

p-MOSFET 타입 방사선 누적선량 모니터링 센서 개발

이남호, 최영수, 이용범, *육근익

한국원자력연구소

*Invertors' Enterprise, 미국

Development of p-MOSFET Type Accumulated Radiation Dose Monitoring Sensor

*Namho Lee, Youngsu Choi, Yongbum Lee, Geunuck Youk

KAERI

*Invertors' Enterprise, Inc. USA

Abstracts

When a semiconductor(pMOSFET) sensor is exposed to ionizing radiation, electrons/holes are generated in its oxide layer. By the phenomenon of hole traps in oxide layer during their move, the characteristics of semiconductor is changed. This paper describes the output characteristic changes of two kind of pMOSFET(domestic, japan) after CO-60 γ -irradiation on them for their application as radiation accumulated dose monitoring sensors. We found the threshold voltage shifts (V_T) of pMOSFETs in proportion to irradiated radiation dose and their linear properties. These results make us confirm that we will be able to develop good accumulated radiation dose monitoring sensors.

1. 서론

원자력 관련시설이나 우주 공간, 암치료 센터 등에서 발생되는 방사선은 신중히 다루어져야 하며 이들의 방사선원 및 방사선량은 정확히 감지되어야 한다. 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, 저전력 소모, 그리고 내구성이 우수하다는 점에서 다른 센서류와 비교되며, 반도체 센서중 게르마늄(Ge)계열 센서는 별도의 대형 냉각장치가 필요하지만 냉각장치가 필요 없는 실리콘(Si)계열 센서는 극소형으로 제작이 가능하다는 이점이 있다. 따라서 본 한국원자력연구소에서는 원자력시설내 각종 기기 및 설비, 그리고 로봇과 카메라 같은 장비들의 방사선 영향 평가와 이들의 수명예측, 방사선에 의한 오동작을 방지하기 위한 목적으로 소형, 경량의 손쉬운 사용이 가능한 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 , x선 및 중성자(n) 등의 종류와 세기를 실시간으로 감지할 수 있도록 한 것이다(그림 2). pMOSFET를 이용한 방사선 센서는 방사선 피폭량의 측정 시 센서 값을 읽을 때 필요한 특수 측정용 디바이스나 순

간 방사선 값을 누적값으로 변환하기 위한 부가회로 구성이 불필요하다는 점에서 우수한 방사선 센서로 간주된다. 또한 저가, 저전압용이며, 내구성이 강하여 긴 케이블이나 로봇트램의 끝 부분에 센서만을 부착한 채 습기가 많은 고열의 극한 환경 하에서도 사용이 가능하다는 장점도 가지고 있다.

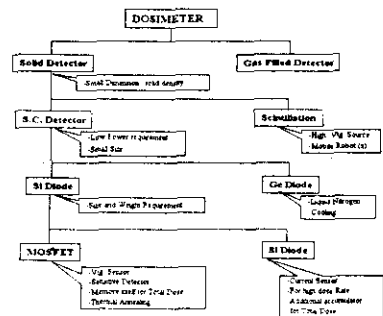


그림 1. 방사선 센서의 종류

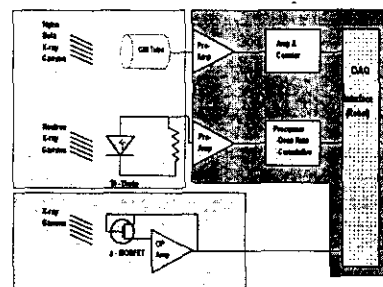


그림 2. 이동 로봇용 통합방사선센서기

본 논문에서는 통합 방사선 센서 모듈에서 γ 선 모니터링의 역할로 사용되는 pMOSFET 방사선 센서 개발에 관련하여 기술한다. 이러한 타입의 센서는 최근 일부 선진

국에서 우주항공 및 위성체의 누적 방사선 센서로서 특수하게 제작되고 있는 상태이다. 본 연구에서 사용된 pMOSFET 소자는 국내 반도체 제조업체에서 상업용으로 생산되는 IRF9533과 일산 J182를 이용하였다. 이 pMOSFET 센서는 원자력산업계 뿐만 아니라 방사선의학분야, 방사선관련 산업분야, 개인방사선 선량계, 우주항공, 위성체 등 광범위한 분야에서 사용될 수 있다.

2. 반도체를 이용한 방사선 센싱의 원리

pMOSFET는 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체 소자의 일종으로 그림 3과 같은 구조로 되어 있다. pMOSFET는 소자내 산화물층과 연결된 게이트의 인가 전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 설정값(Threshold Voltage, V_T) 이상이면 작동(On)하고, 그 이하이면 정지(Off)하게된다. 설정값 V_T (그림 4)는 pMOSFET를 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수로서, 방사선에 조사될 경우 V_T 값의 변위현상이 나타나는데 방사선 센서는 이 V_T 변위현상을 이용한다.

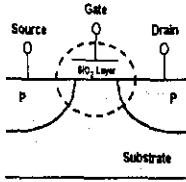


그림 3. pMOSFET 단면도

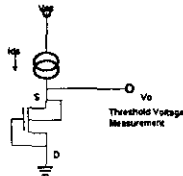


그림 4. pMOSFET 회로도

그림 5는 pMOSFET 소자내 주 관심 영역인 산화물층의 게이트 영역을 확대한 것으로 이온화 방사선에 피폭될 경우 게이트 내에서는 공유 결합이 끊어져 피폭 방사선량에 비례하는 이동이 가능한 전자(electron)와 홀(hole)이 생성된다. 이 전자와 홀은 생성 직후 재결합하기도 하지만 상당수는 산화층에 형성된 전계 방향에 따라 이동하게 된다. 그림5와 같이 pMOSFET의 게이트에 양의 전압이 걸릴 경우 홀에 비해 이동성이 아주 큰 전자는 빠른 속도로 게이트 전극으로 이동하여 산화층을 벗어나게 되며, 반면 이동도가 작은 홀은 서서히 기판(Substrate)을 향하여 이동한다. 이때 기판방향으로 이동하는 홀은 산화물층 내에 존재하는 SiO_2 의 불완전한 결합 형태에 갇혀 홀트랩(Hole Trap)으로 형성되기도 하고, Si/SiO₂ 결합층 부근(Interface)에서도 양전하 상태로 축적된다. 이러한 Hole Trap과 Interface Trap이 pMOSFET 경우 양(+)방향의 전계로 작용하므로 이 디바이스를 작동(Turn On) 시키기 위해서는 새로 형성된 전계값 만큼 추가적인 전계를 가해주어야한다. 이는 피폭 방사선에 비례하여 축적되는 전하의 전계 만큼 더 많은 전압을 게이트에 인가해야만 디바이스

를 작동(Turn On) 시킬 수가 있다는 것을 의미하는데 이를 방사선 피폭량에 비례하는 V_T 의 변위현상이라 한다. 그림6은 방사선 조사에 따른 pMOSFET의 전류-전압 출력 특성 변화를 도시한 것이다.

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

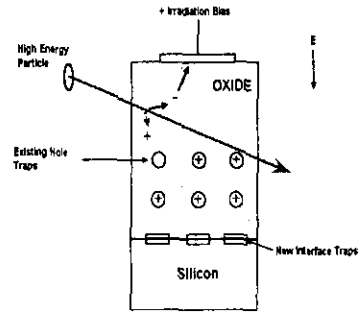


그림 5. 방사선 피폭시 pMOSFET의 게이트 산화물층내 전하이동 메카니즘

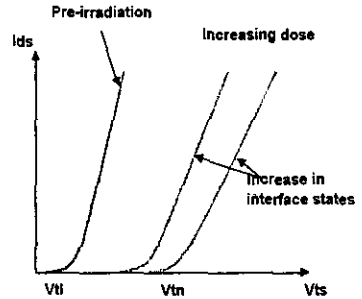


그림 6. V_T 및 방사선 피폭에 의한 출력특성변화

3. 실험

pMOSFET의 방사선에 대한 특성변화를 확인하기 위해 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 Co-60 고준위 γ 선 조사시설에서 방사선 조사 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 pMOSFET 소자로는 전기적 테스트를 거쳐서 출력 특성이 동일한 것들로 선별된 삼성반도체의 IRF9533과 히다치의 J182 소자를 사용하였다(그림 7). 실험에서 소자들은

직사각형 형태의 Co-60 γ 선원으로 부터 계산된 정확한 위치에 놓이도록 그림 9와 같이 배치하였으며 미리 계산된 정확한 방사선 조사선량이 조사 되도록 브레드보드에 고정된 pMOSFET 소자들은 테이블 바닥으로부터 20cm 높이에 설치하였다.

그림 7. J182, IRF9533



그림 8. 실험 시 브레드보드

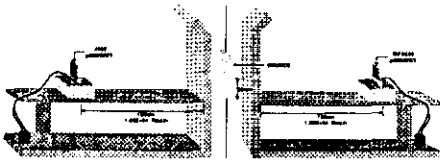


그림 9. 고준위조사시설내 실험셀 설치

표 1. Co-60 방사선 조사방법

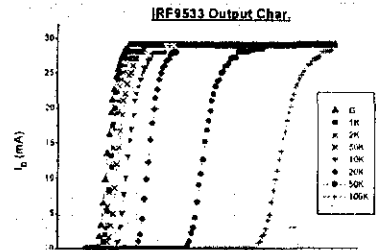
Step	1	2	3	4	5	6	7
Distance (cm)	189	189	189	189	189	189	71
Dose Rate (KRad/h)	10	10	10	10	10	10	50
Total Hour (min)	6	12	30	60	120	300	360
Total Dose (KRad)	1	2	5	10	20	50	100

방사선 조사 실험은 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 측정하는 것이다. 방사선 조사시 pMOSFET의 게이트 전극에 DC 6V의 전압을 인가하고, 소스와 드레인을 그라운드에 접지시켰는데, 이는 방사선 피폭으로 인해 분리된 전자와 홀이 즉시 재결합하는 것을 막음으로서 방사선에 대한 감도를 높이기 위해서이다. 총 조사 방사선의 최대량은 100KRad로 설정하고 이에 따른 조사율은 시간당 10KRad/h가 되도록 했다. 표 1에서처럼 7 단계의 서로 다른 총방사선량을 피폭하기 위해 1~6 단계까지는 pMOSFET를 선원으로 부터 189cm의 거리에 위치하도록 고정한 다음, 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 되

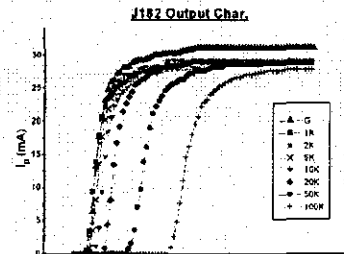
도록 하였다. 실험에서는 pMOSFET의 방사선 영향 회복현상인 어닐링(Annealing) 효과를 최대한 줄이기 위해 각 단계별로 pMOSFET를 수거하는 방사선조사 중단시간을 최소로 줄였다.

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)을 형성시킨 후 게이트 전압을 가변하면서 드레인 전류를 측정하였다. 실험에 사용된 IRF9533과 J182의 출력특성은 그림 10과 같으며 이 특성 커브를 살펴보면 방사선 조사에 의해 출력 특성커브가 이동됨을 알 수 있다. 방사선 조사특성을 알 수 있는 V_T 는 I-V 커브에서 Linear Extrapolation 방법을 이용하여 구하였으며 각각의 총 누적 방사선에 대한 V_T 값은 표 2와 같다. 그림 11에서는 피폭량의 변화값에 대한 V_T 의 변화특성을 나타내었다. 그림 11은 방사선 총 피폭량이 V_T 의 변화에 어떠한 영향을 미치는가 하는 것을 보여주는데 Linear Fitting에 의해 직선의 방정식으로 방사선 총 피폭량과 V_T 변화의 관계를 구할 수 있음을 보여준다. 표3은 IRF9533과 J182 소자에 대한 방사선 누적 선량 측정 방정식으로 IRF9533의 경우 직선 방정식의 상수 a, b 값이 3,368과 0.087이며, J182의 경우 1,506, 0.629임을 보여준다.



(a)

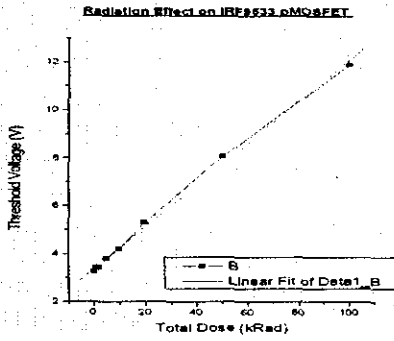


(b)

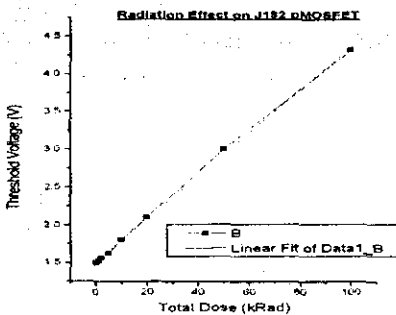
그림 10. 출력 특성

표 2. 방사선 피폭량에 따른 변화된 V_T

Dose(KRad)	V_T Shift	
	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



(a)



(b)

그림 11. Radiation Total Dose vs. V_T Shift

표 3. 누적피폭량 vs. V_T 변화의 Linear Fitting 함수값

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

이상의 실험 결과 pMOSFET 소자의 방사선 조사에 의한 V_T 출력특성 변화현상은 선형적 특성을 지니며, 이러한 선형적 함수관계를 이용하면 pMOSFET는 우수한 방사선

총 누적선량 모니터링 센서로 활용할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 pMOSFET를 이용하여 방사선 총 누적선량 모니터링 센서로 개발하기 위한 연구를 수행하였다. pMOSFET의 방사선 특성을 확인하기 위해 원자력연구소 내 Co-60 고준위 조사시설에서 pMOSFET의 방사선 조사 실험을 수행하였다. 실험에는 상용 국산 IRF9533 소자와 일산 히다치 J182 소자가 사용되었으며, 100KRad의 총 누적선량에 따라 7 단계로 나누어 총 35개의 소자에 대한 방사선 조사가 이루어졌다.

실험결과 pMOSFET 소자의 방사선 조사에 의한 V_T 출력특성 변화현상이 선형적 특성을 지니며, 이 선형적 함수관계를 이용하면 pMOSFET를 이용한 우수한 방사선 총 누적선량 모니터링 센서를 개발할 수 있음을 확인하였다.

금번 수행한 상용 국산 소자의 방사선에 대한 변화특성이 양호하여 저가의 국산 방사선 누적선량계 개발의 가능성을 확인하였으며, 추후 pMOSFET 소자에 대한 자동 V_T 검출회로의 제작과 보다 넓은 범위의 방사선 조사 실험, 그리고 선량율(Dose Rate) 효과와 어닐링의 영향에 대해서도 연구할 예정이며 표 4와 같은 광범위한 응용분야에 적합한 다양한 센서 모듈을 개발할 예정이다.

표 4. pMOSFET의 응용분야

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

7. 참고문헌

- 1.T. Stanley, et al, The Effect of Operating Frequency in the Radiation Induced Buildup of Trapped Holes and Interface States, IEEE Trans. Nuc. Sci., Vol. NS-32, No. 6, Dec. 1985.
- 2.Standard Guide for Ionizing Radiation Effects Testing of Semiconductor Devices, American Society fo Testing and Materials, F-867-88.
- 3.M. Pepper, Inversion Layer Transport and the Radiation Hardness of the Si-SiO2 Interface, IEEE Trans. Nuc. Sci., Vol. NS-25, No. 6, Dec. 1978.
- 4.Standard Practice for Minimizing dosimetry Errors in Radiation Hardness Testing of Silicon Electronic Devices Using Co-60 Sources American Society for Testing and Materials, E-1249-93.
- 5.P.J. McWhorter & P.S. Winokur, Simple Technique for Separating the Effects of Interface Traps and Trapped Oxide Charge in Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, Appl. Phys. Lett. Pp. 133, 48 (2), 13 January 1986.
- 6.Standard Test Method for Determining the Mean Interface Trap Density of MOSFETs by Charge-Pumping, American Society for Testing and Materials, F-1340-92.
- 7.J.M. McGarrity, Consideration for Hardening MOS Devices and Circuits for Low Radiation Does, IEEE Trans. Nuc. Sci., Vol. NS-27, No. 6, Dec. 1980.