'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

상용 파워 반도체형 전자적 방사선 도시미터 개발

Development of Electronic Radiation Dosimeter Using Commercial Power pMOSFET

。이남호, 조재완, 김승호, 육근억*

한국원자력연구소
*Inventors' Enterprise, Inc. USA

요 약

MOSFET가 이온화 방사선에 노출되면 산화층내에 전자/정공 쌍이 생성된다. 전자에 비해 느리게 이동하는 정공은 pMOSFET의 산화 층에 갖히게 되고 이 전하는 트랜지스트의 특성을 변화시키는 부가적인 전하로 작용을 하게된다. 방사선에 의해 여기된 전하는 트랜지스트의 문턱전압(Threshold Voltage)에 직접적인 영향을 준다. 본 논문에서는 방사선에 의해 여기된 문턱전압의 변화 특성을 이용하여 상용의 파워 pMOSFET를 방사선 누적 감지기로 개발하였다. 두가지의 상용 파워 pMOSFET를 Co-60 감마선 조사시설에서 조사하면서 방사선 도시미터로서의 특성을 추출하는 시험을 통해, 조사 방사선의 증가에 따라 트랜지스터의 문턱전압이 선형적으로 변화하는 특성을 도출하였다. 이 결과에 따라서 저가의 상용 파워 pMOSFET를 사용한 전자적 방사 선량계를 개발하였다. 본 pMOSFET는 선량율 시험, 그리고 실온과 100°에서 48 시간의 어닐링에서도 선형성을 잘 유지하는 특성을 나타내었다.

Abstract

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 are trapped in the oxide layer of pMOSFET 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 of commercial power pMOSFETs as an accumulated radiation dose monitoring method. Two kinds of commercial p-type power 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. According to this results, a electronic radiation dosimeter using inexpensive commercial power pMOSFETs was developed for the first time. And these power pMOSFETs show good linearity in dose rate effect, room temperature annealing, and 100℃ thermal annealing for 48hours.

1. 서 론

원자력 관련시설이나 우주 공간, 암치료 센터 등에서 발생되는 방사선원 및 방사선량은 정확

히 감지되어야할 필요가 이다. 방사선감지 센서는 사용장소, 방사선원의 세기 및 선원의 종류에 따라 다양한 형태 및 방법으로 개발되어 있으며 각기 고유의 특성을 지니고 있다. 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 필요없는 실리콘(Si)계열 센서는 극소형으로 제작이 가능하다는 이점이 있다[1]. 그 가운데 MOSFET를 이용한 방사선 센서는 방사선 피폭값의 측정시 순간 방사선 값을 누적값으로 변환하기 위한 부가회로 구성이 필요하지 않아 소형제작이 가능하다. 또한 전원상실이나 회로파손시에도, MOSFET 센서는 누적 선량값을 보존하고 있으므로, 센서만 빼내어 다른 표시기(reader)에 갈아끼워서, 선량값 재생이 가능하다.

이러한 소형/경량의 MOSFET를 이용하면 원자력시설내 각종 기기 및 설비, 그리고 로보트와 카메라 같은 장비들의 방사선 영향 평가와 이들의 수명예측, 방사선에 의한 오동작을 방지하기 위한 목적으로[2] 사용할 수 있는 전자식 방사선 누적 선량계를 개발할 수가 있다. 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 pMOSFET 센서를 사용한 적이 있다[3].

대부분 이들 센서는 특수제작되어 고가이나, 본 논문에서는 저가인 상용의 power pMOSFET를 이용한 방사값 누적 선량계 개발에 관련한 연구에 대하여 논하였다. MOSFET를 방사선 누적선량 모니터링 센서로 활용하기 위해 국산 및 일산의 상용 power pMOSFET를 Co-60 γ선원을 갖춘 고준위 조사시설에서 조사한 후 출력특성의 변화를 분석하였다. 방사선 조사실험 결과 본 MOSFET는 조사된 누적 방사선량 비례하여 문턱전압(threshold voltage, V_T)이 변화됨과 이 변화에는 선형적 특성을 지님을 알 수 있었고, 이 결과를 이용하여 방사선 누적 선량값을 실시간으로 자동 검출할 수 있는 하드웨어 모듈과 알고리듬을 구현하였다. 그리고 이 power pMOSFET 센서는 선률효과(Dose Rate Effect), 실온 어닐링(Room Temperature Annealing), 그리고 100℃에서 48시간 어닐링에서도 선형적 특성을 잘 유지하였다.

2. 반도체를 이용한 방사선 계측

MOSFET는 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체 소자의 일종으로 소자내 산화물층(SiO_2)으로 절연된 게이트의 인가 전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 문턱전압 V_T 이상이면 작동(on)하고, 그 이하이면 정지(off)하게 된다. 이 V_T 값은 MOSFET를 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수로서, 방사선에 조사될 경우 V_T값의 변위현상이 나타나는데 방사선 센서는 이 V_T 변위현상을 이용한다.

MOSFET 타입 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 민감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다. MOSFET 방사선 센서의 감도를 조절하기 위해서는 게이트 전극에 인가하는 전압의 세기, 게이트 산화물 층의 두께를 조절하거나, 게이트를 이중 구조형으로 특수제작하는 방법이 있다. 일반적으로 방사선 의학분야와 개인 선량계로 사용되는 MOSFET의 감도는 원자력이나 우주에서 사용될 때 보다 감도가 높아야 한다[4][5].

3. 방사선 조사실험 및 결과

상용 power pMOSFET의 방사선 선량계로의 이용 가능성을 타진하기 위해 Co-60 고준위 γ선 조사시설에서 방사선 조사 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 MOSFET 소자로는 테스트를 거쳐서 전기적 출력특성이 동일한 것들로 선별된 삼성반도체의 IRF9533과 Hitachi사의 J182 소자를 사용하였다(그림 1). 실험에서 소자들을 직사각형 형태의 Co-60 γ선원으로 부터 계산된 정확한 위치에 놓이도록 그림 2와 같이 배치하였다. 이때 미리 계산된 정확한 방사선 조사선량이 조사

되도록 기판에 고정된 MOSFET 소자들을 테이블 바닥으로부터 20cm 높이에 설치하여 방사선원의 중심 높이와 일치시켰다.

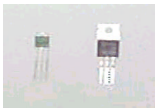


그림 1. J182와 IRF9533의 외형
Fig. 1. J182 & IRF9533 Power Transistors.

그림 2. 실험에서 사용한 기판
Fig. 2. Bread Board for Test Fixture.

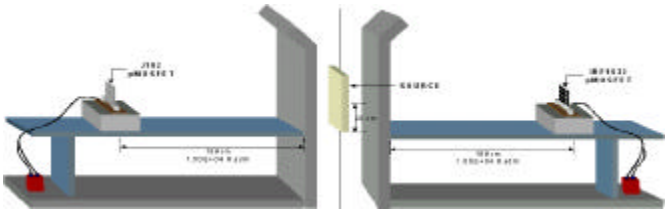


그림 3. 고준위조사시설내 실험 장치
Fig. 3. Test Setup at the High-Level Irradiation Facility.

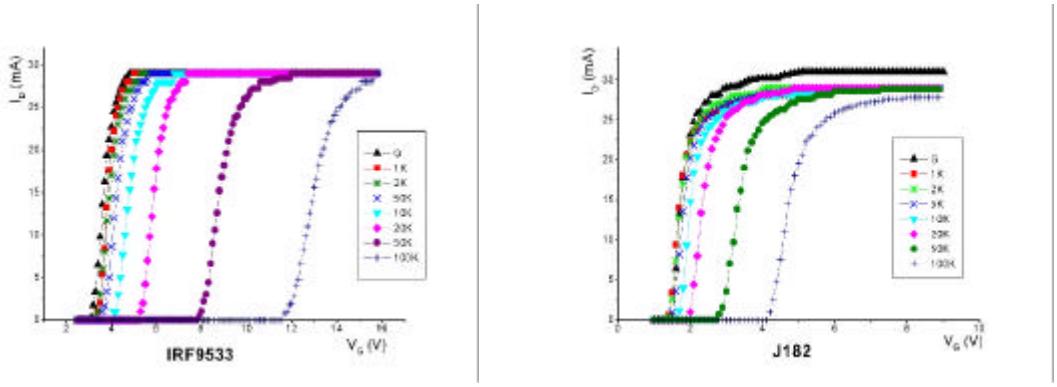
표 1. Co-60 방사선 조사방법
Table 1. Irradiation Method of Co-60.

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 2와 같이 기판에 총 35개의 샘플을 고정한 후, 7 단계로 나누어 사전에 정해진 방사선량이 조사된 5개씩의 샘플을 수거하여 오프라인(off line)으로 전기적 특성변화를 측정하였다. 방사선 조사시 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 1에서 처럼 일곱 단계의 서로 다른 방사선량을 피폭하기 위해 1 6 단계까지는 MOSFET를 선원으로부터 189cm의 거리에 위치하도록 고정한 다음(10KRad/h), 시간을 조절하여 총 방사선 피폭량이 조절되도록 하였다. 마지막 7 단계에서는 실험 시간을 줄이기 위해 선원으로부터 거리를 71cm에 두고 순간 선량을 50KRad/h로 높여 조사하여, 본 실험의 총 피폭시간은 360분, 총 피폭선량은 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 MOSFET의 방사선 영향에 대한 회복현상인 어닐링(annealing) 효과를 최대한 줄이기 위해 각 단계별로 MOSFET를 수거할 때 필요한 방사선 조사 중단시간을 최소로 줄였다.

방사선에 조사된 샘플 소자들은 어닐링 효과를 최소화하기 위해 조사 실험 직후 동시에 전기적 특성을 측정하였다. 측정시 문턱 전압을 구하기 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 4와 같았으며, 이 출력특성 커브를 분석한 결과 방사선 조사량에 따라 출력 특성커브가 오른쪽으로 점점 이동됨을 알 수 있었다.



(a) IRF9533 pMOSFET (b) J182 pMOSFET

그림 4. 출력 특성

Fig. 4. Output Characteristics.

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. 이 방법을 적용하여 두 소자의 총 누적 방사선에 대한 V_T 값들은 표 2와 같다.

표 2. 방사선 피폭량에 따른 변화된 V_T

Table 2. 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 5에서는 피폭량의 변화값에 대한 J182 power pMOSFET의 V_T 변화특성을 나타내었다. 이 그림은 방사선 총 피폭량이 V_T의 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 도식적으로 보여주는 것으로서 피폭량에 따른 V_T 변화가 거의 선형적으로 비례하므로 이상적인 방사선 누적선량계의 센서로서의 충분한 가능성을 시사한다. 이렇게 우수한 선형특성은 방사선 선량계를 목적으로 특수 설계한 선진 외국의 pMOSFET 센서에서도 얻기 힘든 우수한 것으로 평가된다.

또한 그림 5로부터 선형근사법에 의한 직선의 방정식을 통해 방사선 총 피폭량과 V_T 변화의 관계를 구할 수 있음을 알 수 있다. 표 3은 IRF9533과 J182 소자 각각에 대한 피폭 방사선량과 V_T 변화량 사이에서 도출한 직선방정식(Y = a*X + b)으로서, IRF9533의 경우 직선 방정식의 상

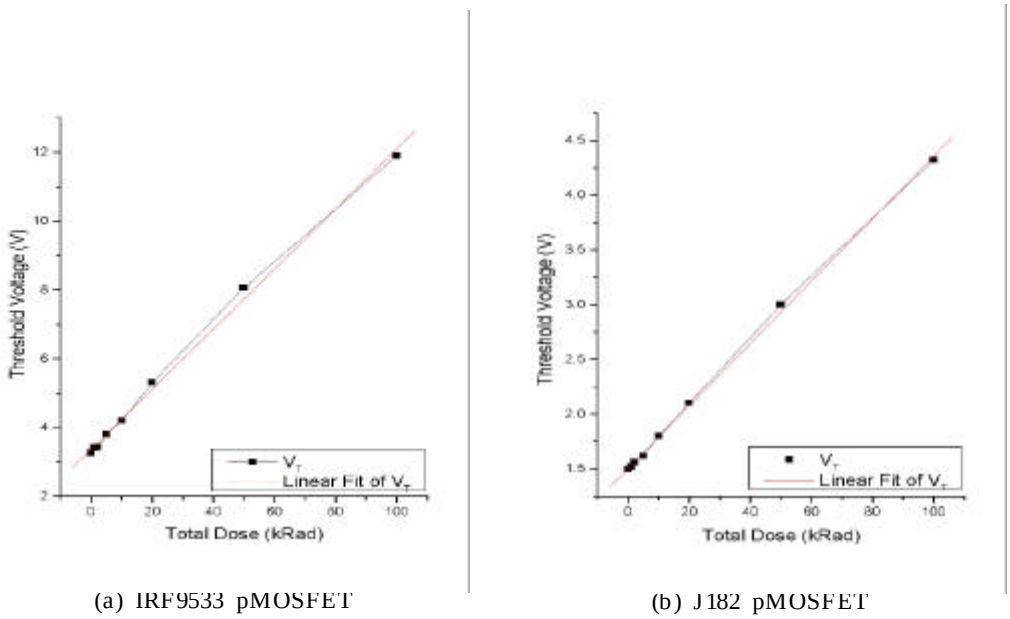
수 a, b 값이 0.087과 3,368이며, J182의 경우 0.029, 1.506임을 보여준다. 즉 방사선 누적선량 값 (Y)은 IRF9533의 경우 V_T (X)의 함수

$$Y = 0.087*X + 3.358 \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, J182의 경우에는

$$Y = 0.029*X + 1.506 \quad (2)$$

이 된다.



(a) IRF9533 pMOSFET (b) J182 pMOSFET

그림 5. 누적 방사선 피폭선량 대 V_T 변이

Fig. 5. V_T Shift vs. Accumulated Radiation Dose

표 3. 누적피폭량 vs. V_T 변화의 Linear Fitting 함수값

Table 3. Correlations from Linear Fitting of Accumulated Dose vs. V_T Shift Data.

IRF9533	Y(total dose) = aX(V_T shift) + b
	a = 3.368, b =0.087
J182	Y(Total Dose) = aX(V_T Shift) + b
	a = 1.506, b =0.029

4. 실시간 방사선 전자적 선량계 구현

두 종류의 power pMOSFET에 대해 수행한 방사선 조사실험에서 도출한 방사선 피폭량과 소자의 출력 특성변화 사이의 선형함수관계를 이용하면 저가의 상용 power pMOSFET를 방사선 총 누적선량 센서로 사용하는 우수한 성능의 방사선 선량계를 구현할 수 있다. 그림 6은 방사선 조사실험에서 얻은 결과를 이용하여 power pMOSFET의 피폭 방사선 누적선량값을 자동으로 검출할 수 있는 하드웨어 모듈을 구현하기 위한 기능별 구성도이다. 8051 프로세서와 D/A 컨버트를 통하여 power pMOSFET의 드레인 전원으로 50mV를 정확히 공급하고, 게이트에는 0에서 10V사

이의 인가 전압을 50mV씩 단계별로 증가시키는 동시에 이때 생성되는 소자의 드레인 전류를 A/D 컨버터를 통해 순차적으로 메모리에 저장하였다 이 데이터는 RS-232를 통해 펜티엄 330 개인용 컴퓨터에서 비쥬얼-C 컴파일러를 이용하여 실시간 신호처리함으로서 V_T 및 방사선량 값을 자동으로 구하였다. 그림 7은 8051 프로세서와 AD574, 767를 이용하여 구현한 자동 검출 알고리듬의 하드웨어 모듈의 실제모습이며, 그림 8은 이 모듈을 통해 획득한 소자의 드레인 전류 데이터에서 power pMOSFET의 V_T 값을 검출하고, 또 이에 대응하는 누적 피폭방사선 값을 실시간으로 구하여 표시해주는 알고리듬의 결과 화면이다.

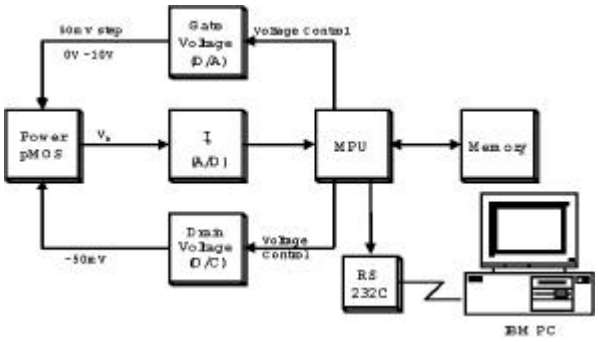


그림 6. 방사선량 자동검출 모듈 기능별 구성도
Fig. 6. Functional Diagram of the Radiation-Dose Auto-Readout Module

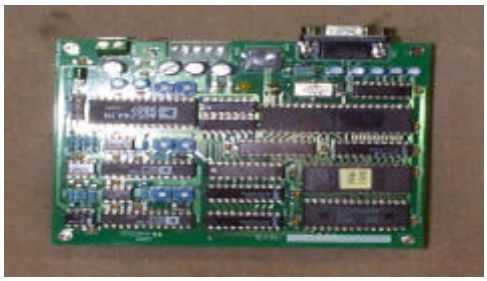


그림 7. 피폭 방사선량 자동검출 모듈
Fig. 7. Auto-Readout Module

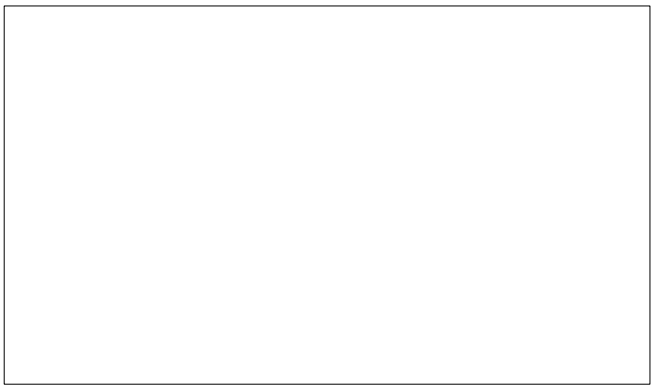


그림 8. V_T 및 방사선량 자동 검출 알고리듬의 실행화면
Fig. 8. Screen Capture of the Control and Data Visualization Window

5. 실험에 사용된 power pMOSFET 방사선 센서의 Fading 특성

선율 효과 (Dose Rate Effect)

방사선 누적선량계에서는 피폭되는 방사선의 총 피폭 누적선량뿐만 아니라 순간 피폭값 또한 중대한 변수로서 작용한다[6]. 즉 동일한 방사선량에 피폭되더라도, 얼마의 시간 내에 피폭되었는지를 나타내는 선율(Dose Rate)이 반도체를 이용한 방사선 센서의 결과 값에 상당한 차이를 발생시키기도 한다. 따라서 본 논문에서 방사선량 감지센서로서 사용한 두 종류의 power pMOSFET에 대한 선율 시험을 수행하였으며 그 절차 및 결과는 다음과 같다.

표 4. 방사선률 시험절차

Table 4. Two Different Dose-Rate Conditions for Two Identical Boards

단위 : Rad

step / 보드	1	2	3	4	5
	1hour	1hour	90hours	1hour	1hour
A	$5x10^4$	$5x10^4$	$1x10^2$	$1x10^2$	$1x10^2$
B	$1x10^2$	$1x10^2$	$1x10^2$	$5x10^4$	$5x10^4$

동종의 소자를 설치한 기판 A, B에 서로 다른 선율을 조사시키되 총 피폭 선량은 동일하게 하는 방법을 통하여 선율에 대한 효과를 살펴보았다. 선률 효과를 극대화하기 방사선 조사시설이 허용되는 범위에서 가능한 고선률과 저선률의 차이를 크게 설정하였다. 이를 위하여 Co-60 선원의 고준위 조사시설과 저준위 조사시설을 동시에 이용하여 두 선율의 차이를 500배가 되도록 하였다. 본 논문 3절에서의 방사선 조사시험에서와 동일한 시험 기판 A, B 및 보조기구를 사용하였고, 세부사항 및 절차는 표 4에서와 같다.

고준위 조사시설의 시간당 $5x10^4$ Rad 조사위치에 시험기판 A를 설치한 후 1시간씩 두 단계를 조사하면서 출력 특성의 변화를 관측하였고, 저준위 시설에서 90시간 동안 어닐링을 거친 후 동환경에서 1시간씩 두 단계에 걸쳐 $1x10^2$Rad의 세기로 조사하면서 출력 특성변화 시험을 수행하였다. 그리고 브레드보드 B는 A와 역순으로 먼저 저준위 시설에서 두 단계 조사 후 동일한 90시간 어닐링 과정을 거친 다음 고준위 시설에서 다시 두 단계 조사시키면서 단계별 출력 특성의 변화를 관측하였다. 결국 시험기판 A와 B에 대한 만 방사선율의 피폭 순서는 달리했지만 최종 피폭 방사선량은 동일한 것이 된다. Board A (Mtd #1)는 초기에 대부분의 방사선을 맞고 90여 시간의 상온 회복기를 가진것이고, Board B (Mtd #2)는 그러한 회복기를 갖지 못하므로, 상온에서 회복(fading)이 잘되는 나쁜 센서의 경우, 최후 값의 차이가 많게된다.

그 결과를 가로축의 방사선 피폭값에 대한 세로축 V_T 변화량과의 관계로 그려보면 그림 9와 같은 궤적을 가지게 된다. 그림에서 알 수 있다시피 보드 A와 B의 power pMOSFET에 최종 누적된 방사선량값에 의한 V_T 값은 J182의 경우 각각 4.41V와 4.456V로서 두 경우 V_T 값의 차이는 1퍼센트 이하이다. 또한 IRF9533의 경우는 V_T 값이 각각 13V와 12.75V로서 이 경우 차이는 2퍼센드 이하였다. 이 결과를 통하여 본 논문에서의 방사선 누적선량 도시미터용 센서로 사용한 두 종류의 power pMOSFET는 선률 효과에 대한 영향이 거의 없는 신뢰성이 우수한 것이라는 것을 알 수 있다.

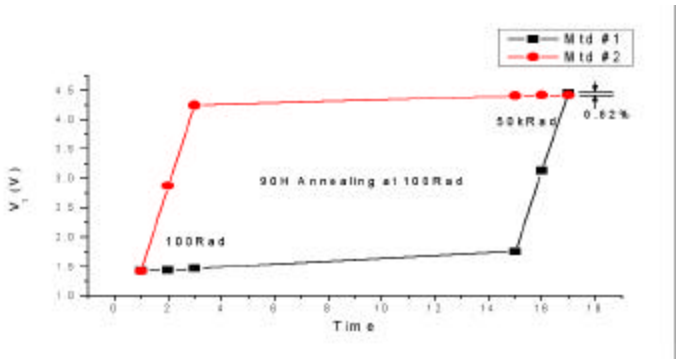


그림 9. 선율 효과 시험 결과

Fig. 9. The Results of Dose Rate Effect

실온 및 고온어닐링 (Room Temp. & 100℃ Thermal Annealing)

일반적으로 pMOSFET 등 반도체를 사용한 방사선 도시미터는 온도 변화에 취약하다. 즉, 고온의 환경에서는 방사선에 대한 소자의 특성변화가 실온에서의 그것과 다소 다르게 나타날 수 있다. 또한 방사선 피폭 후 시간이 경과함에 따라 MOSFET 내에 기억되었던 방사선 누적 선량 값을 잃어 버리게되므로 시간의 경과에 따라 정확도가 다소 떨어지게 된다. 이러한 특성변화는 film형 및 TLD형과 같이 반도체 센서도 가지는 하나의 취약점으로서 이의 극복을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다[7][8]. 본 논문에서 사용한 power pMOSFET에 대하여 일반 선량계 센서가 가지는 취약점에 대해 알아보기 위해 관련 실험을 실행하였다. 우선 시간의 경과에 따른 본 논문에서 사용한 power pMOSFET의 방사선 특성 변화를 확인하기 위해 3장에서 기술된 방사선 측정실험 뒤 3개월 후에 다시 V_T를 반복 측정함으로서 시간의 경과에 따라 power pMOSFET내의 기억 방사선량 정보의 손실 정도를 고찰하였다. 또한 고온 환경에서 소자의 방사선 기억 값 특성변화를 알아보기 위해 어닐링 오븐을 사용, 100℃에서 48시간 동안 어닐링 과정을 거친 후 소자의 방사선 특성 변화를 관찰하였다.

이들 두 실험에 대한 결과는 그림 10에 동시에 나타나 있다. 그림에서 원형의 점은 초기 방사선 조사 직후의 방사선 특성이고, 사각형 점은 3개월 경과 후의 측정값을, 그리고 세모점은 100℃ 어닐링 후의 power pMOSFET의 특성을 보여준다. 이 결과는 J182 power pMOSFET가, 실온에서 시간의 경과나 고온에 의한 영향에 대해서, 누적된 방사선량을 비교적 잘 간직하는 것을 보여준다. 특히 손실된 상태에서도 여전히 우수한 선형 특성을 유지한다는 것을 알 수 있다. 한편 IRF9533은 시간 및 온도 어닐링 실험의 결과에서 J182에 비해 신뢰도가 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

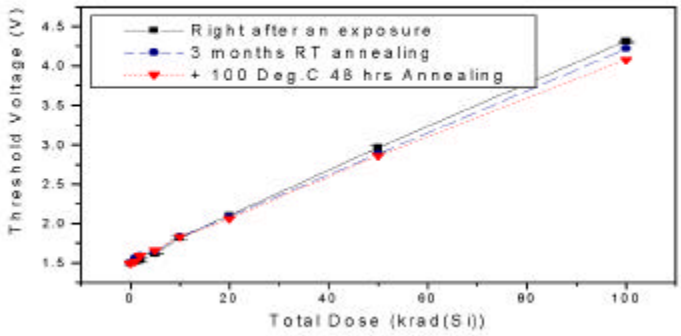


그림 10. 실온 및 고온에서의 어닐링 효과

Fig. 10. Annealing Effect by Room Temp. and Thermal

6. 결론

본 논문에서는 저가의 상용 power pMOSFET를 이용한 방사선 총 누적선량 도시미터의 개발에 관한 연구를 수행하였다. 상용 국산 IRF9533 소자와 일산 Hitachi사의 J182 power pMOSFET 소자를 Co-60 γ선 고준위시설에서 미리 정한 여러가지 단계의 방사능 세기로 조사시키는 방사선 실험을 거쳐 특성을 분석, 고찰하였다. 실험결과 두 종류의 pMOSFET 소자의 방사선 조사에 의한 V_T 변위현상을 직선함수로 근사시킬 수 있음을 알 수 있었고, 이 선형 함수관계를 이용하여 손쉽게 구할 수 있는 저가의 상용 power pMOSFET를 사용하여 우수한 성능의 실시간 방사선 총 누적선량 도시미터를 개발하였다. 또한 선률 효과 (Dose Rate Effect)와 실온 및 100℃ 48시간 어닐링 시험을 통해, 본 연구에서 사용한 power pMOSFET 방사선 누적센서는 시간과 온도의 외

부 영향에 대해 비교적 둔감하며, 방사선 누적값에 대한 선형성을 잘 유지하는 우수한 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다. 본 논문의 연구결과를 통하여 일부 선진외국에서 특수 제작한 고가의 방사선 센서를 저가의 상용 power pMOSFET를 방사선센서로 대체 사용할 수 있음을 확인하였다.

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. Geun U. Youk, "Dose Rate Effects of a Bipolar A/D Converter," NSREC '96 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 1996
7. A. J. Lelis, H. E. Boesch Jr, T. R. Oldham, and F. B. McLean, "Reversibility of Trapped Hole Annealing," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 35, No. 6, 1988
8. A. Kelleher, N. McDonnell, B. O'Neill, W. Lane, "Investigation into the re-use of PMOS Dosimeter," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 41, No. 3, 1994