

논문 99-8-2-01

상용 p-MOSFET을 이용한 방사선 선량계 개발

°이남호, 최영수, 이용범, *육근억

Development of Radiation Dosimeter using Commercial p-MOSFET

°Namho Lee, Youngsu Choi, Yong B. Lee, and *Geunuck Youk

요 약

반도체 센서(p-MOSFET)가 이온화 방사선에 노출되면 산화층내에 전자-정공이 생성되고, 이들 중에서 이동도가 낮은 정공은 이동중 산화층내에 트랩(trap)되어 센서의 출력 특성을 변화시킨다. 본 논문에서는 p-MOSFET를 방사선 누적선량 모니터링 센서로 활용하기 위해 국산 및 일산의 상용 p-MOSFET를 Co-60 γ 선원을 갖춘 고준위 조사시설에서 조사한 후 출력특성의 변화를 분석하였다. 방사선 조사실험 결과 p-MOSFET는 조사된 누적 방사선량에 비례하여 문턱전압(threshold voltage, V_T)이 변화됨과 이 변화에는 선형적 특성을 지님을 알 수 있었다. 본 논문의 결과를 통하여 저가의 상용 p-MOSFET를 이용한 우수한 성능의 방사선 누적선량 모니터링 센서를 개발할 수 있음을 확인하였다.

Abstracts

When a metal oxide field effect transistor (MOSFET) is exposed to ionizing radiation, electron/hole pairs are generated in its oxide layer. The slow moving holes of them are trapped in the oxide layer of p-MOSFET and appear as extra charges that change the characteristics of the transistor. The radiation-induced charges directly impact the threshold (turn-on) voltage of the transistor. This paper describes the use of the radiation-induced threshold voltage change as an accumulated radiation dose monitoring sensor. Two kinds of commercial p-type MOSFETs were tested in a Co-60 gamma irradiation facility to see their capabilities as a radiation dosimeter. We found that the transistors showed good linearity in their threshold voltage shift characteristics with radiation dose. The results demonstrate the potential use of commercial p-MOSFETs as inexpensive radiation sensors for the first time.

1. 서론

원자력 관련시설이나 우주 공간, 암치료 센터 등에서 발생하는 방사선원 및 방사선량은 정확히 감지되어야 할 필요가 있다. 방사선감지 센서는 사용장소, 방사선원의 세기 및 선원의 종류에 따라 다양한 형태 및 방법으로 개발되어 있으며 각기 고유의 특성을 지니고

있다(그림 1). 반도체형 방사선 센서는 소형, 경량, 그리고 저전력 소모 측면에서 우수하다는 것이 다른 센서류와 비교되며, 반도체 센서중 게르마늄(Ge)계열 센서는 별도의 대형 냉각장치가 필요하지만 냉각장치가 필요 없는 실리콘(Si)계열 센서는 극소형으로 제작이 가능하다는 이점이 있다¹⁾.

따라서 한국원자력연구소에서는 아직 세계적으로 개발된 적이 없는 최초의 시도로서 원자력시설내 각종 기기 및 설비, 그리고 로봇과 카메라 같은 장비들의

° 한국원자력연구소(KAERI)

* Inventors' Enterprise, Inc. USA

<접수일자 : 1998년 11월 21일>

방사선 영향 평가와 이들의 수명예측, 방사선에 의한 오동작을 방지하기 위한 목적으로^[2] 소형, 경량으로 사용이 손쉬운 실리콘 계열 통합 방사선 센서 모듈을 개발하고 있다. 이 통합센서 모듈은 실리콘 다이오우드, MOSFET, 그리고 GM 튜브의 세 가지 센서를 통합하여 하나의 센서 모듈에서 α , β , γ , χ 선 및 중성자(n) 등의 종류와 세기를 실시간으로 감지할 수 있도록 한 것이 특징이다(그림 2).

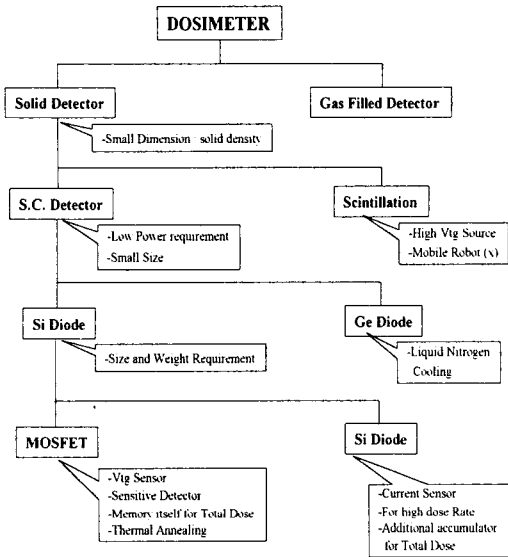


그림 1. 방사선 센서의 종류
Fig. 1. Sensors for Radiation Detection.

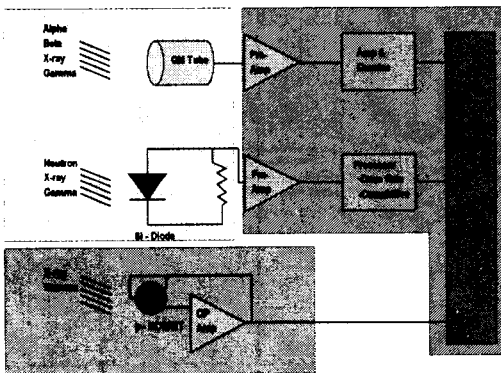


그림 2. 이동 로봇용 통합방사선센서기
Fig. 2. Integrated Radiation Sensors for Mobile Robot.

p-MOSFET를 이용한 방사선 센서는 방사선 피폭량의 측정시 센서 값을 읽을 때 필요한 특수 측정용 디

바이스나 순간 방사선 값을 누적값으로 변환하기 위한 부가회로 구성이 필요하지 않아 소형제작이 가능하며, 습한 고온의 지역에서도 사용이 가능하다는 장점도 있다^[3].

이러한 p-MOSFET를 이용한 방사선 선량계를 본 논문에서는 아래와 같은 응용분야에 사용하기 위해 개발하고 있으며 표1과 같이 방사능 세기에 따라 다양한 응용분야에 사용할 수 있다^[4]. 이러한 형태의 센서는 최근 일부 선진외국에서 우주항공 및 위성체의 누적 방사선 센서로서 특수하게 제작되고 있는 상태이며, 특히 최근 캐나다에서는 CANDU형 원자로의 정상운전시의 방사선량을 측정하기 위한 최초의 시도에서 특별 제작한 p-MOSFET 센서를 사용한 적이 있다^[3].

표 1. 방사선 세기에 따른 p-MOSFET 도시미터의 응용분야

Table 1. Application Areas of p-MOSFET Dosimeter according to Dose Rate.

응용 분야	Nuclear Equipment							
	Space							
	Therapy							
	Personal							
Rad	1	10	100	1K	10K	100K	1M	10M

본 논문에서는 통합 방사선 센서 모듈에 사용되는 γ 선 모니터링 역할의 p-MOSFET 방사선 센서 개발에 관련한 연구 결과에 대하여 논하였다. p-MOSFET를 방사선 누적선량 모니터링 센서로 활용하기 위해 국산 및 일산의 상용 p-MOSFET를 Co-60 γ 선원을 갖춘 고준위 조사시설에서 조사한 후 출력특성의 변화를 분석하였다. 방사선 조사실험 결과 p-MOSFET는 조사된 누적 방사선량 비례하여 문턱전압(threshold voltage, V_T)이 변화됨과 이 변화에는 선형적 특성을 지님을 알 수 있었고, 이 결과를 통하여 저가의 상용 p-MOSFET를 이용한 우수한 성능의 방사선 누적선량 모니터링 센서를 개발할 수 있음을 확인하였다.

2. 반도체를 이용한 방사선 계측의 원리

p-MOSFET는 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체 소자의 일종으로 그림 3과 같은 구조로 되어 있다. p-MOSFET는 소자내 산화물층(SiO_2)으로 절연된 게이

트의 인가 전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 문턱전압 V_T 이상이면 작동(on)하고, 그 이하이면 정지(off)하게 된다. 이 V_T 값(그림 4)은 p-MOSFET를 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수로서, 방사선에 조사될 경우 V_T 값의 변위현상이 나타나는데 방사선 센서는 이 V_T 변위현상을 이용한다.

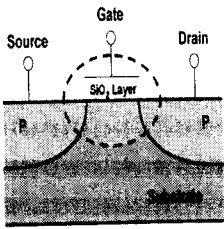


그림 3. p-MOSFET 단면도
Fig. 3. Cross section of p-MOSFET.

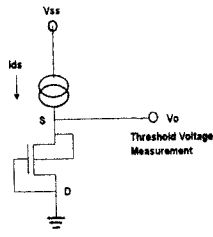


그림 4. p-MOSFET 회로도
Fig. 4. Circuit Diagram of p-MOSFET.

그림 5는 p-MOSFET 소자내 주 관심 영역인 산화물층을 확대한 것으로 이온화 방사선에 피폭될 경우 산화물층 원자간의 공유 결합이 끊어져 피폭 방사선량에 비례하는 이동이 가능한 전자와 정공이 생성된다. 이 전자와 정공은 생성 직후 재결합하기도 하지만 상당수는 산화층에 형성된 전계 방향에 따라 이동하게 된다^[5].

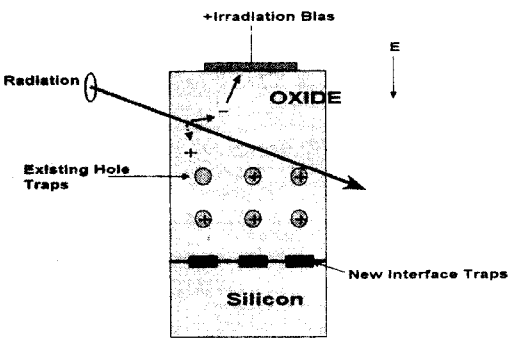


그림 5. 방사선 피폭시 p-MOSFET의 게이트 산화물층 내 전하이동 매커니즘
Fig. 5. The mechanism of charge move in SiO_2 in p-MOSFET as irradiated.

그림5와 같이 p-MOSFET의 게이트에 양의 전압이 걸릴 경우 정공에 비해 이동성이 아주 큰 전자는 빠른

속도로 게이트 전극으로 이동하여 산화층을 벗어나게 되며, 반면 이동도가 작은 정공은 서서히 기판을 향하여 이동한다. 이때 기판방향으로 이동하는 정공은 산화물층 내에 존재하는 SiO_2 의 불완전한 결합 형태에 갖혀 정공트랩으로 형성되기도 하고, Si/ SiO_2 결합층 계면에서도 트랩 상태로 축적된다^{[6][7]}. 이러한 정공트랩(hole trap)과 계면트랩(interface trap)이 p-MOSFET 경우 양(+)방향의 전계로 작용하므로 이 디바이스를 작동(turn on) 시키기 위해서는 새로 형성된 전계값 만큼 추가적인 전계를 가해주어야 한다. 이는 피폭 방사선에 비례하여 축적되는 전하의 전계만큼 더 많은 전압을 게이트에 인가해야만 소자를 작동시킬 수가 있다는 것을 의미하는데 이를 방사선 피폭량에 비례하는 V_T 의 변위현상이라 한다. 그림 6은 이러한 방사선 피폭량에 따른 V_T 의 변위현상, 즉 전류-전압 특성을 도시한 것으로서 방사선 조사에 따른 p-MOSFET의 전류-전압 출력특성 변화를 도시한 것이다. 방사선에 노출되지 않은 p-MOSFET의 출력특성은 제일 왼쪽 곡선이며 방사선에 노출되어 피폭 방사선량이 증가할수록 출력특성 곡선은 점차 오른쪽으로 이동하게 된다.

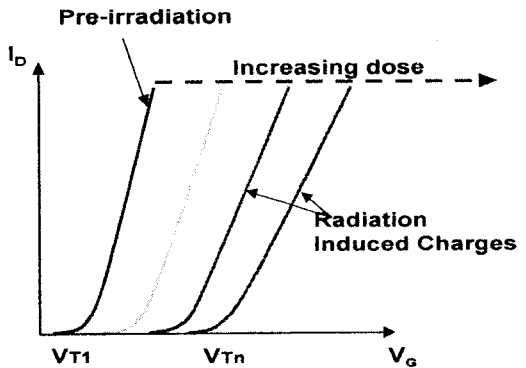


그림 6. 방사선 피폭에 의한 출력특성변화 V_T 정의
Fig. 6. Output Characteristics Change caused by Irradiation and the V_T .

p-MOSFET 타입 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 민감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다. p-MOSFET 방사선 센서의 감도를 조절하기 위해서는 게이트 전극에 인가하는 전압의 세기, 게이트 산화물 층의 두께를 조절하거나, 게이트를 이중 구조형으로 특수 제작하는 방법이 있다. 일반적으로 방사선의학분야와 개인 선량계로 사용되는 p-MOSFET의 감도는 원자력이나 우주에서 사용될 때 보다 감도가 높아야 한다.

3. 실험

상용 p-MOSFET의 방사선 선량계로의 이용 가능성을 타진하기 위해 Co-60 고준위 γ 선 조사시설에서 방사선 조사 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 p-MOSFET 소자로는 테스트를 거쳐서 전기적 출력특성이 동일한 것들로 선별된 삼성반도체의 IRF9533과 Hitachi사의 J182 소자를 사용하였다(그림 7). 실험에서 소자들은 직사각형 형태의 Co-60 γ 선원으로 부터 계산된 정확한 위치에 놓이도록 그림 9와 같이 배치하였다. 이때 미리 계산된 정확한 방사선 조사선량이 조사 되도록 브레드보드에 고정된 p-MOSFET 소자들은 테이블 바닥으로부터 20cm 높이에 설치하였다.



그림 7. J182와 IRF9533의 외형
Fig. 7. Shape of J182 & IRF9533.

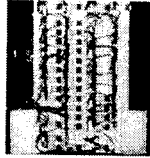


그림 8. 실험에서 사용한 기판
Fig. 8. Bread board in test.

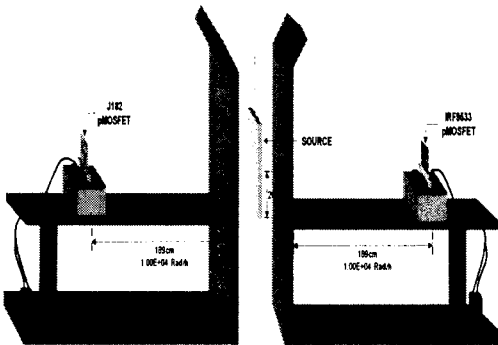


그림 9. 고준위조사시설내 실험 장치
Fig. 9. Test Set in High-Level Irradiation Facility.

표 2. Co-60 방사선 조사방법
Table 2. Irradiation Method of Co-60.

Step	1	2	3	4	5	6	7
Distance(cm)	189	189	189	189	189	189	71
Dose Rate(KRad/h)	10	10	10	10	10	10	50
Total Hour(min)	6	12	30	60	120	300	360
Total Dose(KRad)	1	2	5	10	20	50	100

방사선 조사 시 그림 8과 같이 브레드보드에 총 35개의 샘플을 고정한 후, 7 단계로 나누어 사전에 정해진 방사선량이 조사된 5개씩의 샘플을 수거하여 오프라인(off line)으로 전기적 특성변화를 측정하였다. 방사선 조사시 p-MOSFET의 게이트 전극에 DC 6V의 전압을 인가하고, 소스와 드레인을 그라운드에 접지 시켰는데, 이는 방사선 피폭으로 인해 분리된 전자와 정공이 즉시 재결합하는 것을 막음으로서 방사선에 대한 감도를 높이기 위해서이다. 총 조사 방사선의 최대량은 100KRad로 설정하고 이에 따른 조사율은 시간당 10KRad/h가 되도록 했다. 표 2에서 처럼 7 단계의 서로 다른 총방사선량을 피폭하기 위해 1~6 단계까지는 p-MOSFET를 선원으로부터 189cm의 거리에 위치하도록 고정한 다음(10KRad/h), 시간을 조절하여 총 방사선 피폭량이 조절되도록 하였으며 7 단계는 실험 시간을 줄이기 위해 선원으로부터 거리를 71cm에 두고 순간 선량 50KRad/h, 총 피폭시간 360분, 총 피폭선량 100KRad가 되도록 하였다. 즉, 총 100KRad 방사선 범위를 관찰하려면 10KRad/h 위치에서는 10시간 피폭시켜야 하므로 마지막 단계에서는 방사선원으로부터 거리를 가깝게 하여 보다 강하게(50KRad/h) 조사되도록 하여 실험 시간을 단축시켰다. 실험에서는 p-MOSFET의 방사선 영향 회복현상인 어닐링(annealing) 효과를 최대한 줄이기 위해 각 단계별로 p-MOSFET를 수거할 때 필요한 방사선 조사 중단시간을 최소로 줄였다.

4. 결과

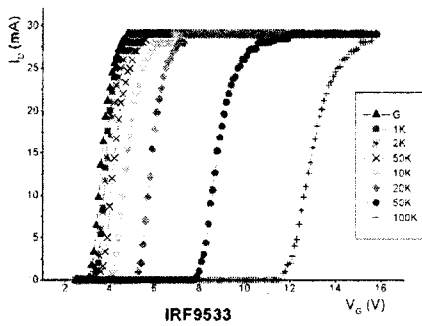
방사선에 조사된 샘플 소자들은 어닐링 효과를 최소화하기 위해 조사 실험 직후 동시에 전기적 특성을 측정하였다. 측정시 문턱 전압을 측정하기 위해 약한 드레인 전압(-50mV)을 인가하여 약 반전층(weak inversion layer)을 형성시킨 후 게이트 전압을 가변하면서 드레인 전류를 측정하였다. 실험에 사용된 IRF9533과 J182의 출력특성은 그림 10과 같으며 이 출력특성 커브를 분석한 결과 방사선 조사량에 따라 출력 특성커브가 오른쪽으로 이동됨을 알 수 있었다.

방사선 조사량을 결정짓는 V_T 값은 출력특성 곡선의 선형 구간에 대한 선형외삽법(linear extrapolation)을 통해 구해진 직선의 식 $Y = mX + n$ 에서 구할 수 있다. 그림 11은 50KRad의 Co-60에 조사된 후 측정된

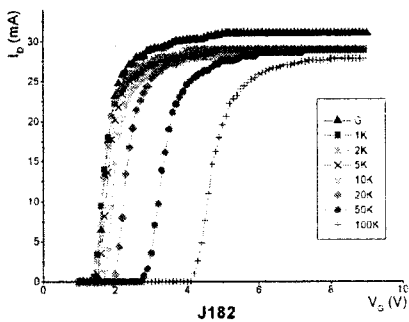
J182 p-MOSFET의 출력 특성곡선이다. 이 곡선은 게이트 전압의 증가에 대한 드레인 전류의 변화 값을 나타낸 것으로서 이 값들의 미분치는 곡선 각 지점에서의 트랜스컨덕턴스($g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G}$)를 나타낸다. 그림에서와 같이 최대 트랜스컨덕턴스 변화 값을 가지는 B점을 구한 후 그 지점으로부터 낮은 값으로 선형 외삽을 하게 되면 식(1)과 같이 되며,

$$Y = 32 * X - 95.88 \quad (식 1)$$

이 직선의 X 절편 값에서 구하고자 하는 V_T 값 - 3V를 얻을 수 있다. 이 방법을 적용하여 두 소자의 총 누적 방사선에 대한 V_T 값은 표 3과 같다.



(a) IRF9533 p-MOSFET



(b) J182 p-MOSFET

그림 10. 출력 특성
Fig. 10. Output Characteristics.

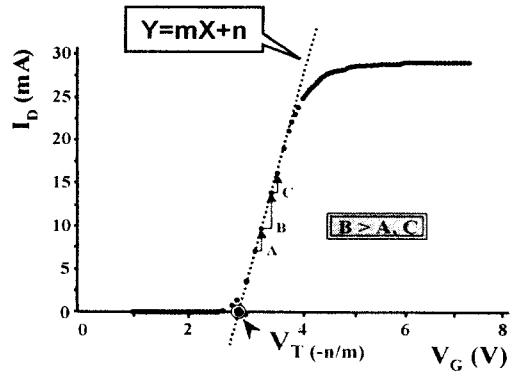


그림 11. 출력특성곡선에서 V_T 추출
Fig. 11. Extraction of V_T from I-V Curve.

표 3. 방사선 피폭량에 따른 변화된 V_T
Table 3. V_T Shift according to radiation dose irradiated.

Dose(KRad)	V_T Shift (-n/m)	
	IRF9533	J182
0	3.26	1.49
1	3.41	1.52
2	3.42	1.56
5	3.8	1.62
10	4.2	1.8
20	5.3	2.1
50	8.06	3
100	11.9	4.32

그림 12에서는 피폭량의 변화값에 대한 V_T 의 변화특성을 나타내었다. 그림 12는 방사선 총 피폭량이 V_T 의 변화에 어떠한 영향을 미치는가 하는 것을 보여주는데, 총 피폭량에 따른 V_T 변화가 거의 선형적으로 비례하므로 이상적인 선량계로서의 충분한 가능성을 시사한다. 이렇게 우수한 선형특성은 방사선 선량계를 목적으로 특수 설계한 p-MOSFET에서도 얻기 힘든 우수한 것으로 평가된다.

또한 이 그림은 linear fitting에 의한 직선의 방정식으로 부터 방사선 총 피폭량과 V_T 변화의 관계를 구할 수 있음을 보여준다. 표 4는 IRF9533과 J182 소자에 대한 방사선 누적 선량 측정 직선방정식($Y = a * X + b$)으로서, IRF9533의 경우 직선 방정식의 상수 a, b 값이 3,368과 0.087이며, J182의 경우 1.506, 0.629임을 보여준다. 즉 방사선 누적선량 값(Y)은 IRF9533의 경우

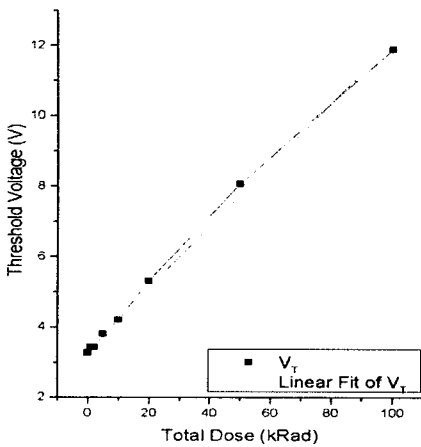
V_T (X)의 함수

$$Y = 3.358 \cdot X + 0.087 \quad (\text{식 2})$$

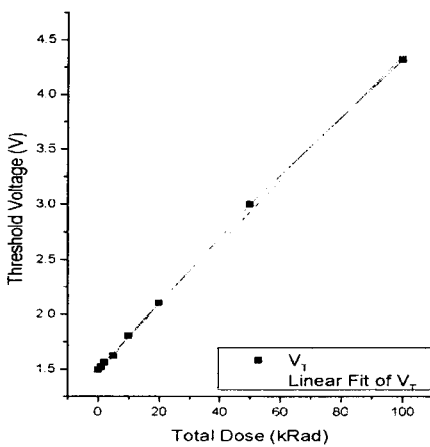
로 나타낼 수 있으며, J182의 경우에는

$$Y = 1.506 \cdot X + 0.629 \quad (\text{식 3})$$

이 된다.



(a) IRF9533 p-MOSFET



(b) J182 p-MOSFET

그림 12. 누적 방사선 피폭선량 대 V_T 변이

Fig. 12. Accumulated Radiation Dose vs. V_T Shift.

표 4. 누적피폭량 vs. V_T 변화의 Linear Fitting 함수값

Table 4. Functions from Linear Fitting of Accumulated Dose vs. V_T Shift.

IRF9533	$Y(\text{total dose}) = aX(V_T \text{ shift}) + b$
	$a = 3.368, b = -0.087$
J182	$Y(\text{Total Dose}) = aX(V_T \text{ Shift}) + b$
	$a = 1.506, b = 0.029$

이상의 실험 결과 p-MOSFET 소자의 방사선 조사에 의한 V_T 출력특성 변위현상은 우수한 선형적 특성을 지님을 알 수 있었다. 따라서 이러한 선형적 함수관계를 이용하여 저가의 상용 p-MOSFET를 우수한 방사선 총 누적선량 모니터링 센서로서 개발할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 p-MOSFET를 이용하여 방사선 총 누적선량 모니터링 센서를 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 상용 국산 IRF9533 소자와 일산 Hitachi사의 J182 p-MOSFET소자를 Co-60 γ 선 고준위시설에서 미리 정한 여러가지 단계의 방사능 세기로 조사시키는 방사선 실험을 거쳐 특성을 분석, 고찰하였다. 실험결과 두 종류의 p-MOSFET 소자의 방사선 조사에 의한 V_T 변위현상을 직선함수로 근사시킬 수 있음을 알 수 있었고, 이 선형 함수관계를 이용하면 손쉽게 구할 수 있는 저가의 상용 p-MOSFET를 사용하여 우수한 성능의 방사선 총 누적선량 모니터링 센서를 개발할 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 연구결과를 통하여 일부 선진외국에서 특수 제작한 고가의 방사선 센서를 저가의 국산 상용의 p-MOSFET를 방사선센서로 대체 사용할 수 있음을 확인하였다. 현재 p-MOSFET 소자에 대한 자동 V_T 검출회로의 회로구현과 기 획득한 방사선에 대한 V_T 함수 관계를 통한 선량계의 하드웨어 제작을 진행중이다. 향후 다양한 응용분야에 적합한 다양한 센서 모듈의 개발과 더불어 Dose Rate와 어닐링의 영향에 대해서도 연구를 병행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음

6. 참고문헌

[1] P. N. Cooper, Introduction to Nuclear Radiation Detector, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 84~96, 1986.
 [2] G. U. Youk, J. S. Tulenko, H. Liu, and H. Zhou, "Radiation Hardening of Robotic Control components Against Terrestrial Radiation," Proceedings of 1995 Florida Conference on Recent Advances in Robotics, pp. 248~254, 1995.
 [3] G. Mackay, I. Thomson, C. R. Hirning, and M. Zeya, "Gamma-ray Dose Mapping in Operational

CANDU Reactor Containment Areas using MOS Dosimeters,"ASTM publication, pp. 441-446, 1994.
 [4] Andrew Holmes-Siedle, Leonard Adams, J. Stephen Leffler, and Steven R. Lindgren, "The RADFET System for Real-Time Dosimeter in Nuclear Facility," IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983.
 [5] Andrew Holmes-Siedle, "The Space-Charge Dosi-meter," Nuclear. Instruments. & Methods, vol. 121, pp. 169~179, 1974.
 [6] T. R. Oldham, F. B. McLean, H. E. Boesch Jr. and J. M. McGarrity, "An overview of radiation-interface traps in MOS Structure," Semicond. Sci., vol. 4, pp. 986~999, 1989.
 [7] McLean F. B., Boesch, H. E., and Oldham T. R. TR 1989, Charge generation, transport, and trapping in Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits, Wiley-Interscience, New York, 1989.

著 者 紹 介

이남호

「센서학회지 제5권 제5호」 논문96-5-5-07, p. 55 참조
 현재 : 원자력연구소 근무

이용범

「센서학회지 제5권 제5호」 논문96-5-5-07, p. 55 참조
 현재 : 원자력연구소 로봇핵심기술개발실장.



육근익

1957년생,
 1994 미 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) 공학물리학 박사,
 1997 - 현재 미 Vanderbilt대 선임 연구원, 1997 - 현재 미 Inventors' Enterprise사 사장, 1994 - 1996 미 Florida대 연구원, 1979 - 1991 한국 원자력 연구소, 팀장, 관심분야 : 방사선이 반도체에 미치는 영향 연구. 내방사선 로봇 전문가. 방사선 전자선량계 전문가. 내방사선 위성설계, 핵전쟁 대비 군용 전자장비/전투기/미사일 내방사선화 전문가. 우주방사선환경 연구. 내방사선센서 연구.



최영수

1966년생. 1994년 경북대 전자공학과 졸업(석사), 1995-현재 : 원자력연구소 근무, 관심분야 : 카메라, 로봇센서, 영상처리