rate, (c) hole concentration and (d) electron concentration.

하고 있지 않다. 이는 160  $\mu\text{m}$  이상 투과하는 빛은 에너지를 잃어버려 비정질 셀레늄 원자와 충돌하여도 이온화 현상이 발생하지 않기 때문으로 판단된다. 포토제너레이션 현상이 가장 많이 발생하는 부분은 비정질 셀레늄 표면에서 27  $\mu\text{m}$ ~80  $\mu\text{m}$  깊이에서 가장 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다. 그림 3의 (c)와 (d)에서는 그림 (a), (b)와 동일한 조건에서 광원에 의해 발생하는 비정질 셀레늄 내부 전자-정공 농도(electron-hole concentration) 분포를 나타내고 있다. 포토제너레이션이 가장 활발하게 일어나는 부분에서 전자-정공 농도가 가장 높으며 전계에 의해 정공은 음극인 상판 전극으로 이동하고 전자는 하판 전극인 양극으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

5.74 mW 강도의 광원이 조사된 경우는 19.21 mW 강도의 광원이 조사된 경우보다 상대적으로 낮은 포토제너레이션 율과 낮은 전자/홀 농도 분포를 가지게 된다.

그림 4에서는 전자-정공쌍의 재결합율을 나타내고 있다. 비정질 셀레늄을 활성화 하고 감도를 높이기 위하여 상판 음전극에 -5000 V를 가했지만, 포토제너레이션에 의해 생성된 전자-정공쌍의 일부분은 재결합하여 소멸하는 것을 알 수 있다. 재결합이 가장 많이 일어나는 부분은 표면에서 48  $\mu\text{m}$ ~90  $\mu\text{m}$  깊이에서 가장 활발하게 일어나고 상판 음전극 부위와 하판 양 전극 쪽으로 갈수록 재결합율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 상판 음전극 표면에서는 포토제너레이션에 의해 발생한 정공이 빠르게 방전되고 전자만 남아 재결합율이 감소

하는 것으로 사료된다. 전자의 경우 전계에 의해 하판 양 전극 쪽으로 흐르게 되고 160  $\mu\text{m}$  이하에서는 포토제너레이션 발생하지 않기 때문에 정공과 결합하는 전자가 감소하여 재결합율이 낮아지는 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

일반적으로 비정질 셀레늄을 이용한 직접 방식의 디지털 X-ray 영상 장비는 실험적 분석 방법을 이용한 연구결과가 다수 발표되었다. 실험적 분석을 이용한 방법은 모든 현상을 분석하고 이해하는데 가장 근원이 되는 방법이나 디바이스 내부에서 발생하는 여러 현상을 분석하기에는 한정적이다. 또한, 실험적 분석에 국한하는 경우 시행착오로 인한 많은 시간과 비용을 필요로 하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 소자 시뮬레이터를 이용한 연구 결과를 발표하였다. 디지털 영상 디텍터 개발 시 구조 내부의 광전자-정공 생성율, 전자-정공 재결합율 그리고 전계 분포 상태등에 대한 분석들을 추가적으로 고려하게 될 수 있다면 직접 방식 디지털 X-ray 디텍터 개발과 관련하여 내부 물리적 현상을 고려한 좀 더 심화된 연구 개발이 가능할 것으로 예상된다. 또한, 추후에는 시뮬레이션 모델에 온도관련 모델들을 추가하여 온도 변화에 따른 셀레늄 내부 상태 변화를 시뮬레이션을 통해 분석하고 예측할 수 있다면 개선된 디지털 X-ray 디텍터를 개발에 미비하게나마 기여할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Wei Zhaoa, D.C. Huntb, Kenkichi Taniokac, J.A. Rowlandsb, "Amorphous selenium flat panel detectors for medical applications", Physics Research A, 549, 205-209, 2005.
- [2] Jang Yong Choi, Ji Koon Park, Sang Sik Kang, Chi Woong Moon, Hyung Won Lee and Sang Hee Nam, "비정질 셀레늄을 이용한 직접방식의 디지털 방사선 검출기와 X-ray film과의 MTF 측정을 통한 영상 질(Quality) 비교 평가에 관한 연구", 대한전자공학회, 40, 71-79, 2003.
- [3] 차보경, 이동훈, 김봉희, 황윤금, 전성채, 허영, "디지털 3D 투시 X-ray 영상 센서용 섬광체 연구개발", 대한전자공학회 2010년 하계학술대회, 33, 2025-2027, 2010.

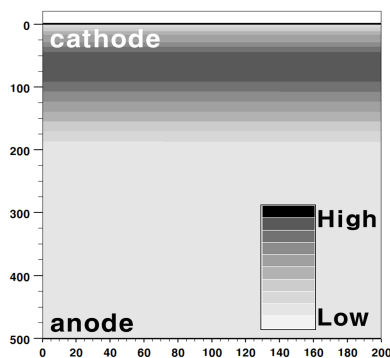


그림 4. 비정질 셀레늄 표면에 광원(파장 486 nm, 19.21 mW) 조사 후 -5000 V인가에 따른 셀레늄 내부 전자-정공 재결합율

Fig. 4. Electron-hole recombination rate in the a-Se, when light (wavelength 486 nm, 19.21 mW) is irradiated and -5000 V voltage is biased on the a-Se surface.

- [4] S.O. Kasap, John Rowlands, B. Fogal, M. Zahangir Kabir, G. Belev, N. Sidhu, Brad Polischuk, Robert E. Johanson, "Progress in the science and technology of direct conversion a-Se X-ray sensors", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 299-302, 988-992, 2002.
- [5] J.A. Rowlands, J. Yorkston, in: J. Beutel, H.L. Kundel, R.L. Van Metter (Eds.), *Handbook of Medical Imaging*, vol. 1, SPIE Press, Washington, Chapter 4 and references therein, 2000.
- [6] Martin Hoheisel, Lothar B"atz, "Requirements on amorphous semiconductors for medical X-ray detector", *Thin Solid Films*, 383, 130-136, 2001.
- [7] G. Belev, S.O. Kasap, "Amorphous selenium as X-ray photoconductor", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 345&346, 484-488, 2004.
- [8] Shiva Abbaszadeh, Nicholas Allec, Kai Wang, Karim S. Karim, "Low Dark-Current Lateral Amorphous-Selenium Metal - Semiconductor - Metal Photodetector", *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, 32, 1263-1265, 2011.
- [9] Ho Kyung Kim, Min Kook Cho, Seong Kyu Ahn, Gyu seong Cho and Hyo sung Cho, "Electrical Investigation of LIGA-Processed Gas Electron Multipliers", *Journal of the Korean Physical Society*, 48, 40-46, 2006.
- [10] [http://www.silvaco.com/tech\\_lib\\_TCAD/simulation\\_standard/2011/oct\\_nov\\_dec/a2/a2.html](http://www.silvaco.com/tech_lib_TCAD/simulation_standard/2011/oct_nov_dec/a2/a2.html)
- [11] *ATLAS User's Manual*, 2012.
- [12] Kai Wang, Feng Chen, Nicholas Allec and Karim S., "Fast Lateral Amorphous-Selenium Metal-Semiconductor-Metal Photodetector with High Blue-to-Ultraviolet Responsivity", *IEEE*, 57, 8, 1953-1958, 2010.
- [13] Kai Wang, Feng Chen, Nicholas Allec, Fang Yuan, George Belev, Safa Kasap and Karim S. Karim, "Amorphous-Selenium-Based Three-Terminal X-ray Detector With a Gate", *IEEE*, 32, 782-784, 2011.
- [14] W. Que and J. A. Rowlands, "X-ray photogeneration in amorphous selenium: Geminate versus columnar recombination", *Phys. Rev.* 51, 500-507, 1995.

저 자 소 개



김 시 형(정회원)  
2011년 금오공과대학교  
전자공학과 학사 졸업.  
2011년~현재 금오공과대학교  
전자공학과 석사과정.  
<주관심분야 : 디지털 X-ray 디  
텍터, 소자 시뮬레이션>



김 창 만(정회원)  
1997년 대전대 물리학과 학사  
2001년 와세다대 전기전자정보  
공학과 석사.  
2007년 와세다대 전기전자정보  
공학과 박사.  
2007년~2011년 삼성테크윈  
2011년~현재 구미전자정보기술원  
<주관심분야 : 의용전자, 시뮬레이션, 고체전자물  
성>

남 기 창(평생회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 48권 SC편 제 2호 참조

송 광 섭(정회원)-교신저자  
대한전자공학회 논문지  
제 48권 SC편 제 2호 참조



김 상 희(정회원)  
1983년 홍익대학교 전기공학과  
학사 졸업.  
1985년 연세대학교 전기공학과  
석사 졸업.  
1992년 Texas A&M Univ  
Bioeng 박사 졸업.  
2011년~현재 IT의료융합기술사업단 단장  
<주관심분야 : 의용전자, 영상처리, 계측제어>