

KAEROT/m2용 방사선 수명 측정모듈 개발

The development of radiation lifetime measuring module for KAEROT/m2

이 남 호*, 김 승 호*, 김 양 모**

* 한국원자력연구소 원자력로봇랩(전화:(042)868-2931, 팩스:(042)868-8833, E-mail : nhlee@kaeri.re.kr)

** 충남대학교원대학교 전기공학과(전화:(042)821-5657, 팩스:(042)823-7970, E-mail : ymkim@cnu.ac.kr)

Abstract : The electronics of a mobile robot in nuclear facilities is required to satisfied the reliability to sustain survival in its radiation environment. To know how much radiation the robot has been encountered to replace sensitive electronic parts, a dosimeter to measure total accumulated dose is necessary. Among many radiation dosimeters or detectors, semiconductor radiation sensors have advantages in terms of power requirements and their sizes over conventional detectors. This paper describes the use of the radiation-induced threshold voltage change of a commercial power pMOSFET as an accumulated radiation dose monitoring mean and that of the photo-current of a commercial PIN Diode as a dose-rate measurement mean. Commercial p-type power MOSFETs and PIN Diodes were tested in a Co-60 gamma irradiation facility to see their capabilities as radiation sensors. We found an inexpensive commercial power pMOSFET that shows good linearity in their threshold voltage shift with radiation dose and a PIN diode that shows good linearity in its photo-current change with dose-rate. According to these findings, a radiation hardened hybrid electronic radiation dosimeter for nuclear robots has been developed for the first time. This small hybrid dosimeter has also an advantage in the point of view of reliability improvement by using a diversity concept.

Keywords : radiation, pMOSFET, robot, dosimeter, PIN diode, hybrid

1. 서 론

중수로형 원전에서는 전 출력(Full Power) 운전중의 작업시 핵연료의 교체가 이루어지므로 운전중 원자로의 감시가 요구된다. 실제 칼란드리아 튜브에서 냉각재 누출(Loss of coolant) 사고가 발생된 사례를 보더라도 운전 중 비전 검사는 꼭 필요하다고 할 수 있다. 이러한 현장의 필요성에 의해 내방사선 이동로봇(KAEROT/m2) 시스템은 칼란드리아 전면부의 운전중 감시 점검작업 수행을 목적으로 개발되었다(그림 1). 이동 로봇의 작업중 760여개의 칼란드리아 전면부 급수배관 및 end-fitting 검사는 이동 로봇에 상당히 많은 방사선이 피폭되고, 로봇에 대한 다량의 방사선 피폭은 상대적으로 방사선에 취약한 로봇 제어보드 등의 전자부품에 심각한 영향을 미치게 되어 로봇의 오동작 및 치명적 고장의 원인이 된다.

그러나 방사선에 민감한 부분에 대한 총 피폭 방사선의 누적량을 측정을 통하여 알면 이동 로봇의 고방사선 환경 작업중 방사선 피폭으로 인한 예기치 못한 고장이나 오동작을 미연에 방지할 수 있다. 즉 실시간으로 제공되는 방사선 정보에 따라 운전원은 로봇의 총 누적 피폭 방사선량이 설계치를 초과하기 직전에 고방사선 구역으로부터 안전한 곳으로 로봇을 철수시킬 수 있다. 피폭 방사선량에 대한 정보를 얻기 위해 로봇은 최소 하나 이상의 방사선 센서를 장착하고 있

어야 한다. 하지만 현재 칼란드리아 전면부 작업 환경에서 로봇의 내방사선화 설계 기준인 100krad 범위의 방사선을 누적 감지할 수 있는 이동 로봇용 소형 도시미터는 구하기가 어려운 실정이다. 이에 따라 고준위 방사선환경 작업용 이동 로봇에 탑재가 용이한 새로운 방사선 선량계의 개발이 필요하게 되었다.

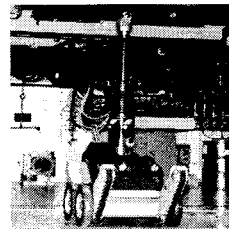


그림 1. 칼란드리아 전면부 검사용 로봇

본 논문에서는 실리콘형 반도체 센서로서 저가인 상용의 PIN 다이오드와 파워 pMOSFET를 이용한 감마선 통합 방사선 도시미터 (HERD, Hybrid Electronic Radiation Dosimeter)의 개발에 관하여 기술하였다. 이를 위해 우선 상용의 PIN 다이오드(PH302, NEC사)와 파워 pMOSFET (J182, 히다치사)를 Co-60 감마선원을 갖춘 한국원자력연구소 저준위 조사시설에서 피폭 방

사선에 대한 각각의 출력특성 변화를 분석하였다.

2. 반도체 센서를 이용한 방사선 계측

가. 반도체의 방사선 영향

1) pMOSFET

MOSFET는 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체 소자의 일종으로 소자내 산화물층(SiO₂)으로 절연된 게이트의 인가 전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 문턱전압(V_T) 이상이면 작동(on)하고, 그 이하이면 정지(off)하게 된다. MOSFET이 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. 이 때 p-MOSFET의 게이트에 양의 전압을 인가하면 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 SiO₂의 불완전한 결합 형태에 갇혀 정공트랩으로 형성되기도 하고, Si/SiO₂ 결합층 계면에서도 트랩 상태로 축적된다^[6]. 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_T의 변위현상이라 하고 식 (1)에서와 같이 표현된다.

$$\Delta V_T = \frac{-1}{C_{OX}} \int_0^t \Delta \rho_{OX}(x) \frac{x}{t} dx \quad (1)$$

여기서, C_{OX}는 산화물층의 정전용량, Δρ_{OX}는 산화물층 전하 밀도의 변화, t는 산화물층의 두께, 그리고 x는 게이트 상단부로부터의 측정거리이다.

그러므로 V_T 값은 MOSFET를 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수가 된다. 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 산화물층의 두께를 조절하거나, 게이트를 이중 구조형으로 특수 제작하는 방법이 있다. 일반적으로 방사선 의학분야와 개인 선량계로 사용되는 MOSFET의 감도는 원자력이나 우주에서 사용될 때 보다 감도가 높아야 한다^[6].

2) PIN 다이오드

다이오드에 이온화 방사선이 조사되면 전성 영역

(Intrinsic Region)에서 전자-정공 쌍이 생성된다. 이때 외부에 인가된 역바이어스에 의해 형성된 전계에 따라 양극으로 전자 정공이 분리되어 빠르게 이동되는 과정에서 다음의 식 (2)에서 처럼 순간 전류 펄스가 발생하게 된다.

$$I(t) = qg_0\gamma(t)WA \quad (2)$$

여기서, q는 전자의 전하량, g₀는 전자-정공쌍 /cm³/rad(4.3x10³), γ는 방사선을, W는 공핍 영역의 두께, 그리고 A는 다이오드의 면적이다.

저 준위 방사선에 의해 생성되는 전류 펄스가 높은 준위의 방사선에 의해서는 전류의 흐름을 형성하게 되고 이 발생 전류는 순간 방사선의 세기에 비례하여 증가하는 특성을 갖고 있기 때문에 순간 방사선을 계속 시 이를 변수로 사용할 수 있다.

3. 방사선 조사 실험 및 결과

가. 방사선 조사 실험

1) pMOSFET

상용 pMOSFET을 방사선 선량계로서 이용하기 위한 방사선 실험을 Co-60 고준위 γ선 조사시설에서 수행하였다. 실험에 사용된 MOSFET 소자로는 테스트를 거쳐서 전기적 출력특성이 동일한 것 중에서 선별된 하다치사의 J182 소자를 사용하였다.

모두 7 단계로 나누어 사전에 정해진 방사선량을 조사하면서 온 라인으로 전기적 특성변화를 측정하였다. 방사선 조사시 MOSFET의 게이트 전극에 DC 6V의 전압을 인가하고, 소스와 드레인을 그라운드에 접지시켰는데, 이는 방사선 피폭으로 인해 분리된 전자와 정공이 즉시 재결합하는 것을 방지함으로써 방사선에 대한 감도를 높이기 위해서이다. 총 조사 방사선의 최대량은 100krad로 설정하고 이에 따른 조사율은 시간당 10krad/h가 되도록 했다. 일곱 단계의 서로 다른 방사선량을 피폭하기 위해 1~6 단계까지는 MOSFET를 선원으로부터 189cm의 거리에 위치하도록 고정한다. 다음(10krad/h), 시간을 조절하여 총 방사선 피폭량이 조절되도록 하였으며, 마지막 7 단계에서는 실험 시간을 줄이기 위해 선원으로부터 거리를 71cm에 두고 순간 선량을 50krad/h로 높여 조사하여, 본 실험의 총 피폭시간 360분, 총 피폭선량 100krad가 되도록 하였다. 이 최종 피폭 방사선량은 이동 로봇의 내방사선 설계치와 일치하도록 결정된 값이다.

2) PIN 포트 다이오드

실험에 사용된 PIN 다이오드는 NEC사의 PH302이다. PH302는 pMOSFET와 마찬가지로 저준위 방사선 조사시설에서 사전에 결정된 방사선량을 조사하였다. 시간당 일정 방사선량을 조사하면서 온-라인으로 PIN 다이오드에서 발생하는 역방향 전류를 측정하는 과정

을 반복하여 시행하였다. 이 방사선율은 실제 이동 로봇의 작업 환경인 중수로 칼란드리아에서 나타나는 방사선율과 비슷한 범위로 설정한 값이며, 여기에 부가적으로 예상치 못한 상황 발생에서 나타날 수 있는 높은 선량율의 범위까지 방사선율의 값을 확대하여 실험에 적용하였다.

나. 방사선 조사시험 결과

1) pMOSFET

방사선 조사 단계에서와는 달리 MOSFET에 누적된 방사선량을 확인하기 위한 측정 단계에서는 MOSFET의 드레인 단자에 약한 정전류(50 μ A)를 공급하면서 이때 나타나는 게이트 전압을 읽어 문턱 전압 값으로 측정하였다. 여기에서 구한 J182의 출력특성은 그림 2와 같았으며, 이 출력특성 커브를 분석한 결과 방사선 조사량에 따라 출력 특성커브가 오른쪽으로 점점 이동됨을 알 수 있었다.

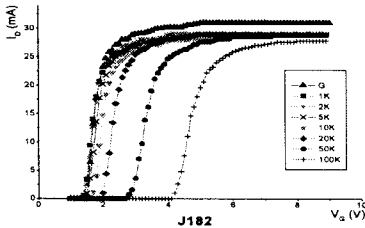


그림 2. 피폭 방사량에 따른 출력특성 변화

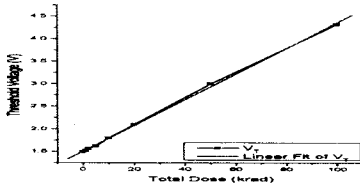


그림 3. 누적 방사선량 대 V_T 변이

그림 3에서는 각 방사선 피폭량에 대한 J182 power pMOSFET의 V_T 값의 변화를 조사 방사선량에 대하여 나타내었다. 이것은 pMOSFET소자에 대하여 감마선 방사선 피폭이 어떻게 영향을 미치는가를 도식적으로 보여주는 것으로서 방사선 피폭량에 따른 V_T 변화가 거의 선형적으로 비례하므로 이상적인 방사선 누적 선량계의 센서로서의 충분한 가능성을 보여준다.

그림 3의 그래프를 총 피폭량과 V_T 변화의 관계로 선형근사법에 의해 직선 방정식($Y = aX + b$)으로 근사시킬 수 있다. 이와 같이 도출한 직선방정식의 계수는 a 가 0.029, b 는 1.506이었다. 즉 방사선 누적선량 값(Y)을 V_T (X)의 함수로 아래와 같이 나타낼 수 있다

$$Y = 0.029 \cdot X + 1.506 \quad (3)$$

2) PIN 다이오드

그림 4는 기결정된 방사선율로 조사하면서 온라인으로 HP4155 반도체 변수 측정기를 통해서 측정한 I-V 값을 그래프로 도시한 것으로 음과 무 바이어스 상태 부분만을 나타내었다. 이 경우 PIN 다이오드의 역방향 전류는 조사한 방사선율에 비례하는 특성을 갖는다는 것과 각각의 경우 PIN 다이오드에 인가한 역전압에 의해서는 상대적으로 작은 영향을 받게 되는 것을 알 수 있다. 방사선 감지기 모듈에서의 전력소모를 최소화시키기 위해 약한 바이어스를 인가한 상태에서 사용하였으며, 이러한 방법으로 각 실험 단계에서의 피폭 방사선율과 역전류 사이의 관계치를 도시한 것이 그림 5이다. 이 그래프에서 전압 인가 값과 생성된 역전류 값 사이의 일차원 함수를 선형근사 함수를 통해 구해진 직선함수는

$$Y = -5.48E-12 X + 2.77E-10 \quad (4)$$

로 표현이 가능하다. 여기서 Y 는 광전류, X 는 피폭 방사선율이다.

위의 내용에서 PIN 다이오드에서의 피폭 방사선율과 생성된 역전류 사이에는 비례관계가 형성되고 이 관계는 직선의 함수로 결정할 수 있다. 이 함수는 동일 PIN 다이오드를 이용하여 방사선량계를 설계하는 경우에 정량화 함수로 사용된다.

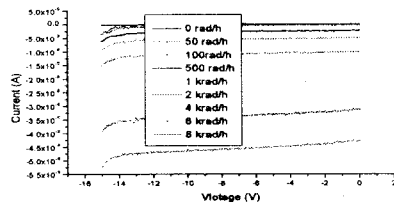


그림 4. 방사선율에 대한 생성 광전류

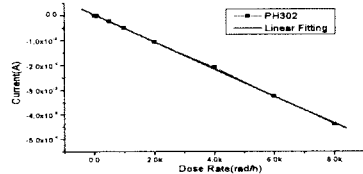


그림 5. 피폭 방사선율대 역방향 전류량

4. 온라인 선량계 구현

과워 pMOSFET와 PIN 다이오드의 방사선량/선율 시험에서 도출한 방사선에 대한 반도체 소자의 전기적 특성변화 관계함수를 역으로 이용하게 되면 이를 반도체 소자를 방사선 감지 센서로 사용이 가능하다. 즉

피폭 누적 방사선량에 의해 변화된 pMOSFET의 문턱 전압치와 조사된 방사선율에 따른 다이오드내 생성 광전류의 양을 계량하면 각각의 소자에 대한 방사선량/선율을 알 수 있게 되기 때문이다. 실험을 통해 획득한 반도체 소자의 방사선에 대한 전기적 특성 변화량을 온-라인 실시간으로 감지하고 이에 대응하는 방사선량/선율을 자동으로 나타내줄 수 있는 모듈을 그림 6과 같은 형태로 설계 제작하였다.

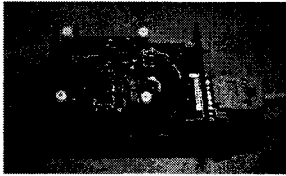


그림 6. 제작 모듈(내부)

여기에서 MOSFET부는 실험을 통해 결정된 낮은 고정 드레인 전류값(I_d)을 인가하고 이때의 게이트 전압을 통하여 문턱전압을 추출하는 정전류 방식을 사용하여 소형의 저 전력 소모형으로 구현하였다. 그리고 다이오드 부는 약한 역전압(-3V)을 인가 한 상태에서 방사선에 의해 다이오드의 내부로부터 생성된 광 전류의 양을 증폭하여 측정하는 방법으로 간편하게 구현하였다. 그리고 본 통합 방사선 선량계의 사용 환경은 이동 로봇의 작업환경인 고방사선 구역이라는 점을 감안하여 관련회로 부품은 모두 방사선에 내성을 가진 전자 소자만으로 구성함으로써 방사선 감지회로에서의 방사선 피폭으로 인한 특성변화를 최소화하였다.

본 소형 통합 방사선 감지기에서 획득한 방사선 정보는 원격의 이동 로봇 제어반의 화면에 표시하고 있다. 두 센서로부터 입력되는 방사선의 누적량과 순간 변화율을 각각의 지시기에 나타내고, 원하는 시간 간격 및 기간 동안에 PIN 다이오드로부터 발생하는 방사선율의 합이 pMOSFET에서 획득된 누적 방사선량의 값과 하나의 그래프 상에서 비교 디스플레이 하는 기능이 있다. 그리고 이 두 값의 차이가 지정한 일정 설정치를 초과할 경우 방사선 센싱에서의 에러로서 간주되어 운전원에게 알려주는 경고 기능을 가지고 있다.

이것은 중요하고도 심각한 방사선 신호의 계속에 있어서 서로 특성이 다른 두 종류의 센서를 사용하여 동일한 방사선 값을 계측하고 두 값을 비교함으로써 원전 및 방사선 관련시설에서 요구되는 다양성(Diversity)과 다중성(Redundancy)의 개념을 적용하여 고준위 작업용 이동 로봇에서의 방사선에 대한 안전성과 방사선 정보에 대한 신뢰도를 증대시켰다.

5. 결론

본 논문에서는 저가인 상용의 PIN 다이오드와 파워 pMOSFET을 이용한 감마선 통합 방사선 감지기 개발에 관하여 논하였다. 이를 위해 두 반도체에 대한 방

사선 조사시험을 통해 방사선에 대한 각 소자의 전기적 특성 변화를 분석하였다. 방사선 실험 결과 다이오드는 피폭 방사선율에 대하여 비례하는 광전류를 형성하였고, MOSFET는 조사된 총 누적 방사선량 비례하여 문턱전압 변화된과 이 변화에는 선형적 특성을 알 수 있었고 이 결과들로부터 상용의 파워 pMOSFET를 감마선 총 누적 선량센서로, 또한 상용의 PIN 다이오드를 감마선의 순간 방사선율 센서로 사용하여 총 피폭 방사선량과 순간 방사선율을 감지할 수 있는 통합 방사선 감지기를 단일 소형모듈로 구현하였다.

본 통합 방사선 감지기는 모두 전자적 센서이므로 실시간 온라인 방사선량 계측이 가능하다는 점 이외에 하나의 감지기 모듈 내에 두 가지 서로 다른 특성의 센서를 사용하고 동일한 방사선량을 계측할 수 있게 함으로써 다양성과 다중성의 개념을 적용하여 원자력 시설 작업용 로봇의 안전성과 방사선 계측에서의 신뢰도를 증대 시켰다.

향후 현재 연구 중인 반도체형 중성자 탐지기를 부가하여 감마/중성자용 방사선 통합 감지기를 개발할 예정이다.

참고 문헌

- (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. Hirling, and M. Zeya: "Gamma-ray Dose Mapping in Operational CANDU Reactor Containment Areas using MOS Dosimeters," ASTM publication, pp. 441-446, 1994.
- (4) Geun U. Youk: "Dose Rate Effects of a Bipolar A/D Converter," NSREC '96 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 1996
- (5) 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
- (6) 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.
- (7) Andrew Holmes-Siedle: "The Space-Charge Dosimeter," Nuclear. Instruments. & Methods, vol. 121, pp. 169~179, 1974.