Journal of Radiation Industry 9(1) : 1~7(2015)

방사선 노출에 따른 3T APS 성능 감소와 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 픽셀 내부 결함의 비교분석

김기윤[1] · 김명수[1] · 임경택[1] · 이은중[1] · 김찬규[1] · 박종환[2] · 조규성[1,*]

[1]한국과학기술원 원자력 및 양자 공학과, [2]루밴틱스 에이디엠

A Comparison between the Performance Degradation of 3T APS due to Radiation Exposure and the Expected Internal Damage via Monte-Carlo Simulation

Giyoon Kim[1], Myungsoo Kim[1], Kyungtaek Lim[1], Eunjung Lee[1], Chankyu Kim[1], Jonghwan Park[2] and Gyuseong Cho[1,*]

[1]*Department of Nuclear & Quantum Engineering, KAIST, Daejeon, Korea*
[2]*Luvantix ADM*

Abstract - The trend of x-ray image sensor has been evolved from an amorphous silicon sensor to a crystal silicon sensor. A crystal silicon X-ray sensor, meaning a X-ray CIS (CMOS image sensor), is consisted of three transistors (Trs), i.e., a Reset Transistor, a Source Follower and a Select Transistor, and a photodiode. They are highly sensitive to radiation exposure. As the frequency of exposure to radiation increases, the quality of the imaging device dramatically decreases. The most well known effects of a X-ray CIS due to the radiation damage are increments in the reset voltage and dark currents. In this study, a pixel array of a X-ray CIS was made of 20×20 pixels and this pixel array was exposed to a high radiation dose. The radiation source was Co-60 and the total radiation dose was increased from 1 to 9 kGy with a step of 1 kGy. We irradiated the small pixel array to get the increments data of the reset voltage and the dark currents. Also, we simulated the radiation effects of the pixel by MCNP (Monte Carlo N-Particle) simulation. From the comparison of actual data and simulation data, the most affected location could be determined and the cause of the increments of the reset voltage and dark current could be found.

Key words : x-Ray sensor, 3T, APS, Radiation dose, Transistor detector, MCNP simulation

서 론

엑스선 영상장치는 산업분야에서 반도체와 같은 작은 대상부터 건물이나 배처럼 큰 대상의 비파괴 검사를 위해 사용되며, 의료분야에서는 간단한 골절이나, 유방검사 등 진단용으로 다양하게 사용된다. 특히, 디지털 엑스선 영상센서의 개발을 통해 영상의 가공, 저장 등이 용이해지면서 기존의 필름을 이용한 영상 취득 방식이나 스캔 리더기를 이용한 Computed Radiography는 시장에서의 위치를 잃어가고 있는 추세이다.

특히, 의료분야에서는 미세골절, 유방검사 등 고해상도 영상을 필요로 하고 환자가 받는 방사선양을 줄이기 위해서

* Corresponding author: Gyuseong Cho, Tel. +82-42-350-3821, Fax. +82-42-350-5861, E-mail. gscho@kaist.ac.kr

는 빠른 영상 획득이 필요한 상황이고, 산업분야에서는 제품 검수과정에서의 생산속도 저하를 방지하고 더 높은 집적도를 갖는 칩을 검수하기 위하여 역시 높은 해상도와 빠른 영상취득이 가능한 X선 영상센서가 필요하다. 따라서 이러한 요구사항으로 인해 기존에 활발히 사용되었던 비정질(Amorphous) 실리콘 방식의 대면적 X선 영상센서보다는 정질(Crystal) 실리콘을 이용한 고해상도 및 고속 영상장치 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다(허 2011).

정질 실리콘을 이용하는 센서의 경우 3개의 트랜지스터와 포토다이오드로 이루어진 픽셀구조가 가장 일반적으로 사용된다. 3개의 트랜지스터는 각각 포토다이오드 리셋 트랜지스터, 소스 팔로워 트랜지스터 그리고 셀렉트 트랜지스터로 동작을 하게 된다(El and Eltoukhy 2005). 내부 트랜지스터와 포토다이오드는 방사선에 매우 민감하기 때문에 지속적인 엑스선 노출에 치명적이다. 특히, 의료용보다 촬영빈도가 높고 엑스선의 에너지가 높은 산업용의 경우, 픽셀이 받는 높은 누적 방사선양으로 인해 성능이 크게 저하된다(Gordon *et al*. 2004).

방사선에 의한 픽셀의 성능저하 문제점 중 가장 잘 알려진 문제점은 방사선이 픽셀을 통과하면서 픽셀 내부의 3개의 트랜지스터의 Gate Oxide에 비정상적인 트랩을 만들거나 원자핵들의 위치를 이동시키면서 트랜지스터에 결함을 만드는 것이다(Tan and Theuwissen 2012). 이로 인해 발생하는 누설 전류가 리셋 전압에 영향을 미치는 문제가 발생한다. 또한 트랜지스터의 결함과 픽셀에서 가장 큰 면적을 차지하는 포토다이오드에서 발생하는 결함으로 인해 빛이 없는 상태에서도 마치 빛이 존재하는 것과 같이 누설 전류가 흐르면서 발생하는 암흑상태전류가 증가하는 문제가 있다(Goiffon *et al*. 2010).

본 연구에서는 정질 실리콘을 이용하여 개발된 대면적 엑스선 영상센서의 일부 센서를 소형 어레이 형태로 제작하여, 소형 어레이 센서에 다량의 고에너지 방사선을 조사하고, 방사선에 의한 결함으로 발생한 성능 저하를 평가했다. 또한 실제 어레이 센서와 똑같은 픽셀을 Monte Carlo N-Particle (MCNP) 시뮬레이션 상에 모사하고 동일 조건에서 방사선을 조사하여, 각각의 픽셀에서 방사선 조사에 의하여 쌓이는 에너지양을 측정하고 문제가 되는 지역인 트랜지스터 부분과 포토다이오드 부분의 에너지 흡수량과 성능 저하의 관계를 파악하는 것을 목표로 하였다.

재료 및 방법

1. 픽셀 방사선 조사

본 연구에서는 정질 실리콘 대면적 영상센서에 사용된

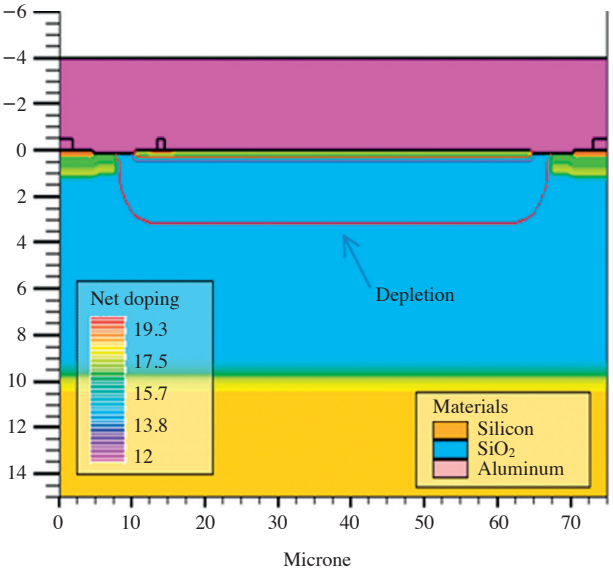

Fig. 1. Cross section of the photodiode.

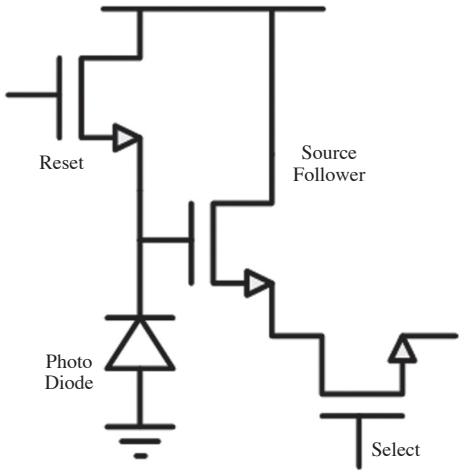

Fig. 2. Circuit diagram of 3 transistors image sensor.

픽셀과 같은 픽셀로 55 μm×55 μm의 픽셀 크기를 가지며, 각각의 픽셀은 3개의 트랜지스터와 1개의 포토다이오드로 이루어진 구조(3T APS (Active Pixel Sensor)) (El 2002)를 사용하였다. 포토다이오드는 p-type epitaxial 웨이퍼 층에 boron을 도핑하여 Fig. 1과 같이 Nphoto/Pepi 구조를 적용하였다(Wuu *et al*. 2001).

픽셀의 회로부분은 Fig. 2에 나타난 회로도처럼 리셋, 소스 팔로워 그리고 셀렉트 트랜지스터로 이루어져 있다.

리셋 트랜지스터는 포토다이오드에 전하를 가득 채우는 역할을 하고, 빛이 포토다이오드에 인가되면 가득 찬 전하가 포토다이오드를 떠나 접지로 흐르게 된다. 포토다이오드에 담긴 전압 신호는 소스 팔로워를 통해서 데이터를 획득하는 단으로 움직이는데, 이때 셀렉트 트랜지스터가 동작하

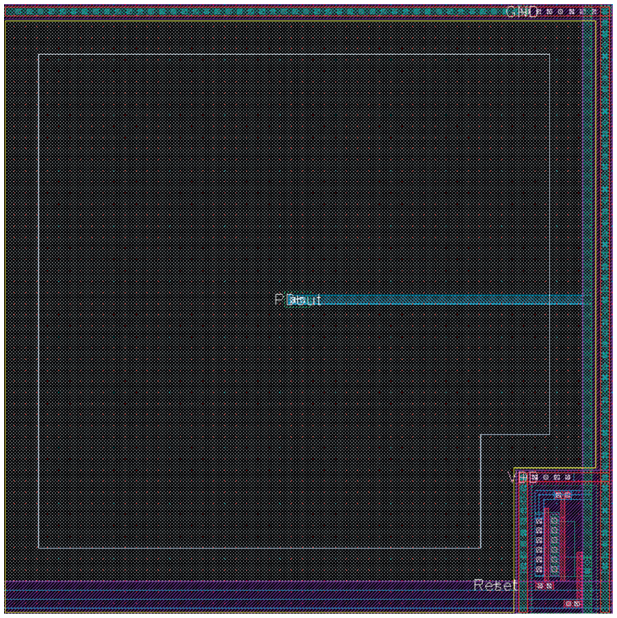

Fig. 3. Layout of the single pixel image sensor.

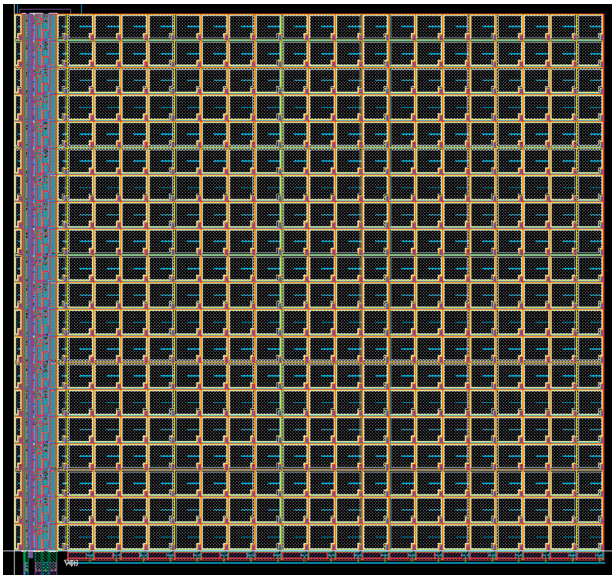

Fig. 4. Picture of 20×20 pixel array.

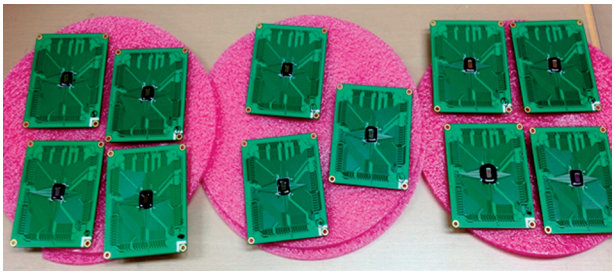

Fig. 5. Picture of irradiated 20×20 array sensors.

Fig. 6. A high-level gamma irradiation facility of KAERI at Jeongeup.

면서 신호를 얻는 스위치 역할을 하게 된다. 따라서 3개의 트랜지스터에서 방사선에 의한 결함이 발생하게 되면 전류가 각각의 트랜지스터를 넘어 흐르게 되고 이는 원하지 않는 신호로서 작용하게 된다 (El and Eltoukhy 2005).

회로부분과 금속 라인 부분은 알루미늄 가드링으로 모두 커버된 형태로 엑스선으로부터 받는 영향을 최소화하도록 설계된 픽셀이다. 실험에 사용된 픽셀은 0.35 μm 1P3M을 사용하였다. 전체 픽셀의 lay-out은 Fig. 3과 같이 설계되었다.

소형화 된 픽셀 어레이는 Fig. 4와 같이 20×20의 픽셀 어레이로, Fig. 5와 같이 총 11개의 센서 샘플을 사용하였으며, 각각의 센서는 PCB에 와이어 본딩을 하여 제어 신호 입출력, 데이터 입출력이 가능하도록 제작하였다.

실제적으로 센서에 조사되는 엑스선은 사용되는 용도에 따라 20 keV부터 150 keV 사이의 에너지를 갖는 것이 일반적이며, 센서와 엑스선 사이에 검사 대상체와 섬광체로 인해 픽셀에 도달하는 방사선의 양은 조사된 양보다 매우 적다. 그러나 센서의 사용이 지속되면서 쌓이는 방사선의 양을 고려해야 하기 때문에 본 연구에서 고에너지 방사선을 픽셀에 조사하기 위하여 방사선 조사는 Fig. 6에 나타나 있는 정읍의 방사선 조사연구시설에서 Co-60을 사용하는 고준위 감마선 조사장치를 사용하였다.

11개의 픽셀 어레이 중 1개는 기준 픽셀로 방사선 조사를 하지 않고 나머지 10개의 픽셀에 1 kGy에서 9 kGy까지 1 kGy 단위로 상승시키면서 Co-60을 이용하여 방사선을 조사하였으며, 픽셀은 바이어스가 걸리지 않은 상태에서 조사하였다. 방사선 조사를 마친 센서 10개는 기준이 되는 센서와 성능 비교를 하였다. 성능비교는 기존에 잘 알려진 문제인 리셋 트랜지스터 결함으로 인하여 발생하는 리셋 전압 값의 변화를 비교하였으며, 빛이 없는 상태에서 발생하는 전류인 암흑상태전류를 비교하였다.

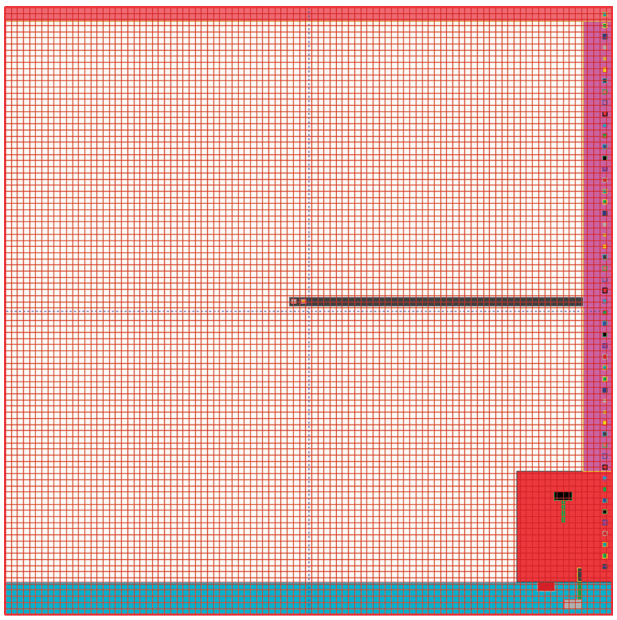

Fig. 7. The pixel structure for MCNP simulation.

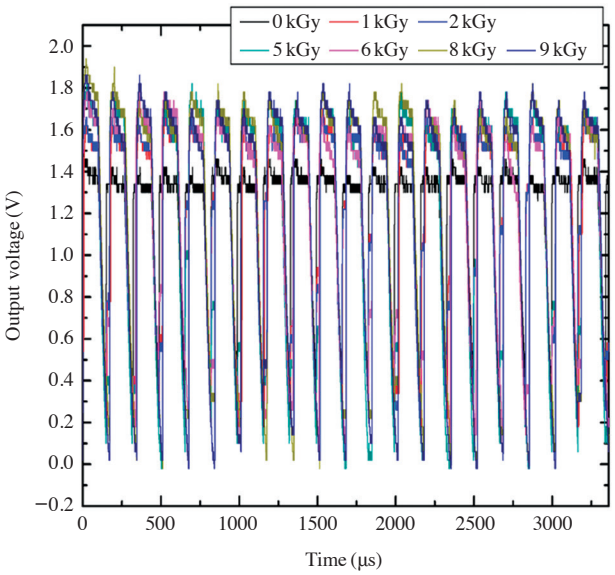

Fig. 8. Plot of output voltages of irradiated pixels.

2. 픽셀 시뮬레이션

방사선 조사 시뮬레이션은 Monte Carlo N-Particle (MCNP)를 이용하였다. 시뮬레이션은 픽셀 내부에서 방사선 민감하게 반응하는 트랜지스터와 포토다이오드에 어느 정도의 에너지가 전가되는지 확인하기 위하여 전체 20×20 픽셀 어레이를 모사하지 않고 단일 픽셀을 모사하였다. 실제 픽셀은 55 μm×55 μm의 픽셀크기, 800 μm 높이의 실리콘 웨이퍼 위에 회로가 적층되는 구조이다. 그러나 시뮬레이터의 효율성을 높이기 위해 실제 사이즈의 1000배로 크게 만들어 시뮬레이션을 진행하였으며, 방사선에 의한 결함이 성능저하를 일으키는 실리콘만 시뮬레이션을 진행하기 위해 800 μm 중에 가장 위쪽 부분의 2 μm만 시뮬레이션에 적용하였다. 따라서 시뮬레이션 상에서 모사된 픽셀은 55 mm×55 mm×2 mm의 크기를 갖는 웨이퍼에 회로를 적층하여 3.1135 mm가 추가되어 5.1135 mm의 높이를 갖는 동일한 구조의 대형 픽셀을 모사하였다. 모사된 픽셀의 구조는 Fig. 7에 나타나 있다.

시뮬레이션에서 사용된 소스는 실제 실험과 동일한 에너지를 갖도록 Co-60을 모사하여, 1.17 MeV와 1.33 MeV를 동일한 비율로 조사하였다. 조사된 에너지는 100×100×10의 메쉬에 볼륨당 쌓이는 에너지 (MeV)를 계산하였으며, 각각의 중요 부분은 Z축을 기준으로 3개의 구간으로 나누었다. 가장 상위층에는 실제 픽셀과 동일하게 알루미늄 가드링이 들어가기 때문에 제외되었으며, 최하단부에서 실리콘의 디플리션 영역 이하도 제외하였다. 따라서 실리콘의 디플리션 영역과 웨이퍼 위에 적층된 회로와 포토다이오드 전부분 그리고 마지막으로 회로부분에 대한 계산을 수행하였다. MCNP 시뮬레이션을 통해 나온 결과는 각각의 voxel에 쌓인 에너지이다.

결과 및 논의

1. 방사선 조사 결과

픽셀은 리셋 트랜지스터와 셀렉트 트랜지스터에 의해 제어되고 제어신호는 로우 드라이버를 통해 픽셀 내부로 전해진다. 조사하지 않은 기준픽셀과 조사된 픽셀들의 차이점을 명확하게 보기 위하여 제어신호는 픽셀이 완전한 동작을 할 수 있게 충분한 시간을 줄 수 있도록 길게 인가하면서 센서들의 데이터 출력 값, 암흑상태전류 그리고 리셋전압 변화를 확인하였다. 각각의 센서당 20개의 픽셀에서 출력하는 전압 값, 암흑상태전류, 리셋전압을 평균낸 후, 방사선 조사량에 따라서 알아보았다. 실험 도중 3, 4, 7 kGy를 조사한 칩은 로우 드라이버의 파손으로 픽셀 어레이가 동작하지 않아 테스트 결과를 얻을 수 없었으나, 다른 칩들에 의한 경향성은 파악할 수 있었다.

1) 데이터 출력변화

방사선에 조사된 센서와 조사하지 않은 기준 센서에서 데이터의 출력을 확인하였다. 3.3 V 동작 전압 범위에서 출력되는 기준 센서의 전압은 1.4 V 정도이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 정상 센서는 시간이 지나도 최대치 1.4 V 정도를 출력하지만 방사선에 조사되는 센서들은 더 높은 값을 출력하

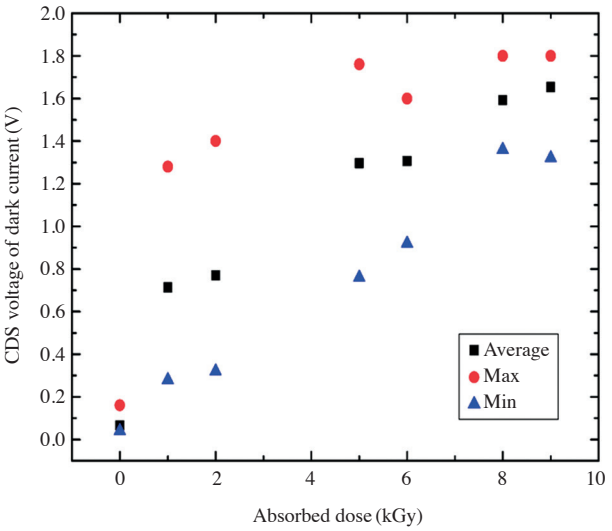

Fig. 9. Plot of dark current verses absorbed doses indicated by CDS voltages.

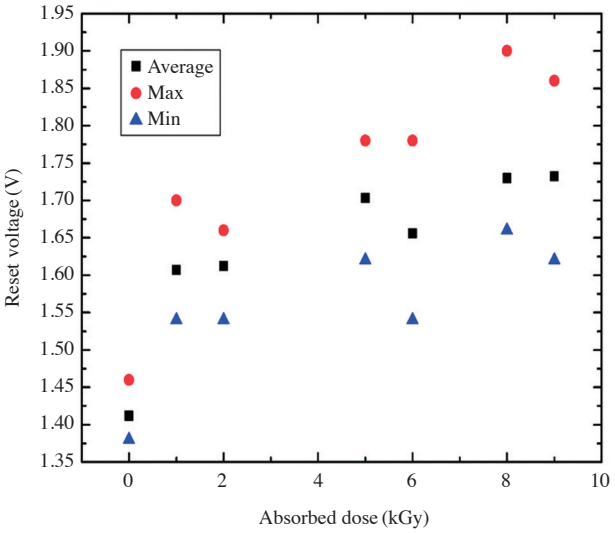

Fig. 10. Plot of reset voltage verses absorbed doses.

는 것을 확인할 수 있다. 1 kGy와 2 kGy가 조사된 센서의 최대전압인 1.6 V부터 8 kGy와 9 kGy가 조사된 센서에서 1.8 V 이상의 전압이 출력되고 있으며, 방사선 양에 관계없이 일정하지 않게 출렁이는 값을 출력하는 것을 볼 수 있다.

2) 암흑상태전류 변화

암흑상태전류는 빛이 인가되지 않은 상태에서 전류가 옆으로 흐르거나, 온도에 의하여 전류가 비정상적으로 흐르면서 발생하는 잡음이다. 암흑상태전류는 리셋 전압과 신호의 전압 값의 차이를 나타내는 Correlated Double Sampling (CDS)기법을 통하여 간접적으로 얻을 수 있다. Fig. 9에서 나타난 전압 값의 차이를 보면, 조사를 하지 않은 센서에서

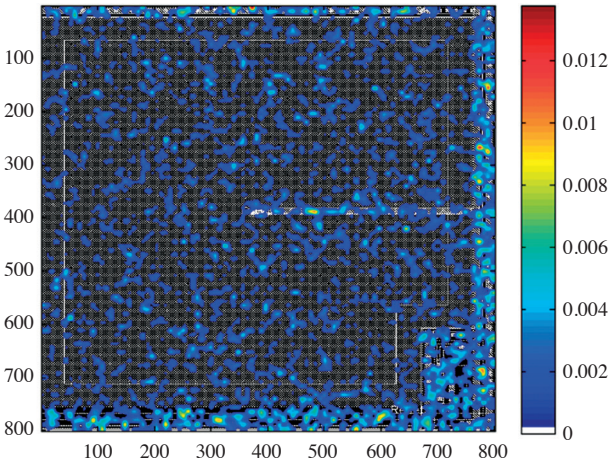

Fig. 11. Absorbed energy distribution of the entire pixel.

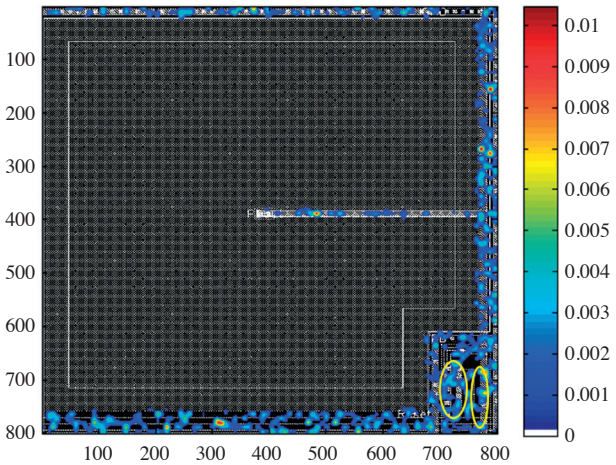

Fig. 12. Absorbed energy distribution of the circuit part.

는 CDS 전압의 최대값이 0.2 V를 넘지 않지만 방사선에 조사된 센서는 방사선양이 늘어남에 따라 지속적으로 증가하고 있다. 또한 CDS 전압의 범위도 조사된 센서들은 넓은 영역 (최대 최소 차이: 1 V)에서 변화하고 있는 것을 확인 할 수 있다. CDS 전압은 방사선양이 늘어남에 따라 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3) 리셋 전압의 변화

리셋전압은 기준이 되는 센서에서 1.4 V정도로 최대값이 1.5 V를 넘지 않는 상태이다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 1~2 kGy로 본 실험에서 가장 낮은 방사선양이 조사된 센서에서 평균치 1.6 V로 크게 변화하지만 방사선양이 늘어남에 따른 변화량은 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 1.75 V에서 수렴하는 양상을 확인할 수 있다. 또한 암흑상태전류와 마찬가지로 각각의 어레이 안에 있는 픽셀들에서 나타나는 전압의 변화폭도 방사선 조사양이 늘어남에 따라 더 넓어지는 것을

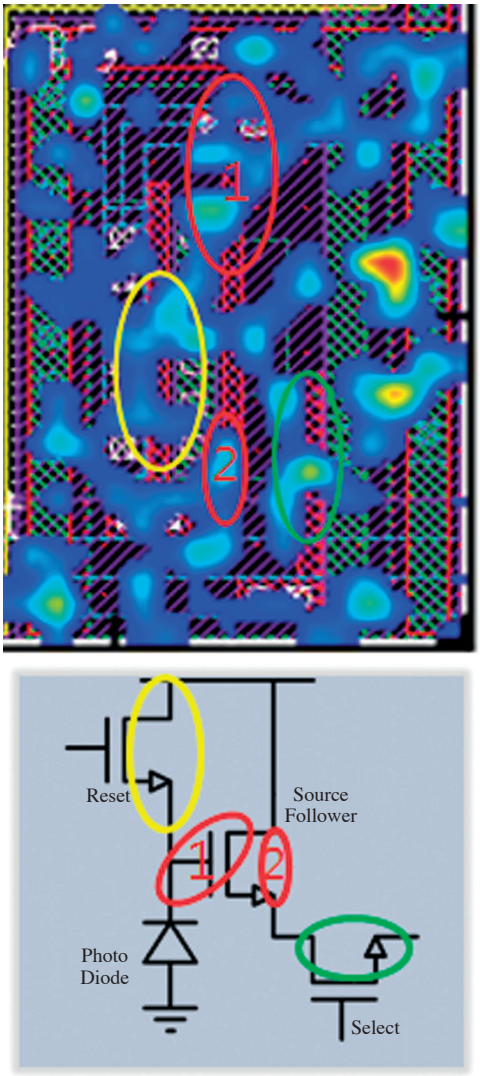

Fig. 13. Absorbed energy distribution of 3 transistors.

확인할 수 있다.

2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 결과는 픽셀전체부분으로 2 μm의 실리콘 웨이퍼에서 디플리션 영역인 실리콘 상단의 0.5 μm와 회로를 포함한 영역과 실리콘 웨이퍼 위쪽에 설계된 회로 영역에 각각 쌓이는 에너지를 나타낸다. 각각의 에너지 흡수는 실제 픽셀의 lay-out 위에 나타내어, 방사선 조사가 일어나는 부위의 위치확인이 가능하도록 하였다.

1) 픽셀 전체

Fig. 11은 포토다이오드 부분의 넓은 영역에서 방사선 흡수가 일어나는 것을 나타내고 있다. 그리고 회로가 있는 부분과 메탈 라인들이 지나가는 부분에서 집중적으로 에너지가 쌓이는 것을 확인할 수 있었다. 포토다이오드의 넓은 영역에서 발생하는 에너지 흡수로 인한 포토다이오드의 결함이 발생하였다. 포토다이오드에서 흡수한 에너지는 포토다이오드 부분에 있는 실리콘 옥사이드 부분의 결함이 발생시키고, 이는 방사선 조사 실험에서 나타난 암흑상태전류의 증가의 원인이 되었다고 생각한다.

2) 회로부분

회로 부분에 쌓이는 에너지는 Fig. 12에서 볼 수 있다. Fig. 12에서 노란색으로 표시된 부분은 트랜지스터에 쌓이는 에너지로 회로 전체에 쌓인 에너지의 평균값인 0.001245 MeV보다 높은 0.004 MeV 이상의 값을 나타내고 있다. Fig. 13은 회로 부분만 확대한 이미지로 3개의 트랜지스터의 채널에서 많은 양의 방사선이 흡수되는 것을 볼 수 있으며, 트랜지스터의 채널에서 흡수된 방사선은 생기는 결함은 메탈라인의 결함을 발생시키고, 이러한 결함을 통해 각각의 트랜지스터에서 전자가 의도하지 않게 흘러, 방사선 조사실험에서 리셋 전압이 증가하는 결과와 암흑상태전류가 증가하는 현상이 발생했을 것이라고 판단된다.

결 론

정질 실리콘 기반의 엑스선 영상센서에 포함된 포토다이오드의 표면과 안쪽의 SiO_2 구조가 방사선에 의하여 파손되면, 원래의 자리가 비어 정공이 형성된다. 일반으로 센서 내부에서는 온도와 주변 환경에 의하여, 빛이 없는 완전한 암흑이어도 전자가 발생하고 재결합하게 되는데, 방사선으로 인하여, 결함이 많을 경우 발생한 전자와 정공이 재결합하면서 신호를 발생시켜 암흑상태전류가 증가하게 된다. 이러한 결과는 방사선 조사실험과 시뮬레이션에서 같은 경향을 보인다. 그러나 방사선 증가량에 따른 암흑상태전류의 변화는 방사선량이 증가함에 따라 변화율이 줄어들고 있으며, 전압의 최대 최소구간 또한 좁아지는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 회로부의 소스 팔로워 부분에서 베이스 영역의 방사선 노출로 포토다이오드와 VDD가 소스 팔로워를 통해서 도통 상태가 되어 전류가 VDD에서 포토다이오드로 흐르면서 포토다이오드를 충전하기 때문에 나타난다고 생각된다.

방사선 노출에 의해 발생한 리셋 전압의 증가의 한 원인은 리셋 트랜지스터의 저항감소이다. 정상적인 트랜지스터는 특정 저항성분을 갖고 있지만 방사선조사로 인한 결함으로 트랜지스터의 소스와 드레인이 서로 도통 상태가 되면서 저항이 줄어들게 된다. 저항성분의 감소는 해당 트랜지스터를 지나는 전류의 흐름을 원활하게 하기 때문에 트랜지스터에서 소모되는 전압이 줄어들어, 리셋전압이 상승한 것으로 판단되어진다. 또한 소스팔로워는 리셋 전압으로 가득 차

있는 포토다이오드가 빛과의 반응으로 신호를 만들 때, 전류를 밀어주는 역할을 하지만, 소스팔로워의 결함으로 소스와 드레인의 도통이 되면서, 항상 일정량의 전류가 흐르게 된다. 따라서 신호가 발생하여 리셋 전압이 감소할 때, 이미 흐르고 있는 전류로 인해 리셋 전압을 충분하게 하강시키지 못하기 때문에, 방사선 조사실험에서 보였던 리셋전압의 증가가 발생하였을 것이라고 판단되어진다.

본 연구에서 진행한 시뮬레이션은 시뮬레이터의 제한으로 인하여 스케일을 크게 하여 진행하였다. 픽셀의 크기가 커지면서 최상위 층의 두꺼운 메탈에 의한 콤프턴 산란이 발생할 수 있으며, 산란된 방사선이 시뮬레이션 결과에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 픽셀의 스케일 변화가 없어도 시뮬레이션의 경향성은 같을 것으로 생각되어진다.

사 사

This work was supported by the Nuclear Research & Development Program of the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korean government (MSIP) (grant code : 2010-0026094).

참 고 문 헌

허 영. 2011. X선 의료영상기기 기술 및 산업동향. *KEIT PD Issue Report* **11**(9):93-121.

El Gamal. 2002. Trends in CMOS image sensor technology and design. IEEE. Electron Devices Meeting. IEDM′02. International. 805-808.

El Gamal A and Eltoukhy H. 2005. CMOS image sensors. *IEEE. Circuits and Devices Magazine* **21**(3):6-20.

Goiffon V, Virmontois C, Magnan P, Cervantes P, Corbiere F, Estribeau M and Pinel P. 2010. Radiation damages in CMOS image sensors: testing and hardening challenges brought by deep sub-micrometer CIS processes. International Society for Optics and Photonics. In Remote Sensing. 78261S-78261S.

Gordon RH, Ali M and Reno HS. 2004. Radiation effects on a radiation tolerant CMOS active pixel sensor. *IEEE Trans. on Nuclear Science* **51**:2753-2762.

Tan J and Theuwissen AJP. 2012. Investigation of x-ray damage effects on 4T CMOS image sensors. IEEE. In Semiconductor Conference Dresden-Grenoble (ISCDG), 2012 International. 131-134.

Wuu SG, Chien HC, Yaung DN, Tseng CH, Wang CS, Chang CK and Hsaio YK. 2001. A high performance active pixel sensor with 0.18 μm CMOS color imager technology. IEEE. In Electron Devices Meeting 2001. IEDM′01. Technical Digest. International. 24-3.

Received: 8 February 2015
Revised: 19 February 2015
Revision accepted: 22 February 2015