

논문 2000-9-3-10

## γ선 실시간 검출을 위한 P채널 Power MOSFET 방사선 선량 시스템 개발 한상현, 지용근, 권오상, 민홍기, 이응혁

### Development of Radiation Dosimeter on P Channel Power MOSFET for γ-rays Real-Time Detection

Sanghyun Han<sup>\*</sup>, Yongkun Ji<sup>\*</sup>, Osang Kwon<sup>\*\*</sup>, Hongki Min<sup>\*\*\*</sup>, Eunghyuk Lee<sup>\*\*\*\*</sup>

#### 요 약

원자력 관련시설이나 우주 공간, 방사선 치료 센터 등에서 발생하는 방사선량은 정확히 검출되어야 할 필요성이 있다. 본 논문에서는 상용 P채널 Power MOSFET(metal oxide field effect transistor)를 방사선 누적선량 모니터링 센서로 활용하기 위해 실시간 방사선량 검출 측정 시스템을 설계 제작하였고, 시스템의 성능을 분석하기 위하여 Co-60 γ선원을 갖춘 고준위 조사시설에서 조사한 후 출력특성의 변화를 분석하였다. 방사선 조사실험 결과 P채널 Power MOSFET은 조사된 누적 방사선량에 비례하여 문턱전압( $V_T$ )이 변화됨과 곡선 변화의 선형적 특성을 지님을 알 수 있었다. 이 선형 함수관계를 이용하여 저가의 상용 P채널 Power MOSFET를 사용한 방사선 총 누적선량을 모니터링하기 위한 센서로 사용할 수 있음을 확인하였다.

#### Abstract

It is necessary that radiation dose would be detect exactly generated from facility related to nuclear, space, radiotherapy center, etc. This paper is to use of the radiation-induced threshold voltage change as an accumulated radiation dose monitoring sensor. Commercial P Channel Power MOSFET(metal oxide field effect transistor) 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 Channel Power MOSFET as inexpensive radiation sensors.

#### I. 서론

원자력 시설내 각종 기기 및 설비 그리고 로봇과 카메라와 같은 장비들의 방사선 영향 평가와 이들의 수명 예측, 방사선에 의한 오동작을 방지하기 위하여 소형·경량화되고, 사용하기 간편한 방사선 선량계의 개발이 절실히 요구되고 있다<sup>1)</sup>.

방사선 감지를 위한 검출기로는 사용장소, 방사선원의 세기 및 선원의 종류에 따라 다양한 형태 및 방법으로 개발되고 있으며 각기 고유의 특성을 갖고 있다. 방사선 검출기로는 기체충전형 검출기, 섬광 검출기,

\* 건양대학교 대학원 정보전자공학과(Dept. of Information and Electronics, Graduate School, Konyang Univ.)

\*\* (주)한울로보틱스 개발실(Dept. of R&D, Hanwool Robotics Corp.)

\*\*\* 인천대학교 정보통신공학과(Dept. of Information and Communication, University of Incheon)

\*\*\*\* 한국산업기술대학교 전자공학과(Dept. of Electronics, Korea Polytechnic University)

<접수일자 : 2000년 2월 8일>

개인 선량계, 반도체형 검출기 등이 있다. 기체충전형 검출기와 섬광 검출기는 고전압원이 필요하고 시스템 구성이 복잡하다는 문제점을 내포하고 있으며, 반도체형 검출기는 시스템 구성이 간단하고 소형, 경량 그리고 저전력 소모 측면에서 우수하다는 장점이 있다.

반도체형 방사선 검출기로 사용되는 센서로는 Ge 계열과 Si 계열의 반도체가 많이 사용되는데 게르마늄(Ge)계열 센서는 사용시 뿐만 아니라 보관할 경우에도 항상 냉각장치가 필요하지만 실리콘(Si)계열 센서는 상온에서 수주동안 보관이 가능하다는 이점이 있다<sup>[1]</sup>. 실리콘(Si)계열의 MOSFET은 그 특성 곡선 변화의 선형성으로 인해 방사선량 검출기로 우수한 특성이 있다.

MOSFET의 종류에는 p채널과 n채널이 있는데, 이 중 n채널은 방사선 피폭에 따른 문턱전압 변화 곡선이 saturation되는 특성을 보여 방사선 선량계로 p채널을 사용한다.

pMOSFET를 이용한 방사선 선량계의 응용분야는 원자력 관련시설이나 우주공간, 암치료 센터 등에서 발생하는 방사선원과 방사선량을 정확히 감지되어야할 필요성이 있는 분야에서 많이 사용되고 연구되고 있으며 표 1에 나타난 바와 같이 방사능 세기에 따라 다양한 응용분야를 갖고 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 pMOSFET를 이용하여 방사선량을 검출하기 위한 센서들은 일반적으로 상용의 일반 pMOSFET를 사용하지 않고, 특수하게 제작되고 있는 상태이며, 특히 최근 캐나다에서는 CANDU형 원자로의 정상운전시의 방사선량을 측정하기 위한 특별 제작한 pMOSFET 센서를 사용한 적이 있다<sup>[3]</sup>.

표 1. 방사선 세기에 따른 pMOSFET 도시미터의 응용분야

Table 1. Application Areas of pMOSFET Dosimeter according to Dose Rate.

Application Areas	Nuclear Equipment							
	Space							
	Therapy							
	Personal							
Rad	1	10	100	1K	10K	100K	1M	10M

따라서, 본 논문에서는 원자력 시설에서 각종 기기

및 설비들의 방사선 영향 평가와 이들의 수명 예측, 방사선에 의한 오동작을 방지하기 위하여  $\gamma$ 선을 자동 모니터링할 수 있는 상용의 IRF9533, J182, J202 pMOSFET을 선정하여 실시간 방사선 센서 시스템을 구현하였다. 구현된 센서 시스템의 검증을 위하여 상용 pMOSFET를 Co-60  $\gamma$ 선원을 갖춘 고준위 조사시설에서 조사한 후 출력특성의 변화를 분석하였으며, 방사선 조사실험 결과 pMOSFET는 조사된 누적 방사선량에 비례하여 문턱전압(threshold voltage,  $V_T$ )이 변화됨과 이 변화에는 선형적 특성을 지님을 알 수 있었고, 이 결과를 통하여 설계·제작된 pMOSFET를 이용한 방사선량 측정 시스템은 총 방사선량 모니터링 시스템으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

## II. 이온화 방사선 측정기로서의 pMOSFET

자연방사능이 붕괴할 때 나오는 알파, 베타, 감마선과 X선을 통틀어 이온화 방사선이라 부른다. 본 연구에서는 실제로 이온화 방사선의 양에 따른 pMOSFET의 특성 곡선의 변화를 측정하기 위해 원자력 연구소의 고준위 방사선 조사시설의 Co-60  $\gamma$ 선원을 사용하였다.

### 2.1 반도체(pMOSFET)를 이온화 방사선에 의한 계측의 원리

이온화 방사선이 반도체에 미치는 영향은 이미 많이 연구되고 있으며 특히 pMOSFET은 그 특성 곡선 변화의 선형성으로 인해 총 방사선량 검출기로서 사용되고 있다. pMOSFET에 이온화 방사선이 가해지면 pMOSFET내의 산화물층( $SiO_2$ ) 안에서 방사선 입자에 의한 전자-정공쌍이 생기고 이 중 전자들은 곧 전극을 통해 빠져나가지만 정공들은 정공 트랩(hole-trap)에 잡히게 된다. 이 효과로서 MOSFET의 고유 특성인 문턱전압이 변하는 것을 이용한 것이다. 이를  $V_T$  변위현상이라 하고 이의 원리를 그림 1에 나타내었다.

그림 1은 이  $V_T$  현상을 설명하기 위해 pMOSFET 소자내의 주 관심영역인 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 전

계 방향에 따라 이동하게 된다<sup>[4]</sup>. 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. 즉, 이 변화가 선형적인 구간에서 이온화 방사선에 의한 문턱 전압 변화를 모니터링 함으로써 총 방사선량을 계산할 수 있다.

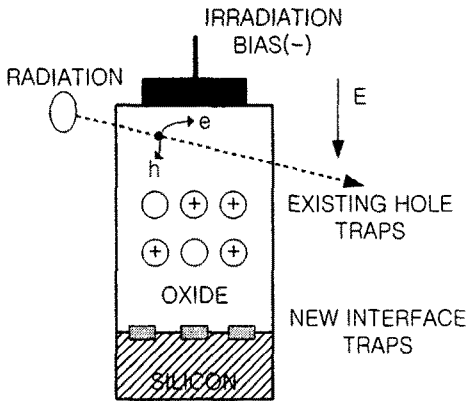


그림 1. 방사선 피폭시 MOSFET의 게이트 산화물층내 전하이동 메커니즘(P 채널인 경우)

Fig. 1. The mechanism of charge move in  $\text{SiO}_2$  in MOSFET as irradiated(case of p channel).

이온화 방사선이 pMOSFET 내의 산화물층에 조사 되었을 때 산화물층에서 전자의 이동 속도는 정공보다 약 100만 배 정도 빠르므로 전자는 곧 전극을 따라 이동하여 없어지고 정공만 남게된다. 이러한 정공들은 게이트에 걸리진 바이어스에 따라 천천히 이동하다가 산화물층 내의 정공 트랩(hole-trap)에 잡히게 되어 양 전하를 형성하게 된다<sup>[5,6]</sup>.

이 결과 MOSFET은 다음과 같은 두 가지의 변화를 겪게된다. 하나는 문턱 전압 변화이고 다른 하나는 채널 이동 작용(방사선에 의한 채널 형성의 변화)이다. 만약 MOSFET이 P채널인 경우는 게이트에 negative bias가 걸리므로 대부분의 정공들이 산화물층 내의 정공트랩(hole-trap)에 잡히게 되어 space charge를 만들게 되지만 N채널인 경우는, 게이트에 걸린 positive bias 때문에 정공들이 실리콘 쪽으로 밀려나게 되고  $\text{SiO}_2$ -Si 경계면에서 interface state를 형성한다.

이러한 interface state는 실리콘과 전하 교환을 하며 주로 음으로 하전되기 때문에 문턱전압 변화에 큰 영향을 줄 수 있다. Interface state의 형성은 시간과 온

도, 주어진 bias field, 그리고 ionizing dose에 크게 의존하는 것으로 알려져 있으나 아직 그 형성 과정이 명확히 알려져 있지는 않다.

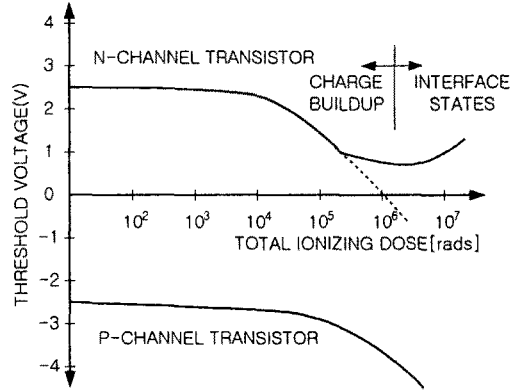


그림 2. N-channel과 P-channel MOSFET에서의 문턱 전압 변화

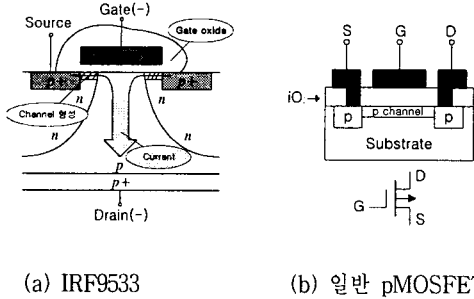
Fig. 2. Threshold voltage changes in N-channel and P-channel MOSFET.

그림 2는 N채널과 P채널 MOSFET의 총 방사선량 (total dose)에 대한 문턱 전압의 변화를 보여주고 있는데, N채널인 경우는 interface state의 영향을 크게 받아 문턱 전압 변화 곡선이 그림2와 같이 saturation 되는 특성을 보인다. 그러므로, 방사선 검출기로 사용할 경우는 interface state의 영향을 크게 받는 N채널 MOSFET보다 interface state의 영향이 별로 없는 P채널 MOSFET을 사용한다.

P채널 MOSFET 중에서도 P채널 Power MOSFET은 입력 임피던스가 매우 크고 전류를 적게 사용하고 미세 공정이 가능하기 때문에 집적회로 등의 소자에 광범위하게 쓰이고 있다. 바이폴라 트랜지스터나 솔라셀 등이 방사선 효과에 의해 변형되거나 분해되는 것과 달리 P채널 Power MOSFET은 동작영역(operation region)만 변하는 성질이 있다. 이러한 특성 커브 이동의 성질을 이용하여 P채널 Power MOSFET을 이온화 방사선 검출기로서 사용할 수 있다. 다음의 그림 3은 P채널 MOSFET의 구조를 나타낸 것이다.

그림 3의 (a) IRF9533 (P channel power MOSFET)의 드레인에 마이너스 전압, 소스에 플러스 전압, 게이트와 소스간에 (-)전압을 인가하면 게이트 쪽으로 홀이 물리면서 채널이 형성되어 소스에서 드레인 쪽으로 전

류가 흐른다. 이 경우 (b)일반 pMOSFET 보다 대전력 채널을 형성하므로 동일한 환경에서  $V_T$ 값이 우수한 선형적 특징을 갖고 있다.



(a) IRF9533 (P channel powerMOSFET)

(b) 일반 pMOSFET

그림 3. P-채널 MOSFET 단면도

Fig. 3. Cross section of P-channel MOSFET

2.2 Co-60 고준위  $\gamma$ 선을 이용한 pMOSFET의 특성 곡선

그림 4는 이러한 방사선 피폭량에 따른  $V_T$ 의 변위 현상, 즉 전류-전압 특성을 도시한 것으로서 방사선 조사에 따른 pMOSFET의 전류대 전압 출력특성 변화를 도시한 것이다. 방사선에 노출되지 않은 pMOSFET의 출력특성은 제일 왼쪽 곡선이며 방사선에 노출되어 피폭 방사선량이 증가할수록 출력특성 곡선은 점차 오른쪽으로 이동하게 된다

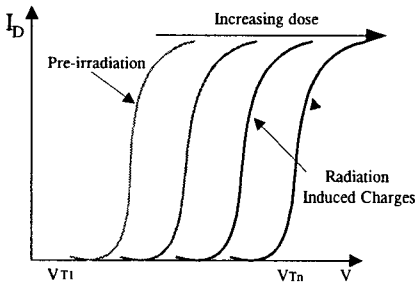


그림 4. 방사선 피폭에 따른 pMOSFET의 출력 특성 변화

Fig. 4. Output characteristics changes of pMOSFET caused by irradiation.

즉, 그림 4와 같이 방사선 피폭에 따른 pMOSFET의 출력 특성 변화 추이를 보면 방사선량이 누적됨에

따라  $V_T$ 가 오른쪽으로 변화됨을 알 수 있다. 따라서 이 원리를 이용하면 pMOSFET를 방사선량 측정용 센서로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

그러므로, pMOSFET를 이용한 방사선 선량계는 원자력 관련시설이나 우주공간, 암치료 센터 등에서 발생하는 방사선원과 방사선량을 정확히 감지되어야 할 필요성이 있는 분야에서 많이 사용되고 연구되고 있으며 방사능 세기에 따라 다양한 응용분야를 갖고 있다. 편의상 앞으로 P채널 Power MOSFET을 pMOSFET으로 기술하겠다.

III. 시스템 구성

이상의 원리를 이용하여 pMOSFET를 이용한 방사선량 측정 시스템을 구현하기 위해서는 방사선 누적에 따른  $V_T$ 의 변화를 측정하여야 한다. 이를 측정하기 위해서는 방사선에 노출된 pMOSFET를 그림 5에 나타낸 바와 같이 드레인에는 일정 전압을 인가하고 게이트에 전압을 가변하여 입력하여 드레인과 소스로 전류가 흐르기 시작하는 게이트 전압을 측정하면  $V_T$ 값을 알 수 있다.

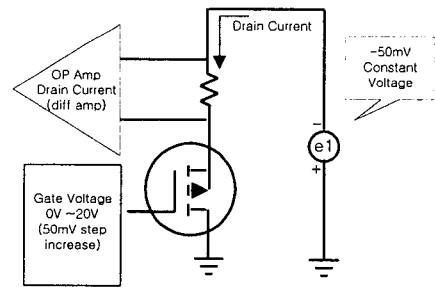


그림 5.  $V_T$ 를 검출하기 위한 개념도

Fig. 5. Conceptual block diagram for measuring the  $V_T$ .

이 실험장치에서 드레인과 소스의 전압을 일정하게 걸어주고 게이트에 걸리는 바이어스 전압을 변화시키면서 드레인 전류를 측정하였다. 이 때 드레인 전류가 흐르기 시작할 때의 게이트 바이어스 전압이 문턱 전압이다. 여기서 MOSFET이 p채널에 해당되므로 드레인 전압 및 게이트 전압, 드레인 전류, 문턱 전압 등이 모두 음의 부호를 갖는다.

3.1 하드웨어 구성

그림 5의 개념으로 pMOSFET를 사용하여 방사선량을 자동으로 검출하기 위해서는 드레인 쪽에 일정전압을 걸어 주는 전압원이 있어야 하고, 게이트의 전압을 가변하면서 인가하여 주기 위한 전압원이 필요하고, 마지막으로 드레인 전류를 검출하기 위한 아날로그 신호 입력부가 필요하다.

또한, 방사선 측정 시스템이 방사선 환경에서 동작하려면 내방사선 규격을 만족하여야 하는데 이는 시스템 가격의 상승을 가져오기 때문에 본 연구에서는 내방사선 구조로 처리가 되지 않은 저가의 시스템을 구현하기 위해서는 방사선 센서 측정부와 센서부는 격리되어야 하며, 방사선 조사시 어닐링 효과를 배제하고, 실시간 방사선 자동검출 이루어질 수 있도록 측정부와 센서부를 격리되어 있어야 한다.

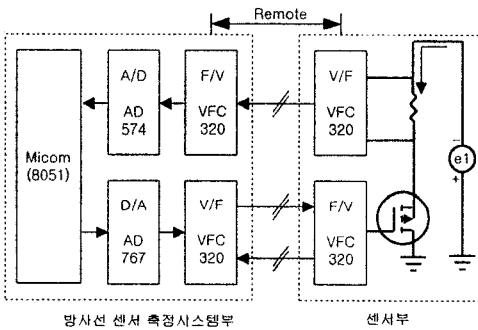


그림 6. 방사선량 측정 시스템 블록 다이어그램  
Fig. 6. Block diagram of system for measuring irradiation dosed

이의 설계 개념을 갖고 H/W 시스템은 그림 6과 같이 센서부와 센서 측정 시스템부로 나뉘어 구성하였다. pMOSFET의 게이트 전극에 D/A 컨버터를 사용하여 0V에서 -20V까지의 전압을 50mV스텝씩 가변하면서, 소스는 그라운드에 접지시켰고, 드레인에는 일정 전압(-50mV)을 인가하여 약 반전층(weak inversion layer)을 형성시킨 후 드레인의 전류를 측정하도록 시스템을 구성하였으며, 또한 측정부와 센서부를 격리시키기 위해 측정부와 센서부의 인터페이스는 V/F(Voltage to Frequency), F/V(Frequency to Voltage) 컨버터를 사용하였다.

또한, 설계된 시스템에서는 알고리즘에 의해 구해진

$V_T$  값과 Linear Fitting 함수값에 의해 계산된 피폭 방사선 값을 LCD로 디스플레이 할 수 있도록 하였고, 시스템 확장을 위해 RS232 통신 채널을 통해 PC와 인터페이스 가능하도록 구현하였다. 이렇게 구현된 시스템은 그림 7과 같다.

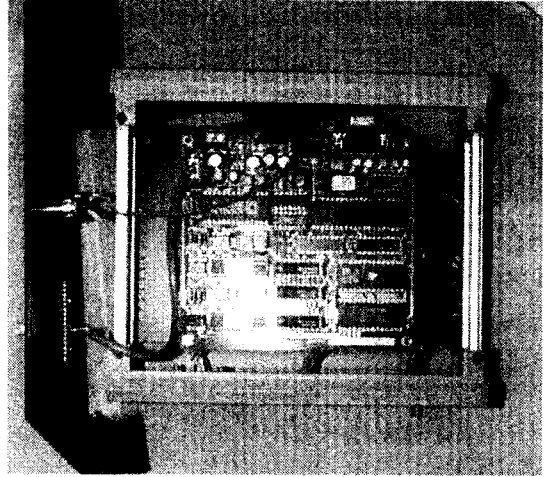


그림 7. 방사선량 측정 시스템 사진  
Fig. 7. Photography of system for measuring irradiation dosed

3.2 소프트웨어 알고리즘

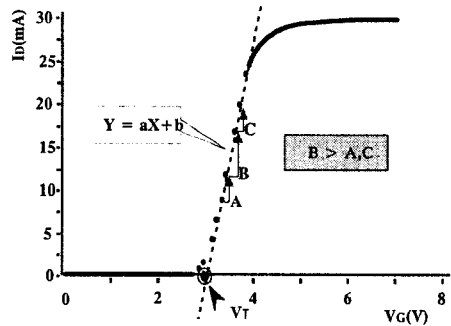


그림 8. 출력특성곡선에서의  $V_T$  추출  
Fig. 8. Extraction of  $V_T$  from I-V curve.

그림 8은 pMOSFET의 게이트 전압의 증가에 대한 드레인 전류의 출력특성 곡선을 도시한 것이다. 이 출력특성 곡선에서  $V_T$ 값을 추출하기 위해서는 곡선 각 지점에서의 최대 트랜스컨덕턴스( $g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G}$ )

변화 값을 가지는 B점을 구한 후 그 지점으로부터 밑에 위치한 다섯 지점의 값을 자료로 하는 그래프로 표현할 수 있다. 이 그래프로부터 게이트 전압과 드레인 전류의 실제 관계는 선형인 것으로 나타났다. 자료 수집 절차에서의 오차 때문에 정확히 자료와 일치하는 직선의 방정식은 없을 것이다. 이런 경우, 각 점에서 자료와 정확히 일치하지는 않지만 최선의 근사선을 찾는 방법으로서 정리 1에 기술한 선형 최소 자승법(Linear Least Squares)을 도입하였다. 직선의 방정식 ( $y = ax + b$ )에  $x$ -절편 즉, 전류값  $I_D = 0$ 을 대입하므로서 반전층을 형성하는 게이트전압의 최소값인 문턱전압  $V_T$ 를 구할 수 있다.

정리 1 : 선형 최소 자승법(linear least squares)

최소 자승법은 최선의 선형 근사를 구하는 가장 편리한 절차로서, 이 방법을 뒷받침하는 중요한 이론적 배경을 가지고 있다. 최소 최대법은 오차가 큰 자료에 너무 큰 가중치를 주는 반면, 절대 편차법은 여러 점에서의 오차를 단순히 평균하여 근사선에서 크게 벗어난 자료에 충분한 가중치를 주지 않는다. 최소 자승법은 다른 자료보다 근사선에서 벗어난 자료에 충분히 큰 가중치를 주지만 그 자료가 근사선에 큰 영향을 미치는 않게 하는 장점을 가지고 있다. 최선의 최소 자승선을 자료군에 맞추는 일반적인 문제는 매개 변수  $a, b$ 에 대하여 오차의 합

$$E_2(a, b) = \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (1)$$

을 최소화 시키는 것이다.

이 오차의 합이 최소가 되려면 식 (2)와 (3)을 만족시켜야 한다.

$$0 = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)]^2 = 2 \sum_{i=1}^m (y_i - ax_i - b)(-x_i) \quad (2)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^m (y_i - ax_i - b)^2 = 2 \sum_{i=1}^m (y_i - ax_i - b)(-1) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 이용하여 선형 최소 자승의 해를 구하면

$$y = ax + b \quad (4)$$

의 형태로 나타나는데  $a$ 와  $b$ 는 식 (5)와 (6)로 표현

된다.

$$a = \frac{m(\sum_{i=1}^m x_i y_i) - (\sum_{i=1}^m x_i)(\sum_{i=1}^m y_i)}{m(\sum_{i=1}^m x_i^2) - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^m x_i^2)(\sum_{i=1}^m y_i) - (\sum_{i=1}^m x_i y_i)(\sum_{i=1}^m x_i)}{m(\sum_{i=1}^m x_i^2) - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (6)$$

그림 9에는 실시간으로 문턱전압  $V_T$ 를 구하기 위한 알고리즘을 나타내었으며, 그림 10에는 알고리즘의 검증을 위해 PC 상에 구현한 프로그램을 나타내었다. 프로그램 화면은  $V_T$ 의 출력 특성 곡선 표시부(①), 게이트 전압의 데이터 값과 드레인 전류 데이터 값 표시부(②), 알고리즘 의해 구해진  $V_T$  값 표시부(③), 총 방사선량 표시부(④)로 구성되어 있다.

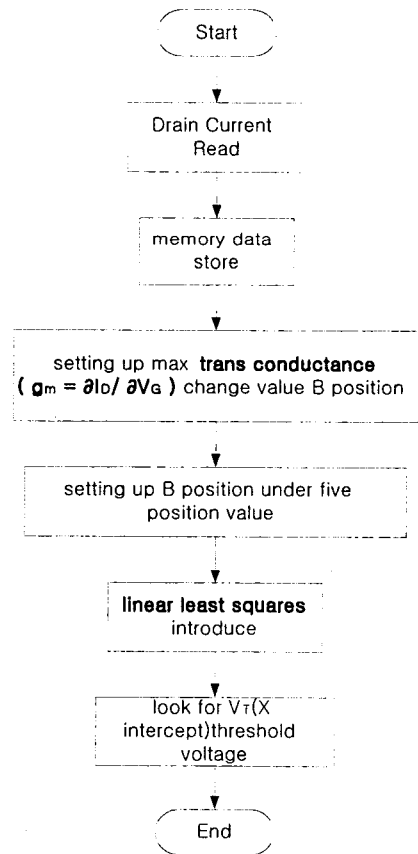


그림 9.  $V_T$ (문턱전압) 추출을 위한 알고리즘 흐름도  
Fig. 9. Flow chart of  $V_T$  extraction algorithm.

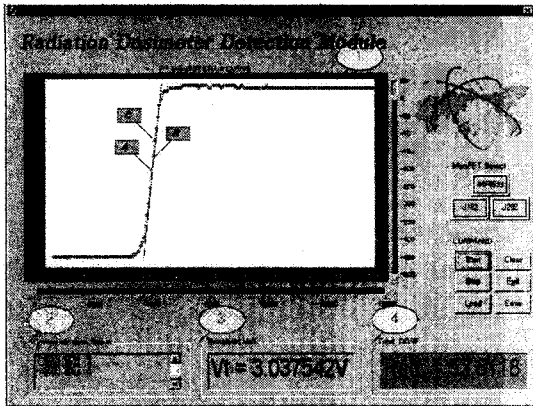


그림 10. 출력 특성곡선에서  $V_T$  추출 검증용 프로그램  
Fig. 10. Verifying program for extraction of  $V_T$  from I-V curve.

IV. 실험 및 고찰

설계·제작된 pMOSFET를 사용한 방사선 선량 측정 시스템의 성능을 평가하기 위하여 Co-60 고준위 γ선 조사시설에서 그림 11과 같이 설치한 후 방사선 조사 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 pMOSFET 소자로는 테스트를 거쳐서 전기적 출력특성이 동일한 것으로 선별된 IRF9533, J182, J202 소자를 사용하였다.

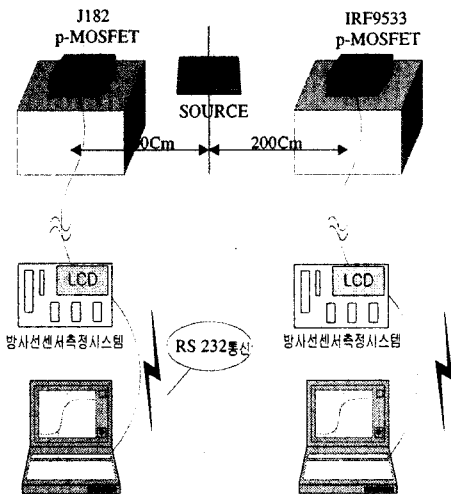


그림 11. p-MOSFET 방사선 센서 측정 시스템 구성도  
Fig. 11. Composition of system for measuring radiation sensor pMOSFET.

방사선 조사 시 그림 11과 같이 시스템을 구성한 후, 7 단계로 나누어 이온화 방사선에 의한 특성변화를 측정하였다. 방사선 조사시 p-MOSFET의 게이트 전극에 0V에서 -20V까지의 전압을 50mV스텝씩 증가하고, 드레인에는 일정전압(-50mV)을 증가하였으며, 소스는 그라운드에 접지 시켰다. 조사 방사선의 최대량은 100KRad로 설정하고 이에 따른 조사율은 시간당 10KRad/h가 되도록 했다.

표 2. Co-60 γ선원 조사 방법

Table 2. Irradiation method of Co-60 gamma rays

Step	1	2	3	4	5	6	7
Distance(cm)	200	200	200	200	200	200	100
Dose Rate(KRad/h)	10	10	10	10	10	10	50
Total Hour(min)	5	10	30	60	120	300	360
Total Dose(KRad)	1	2	5	10	20	50	100

표 2에서 처럼 7 단계의 서로 다른 총방사선량을 피폭하기 위해 1~6 단계까지는 p-MOSFET를 선원으로 부터 200cm의 거리에 위치하도록 고정된 다음 (10KRad/h), 시간을 조절하여 총 방사선 피폭량이 조절되도록 하였으며 7 단계는 실험 시간을 줄이기 위해 선원으로부터 거리를 100cm에 두고 순간 선량 50KRad/h이 되도록 하였으며, 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.

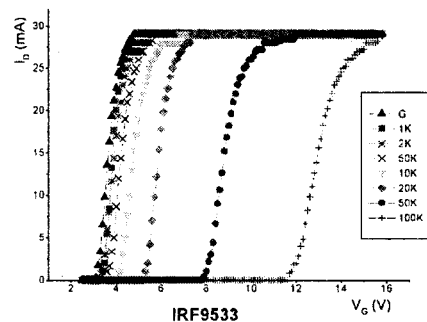


그림 12. pMOSFET(IRF9533)의 출력 특성  
Fig. 12. Output characteristics of pMOSFET (IRF9533).

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 IRF9533, J182, J202의 출력특성은 그림 12에서 그림 14과 같으며 이 출력특성 커브를 분석한 결과 방사선 조사량에 따라 출력 특성커브가 오른쪽으로 이동됨을 알 수 있었다.

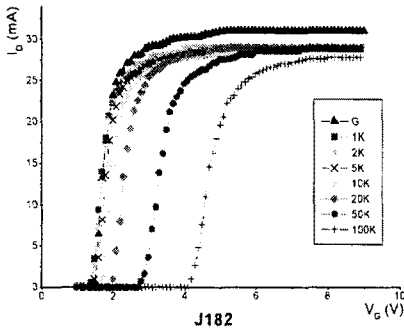


그림 13. pMOSFET(J182)의 출력 특성  
Fig. 13. Output characteristics of pMOSFET(J182).

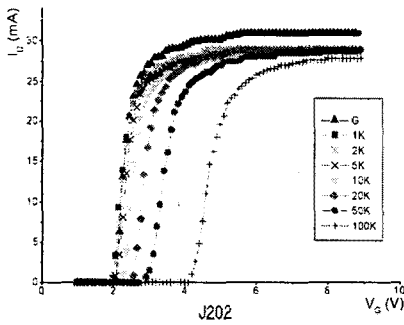


그림 14. pMOSFET(J202)의 출력 특성  
Fig. 14. Output characteristics of pMOSFET(J202).

위의 결과에서 IRF9533의 문턱 전압이 J182나 J202보다 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 그 이유는 IRF9533의 산화층의 두께가 더 두껍기 때문이다. Oxide의 두께가 더 두꺼워지면 반도체 내에 똑같은 크기의 전계를 걸어주기 위해서 더 큰 바이어스 전압이 필요하게 된다.

방사선 조사량을 결정짓는  $V_T$  값은 소프트웨어 알고리즘에 의해 구해진다. 이 직선의  $x$  절편 값에서 구하고자 하는  $V_T$  값은 표 3과 같다.

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	J202
0	3.26	1.49	1.98
1	3.41	1.52	2.00
2	3.42	1.56	2.02
5	3.80	1.62	2.09
10	4.20	1.80	2.19
20	5.30	2.10	2.40
50	8.06	3.00	3.01
100	11.90	4.32	4.02

그림 15에서 그림 17까지는 방사선량의 변화값에 대한 문턱 전압의 변화특성을 나타낸 것이다. 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 선형특성은 방사선 선량계를 목적으로 특수 설계한 pMOSFET에서도 얻기 힘든 것으로 평가된다.

이상의 실험 결과 구조상의 특징에 의해 산화층의 두께가 얇은 IRF9533 MOSFET은 동작영역이 작지만 더 민감하다는 장점이 있고, J182나 J202는 넓은 영역의 피폭량까지 작동하는 장점이 있다.

이 직선의 방정식은 선형 최소 자승법을 통해 (식 4)와 같이 표현되며, 이는 방사선 누적선량 값( $y$ )이 일차함수로 표현된다.

방사선 누적선량 값( $y$ )은 IRF9533의 경우  $V_T(x)$ 의 함수

$$y = 0.087x + 3.368 \quad (7)$$

로 나타낼 수 있으며, J182의 경우  $V_T(x)$ 의 함수

$$y = 0.029x + 1.506 \quad (8)$$

로 나타낼 수 있으며, J202의 경우  $V_T(x)$ 의 함수

$$y = 0.021x + 1.980 \quad (9)$$

이 된다.

즉, IRF9533, J182, J202의 경우에  $V_T(x)$ 의 함수는 표 4와 같이 표현된다.



표 4. 누적선량 vs.  $V_T$  변화의 일차함수

Table 4. A simple function of accumulated dose vs.  $V_T$  shift.

IRF9533	$y(\text{total dose}) = 0.087 \chi (V_T \text{ shift}) + 3.368$
J182	$y(\text{total dose}) = 0.029 \chi (V_T \text{ shift}) + 1.506$
J202	$y(\text{total dose}) = 0.021 \chi (V_T \text{ shift}) + 1.980$

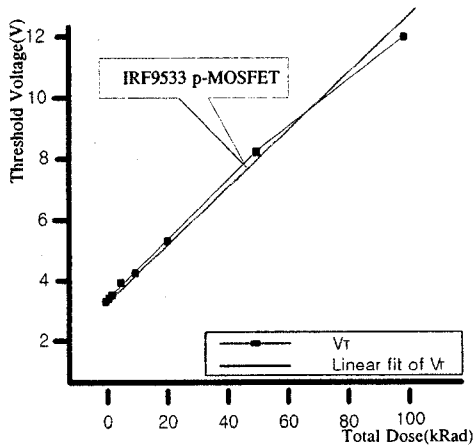


그림 15. IRF9533의 누적 방사선 피폭선량 대  $V_T$  변이  
Fig. 15. Accumulated radiation dose vs.  $V_T$  shift of IRF9533 .

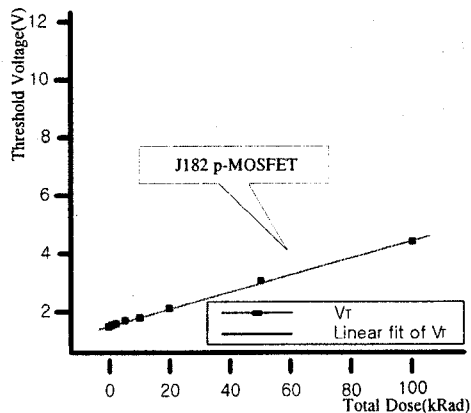


그림 16. J182의 누적 방사선 피폭선량 대  $V_T$  변이  
Fig. 16. Accumulated radiation dose vs.  $V_T$  shift of J182.

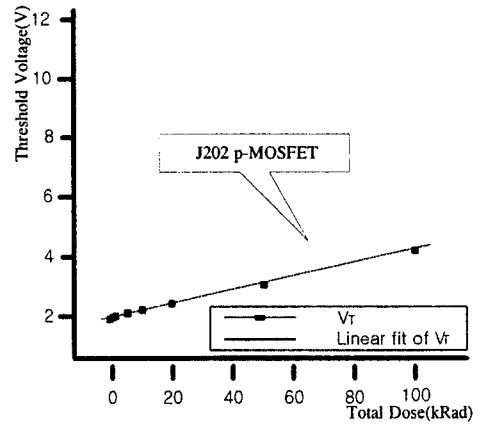


그림 17. J202의 누적 방사선 피폭선량 대  $V_T$  변이  
Fig. 17. Accumulated radiation dose vs.  $V_T$  shift of J202.

이상의 시스템 실험 결과 pMOSFET 소자의 방사선 조사에 의한  $V_T$  출력특성 변위현상은 우수한 선형적 특성을 지님을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 그림 7과 같이 설계·제작된 pMOSFET를 사용한 방사선량 측정 시스템은 원자력 관련시설이나 우주 환경 측정, 암치료 센터 등에서 방사선량 측정 시스템으로 활용될 수 있으리라 판단된다.

### V. 결론

본 논문에서는 pMOSFET를 이용하여 방사선 총 누적선량 모니터링하기 위한 실시간 측정 시스템을 설계·제작하였다. 방사선량을 측정하기 위한 센서로는 IRF9533, J182, J202 pMOSFET를 사용하였으며, 설계·제작된 센서 시스템의 성능을 분석하기 위하여 pMOSFET를 Co-60 γ선 고준위 시설에서 미리 정한 여러 가지 단계의 방사능 세기로 조사시키는 방사선 실험을 수행하였으며, 이 실험을 거쳐 pMOSFET IRF9533, J182, J202의 특성을 분석, 고찰하였다.

실험결과 IRF9533, J182, J202 pMOSFET는 방사선 조사에 의한  $V_T$  변위 현상을 직선함수로 근사시킬 수 있음을 알 수 있었고, 이 중에서도 IRF9533은 다른 pMOSFET보다 Dose의 영역이 좁다는 단점이 있지만 sensitive하다는 장점이 있음을 나타내었다. 이 선형 함수관계를 이용하여 저가의 상용 pMOSFET를 사용한

방사선 총 누적선량을 모니터링하기 위한 센서로 사용할 수 있음을 확인하였다. 이는 일부 선진 외국에서 특수 제작한 고가의 방사선 센서를 저가의 센서로 사용될 수 있어 저가의 시스템을 구축하는데 많이 활용될 수 있으리라 기대된다.

또한, 본 연구에서는 이 pMOSFET를 사용하여 방사선 선량계를 구현한 결과 저가적으로 실시간 계측이 가능함을 확인하였다.

MOSFET은 그 구조의 단순성에 의해 앞으로도 총 방사선량을 측정하기 위한 도구로 많이 사용될 전망이다. MOSFET의 특성에 대한 물리적 이해와 이를 바탕으로 한 모델의 개발이 실험과 함께 연구를 병행하여 정밀성과 실시간을 증대하고자 한다. 또한 열에 의한 어닐링의 영향에 대해서도 연구를 병행할 예정이다.

참고문헌

[1] P. N. Cooper, *Introduction to Nuclear Radiation Detector*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 84~96, 1986.

[2] 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.

[3] G. Mackay, I. Thomson, C. R. Hirring, 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, "The Space-Charge Dosimeter," *Nuclear. Instruments. & Methods*, vol. 121, pp. 169~179, 1974.

[5] 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.

[6] 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



**한 상 현**  
 1999 건양대학교 컴퓨터공학과(공학사), 1999~현재 건양대학교 대학원 정보전자공학과(재학중)  
 관심분야 : 센서시스템 및 신호처리

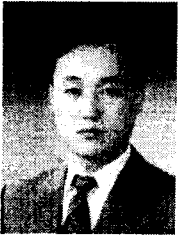


**지 용 근**  
 1999 건양대학교 컴퓨터공학과(공학사), 1999~현재 건양대학교 대학원 정보전자공학과(재학중)  
 관심분야 : 의용공학, 신호처리, 마이크로프로세서응용



**권 오 상**  
 1990 인하대학교 전자공학과(공학사), 1992 인하대학교 대학원 (공학석사), 1995~1999 인하대학교 공학박사, 1992.1.~1996.2. 대우중공업(주) 주임연구원, 1999.3 ~ 2000.1 건양대학교 전임강사, 2000.1 ~ 현재 (주)한울로보틱스 기술개발실장  
 관심분야:의용공학, 센서시스템 및 신호처리,서비스로봇

**민 홍 기**  
 『센서학회지 제8권 제1호』 논문99-8-1-10, p79 참조  
 현재 인천대학교 정보통신공학과 부교수



이 응 혁

1985 인하대학교 전자공학과 (공학사), 1987 인하대학교 대학원 전자공학과 (공학석사), 1997 인하대학교 대학원 전자공학과 (공학박사), 1987~1992 대우중공업(주) 중앙연구소 주임연구원, 1992~1993 생산

기술연구원 HDTV 개발실 연구원, 1995~2000 건양대학교 컴퓨터공학과 조교수, 1998~현재 대한의용생체공학회 정보위원회 위원, 1999~현재 한국원자력연구소 위촉연구원, 2000~현재 한국산업기술대학교 전자공학과 조교수

전문분야: 이동로봇 경로계획 및 센서신호처리, 재활공학 및 의용전자, 영상 신호처리, 마이크로프로세서응용