

원자로 검사 로봇용 고준위 방사선 측정기 구현

The development of a high level radiation detector for reactor inspection robot

이남호*, 조재완**, 김승호***
Nam-Ho Lee*, Jai-Wan Cho**, Seung-Ho Kim***

Abstract - 원자력발전소 내 원자로의 유지보수 작업을 수행하는 수중로봇은 고준위 방사선에 노출되고, 이로 인해 전자 장치의 오동작 및 고장이 유발될 수 있다. 따라서 허용 방사선량을 초과하지 않도록 피폭되는 누적 방사선량을 실시간으로 모니터링하는 장치가 필수적이다. 본 연구에서는 펄스형의 SiC 포토 다이오드와 선량 기억형인 MOSFET를 다중 방사선 센서로 사용하여 넓은 범위의 방사선 준위의 측정이 가능하고 측정 신뢰도가 향상된 고준위 방사선 측정기를 구현하였다. 이 장치는 측정 원리가 상이한 두 센서를 동일한 방사선 측정에 이용함으로써 방사선 측정의 안정성과 정확성이 향상된 것이 특징이다.

Key Words : Nuclear, Radiation, Detector, SiC, MOSFET

1. 서 론

원자로나 우주와 같은 극한 환경에서 작업하는 로봇에는 일반 작업자용과는 다른 별도의 방사선 측정기가 요구된다. 최근 널리 사용되는 실리콘(Si)형 반도체 선량계는 온도와 방사선에 민감하여 고온과 고준위 방사선 환경에서 안정적으로 사용하기 쉽지 않다. 이에 반해 실리콘 카바이드(SiC)는 넓은 밴드갭(Band-gap)으로 인해 실리콘형에 비해 높은 온도의 영향과 고방사선에 대한 손상이 적다는 장점을 지니고 있다. 이러한 장점으로 인해 S. Metzger 등[1]은 SiC 다이오드를 원자로의 고준위 방사선을 측정하기 위한 센서로의 활용을 시도하였다. 입사 방사광에 의해 다이오드 내부에서 유기된 펄스의 증폭에 기인한 출력 DC 전류를 방사선의 측정 변수로 응용한 것이다. 이 정전류 방식은 전류 생성에 충분한 펄스가 발생하는 높은 방사선장에 대해서 유용하며 보다 낮은 범위의 방사선 측정에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 원자로 내부 검사용 수중로봇의 방사선 측정을 위해 상용 SiC 다이오드를 센서로 활용하여 펄스 계수 방식으로 측정기를 구현하였다. 이 방식은 보다 낮은 범위의 방사선까지 넓은 범위의 방사선 측정이 가능한 장점이 있다. SiC 다이오드와 함께 pMOSFET를 방사선 측정 센서로 동시에 사용하였다. 이는 예기치 않은 전력 손실이 발생할 경우 pMOSFET는 피폭 방사선의 누적 량을 기억하는 특징이 있고 동일 방사선 측정 시 서로 다른 측정 원리의 센서를 동시에 적용함으로써 방사선 계측에서 신뢰도를 향상시키기 위

함이다[2]. SiC 펄스형 센서와 MOSFET의 복합 센서로 구성된 방사선 측정기는 소형 경량으로 구현이 용이하여 원자로 검사용 수중로봇(그림 1)의 좁은 공간에 장착이 가능하였다.

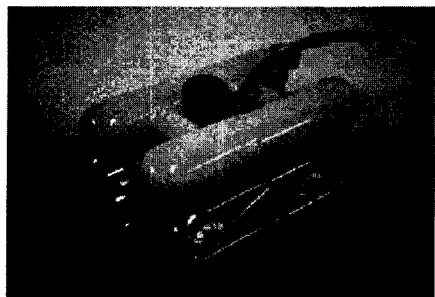


그림 1. 원자로 검사용 수중로봇

2. 방사선 측정 센서 및 측정기

2.1 방사선 센서로서의 반도체 특성

입사 방사광에 의해 전도대(Conduction band)로 여기된 전자들이 소자 외부 바이어스에 의해 형성된 순간 펄스를 방사선의 측정 변수로 활용하는 SiC 다이오드 측정 센서에서 입사 방사광은 구성 분자의 밴드갭 이상의 에너지를 가지고 있어야 하며 이때의 입사광 파장($h\lambda$)과 에너지 밴드갭(E_g) 및 전자전류(I_c)의 관계식은 다음과 같다.

$$I_c = h_c / E_g \quad (1)$$

저자 소개

- * 準會員 : 韓國原子力研究所 先任研究員 工博
- ** 準會員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 工博
- *** 準會員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 工博

pMOSFET가 이온화 방사선에 노출되면 산화층 내에 정공이 축적되고 이로 인해 문턱전압(V_T)이 변화되는데 이 변화량과 피폭 방사선량의 다음과 같은 선형적 관계식을 이용하여 방사선량을 측정하게 된다[3].

$$\Delta V_T = \frac{-1}{C_{ox}} \int_0^x \Delta \rho_{ox}(x) \frac{x}{t} dx \quad (2)$$

여기서, C_{ox} 는 산화층의 정전용량, $\Delta \rho_{ox}$ 는 산화층 전하 밀도의 변화, t 는 산화층의 두께, x 는 게이트 상단부로부터 측정거리이다.

2.2 실시간 방사선 측정기 구현

SiC 및 pMOSFET 방사선 센서로부터 피폭 방사선량을 실시간 추출하고 신호처리 및 데이터베이스를 생성하는 전체 탐지기의 구성은 그림 2와 같다.

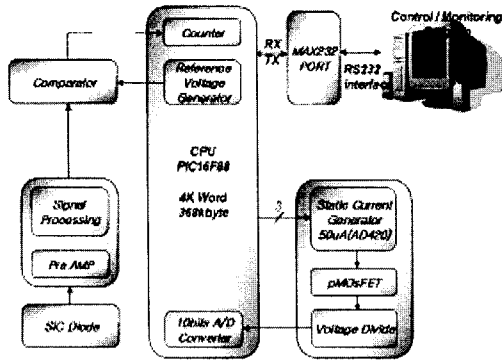
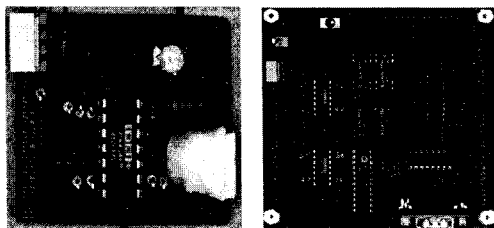


그림 2. 복합 선량계 구성도

SiC 다이오드에 인가된 18V 역바이어스에 의한 소자 내부 공핍영역 부분에서 방사선 피폭에 의해 생성된 전하는 전하 민감형 증폭기를 거쳐 전류 펄스로 만들어지고 그 개수가 계수(Count) 된다. pMOSFET 산화층에 축적된 전하량을 읽어내기 위해 50uA의 정전류를 소스단자에 인가하고 이에 대한 출력전압을 읽어내게 된다. 두 센서의 출력값은 원격의 제어 및 모니터링 PC에서 시간별로 그래프화되고 데이터베이스로 저장된다. 그림 3은 센서부분과 신호처리 부분의 회로도를 보여주고 있다.



(a) 탐지센서부 (b) 측정 및 신호처리부
그림 3. 방사선 탐지센서 및 측정회로 모듈

그림 4는 PIC16F88에 내장된 탐지기 내부 작동 프로그램의 흐름도를 나타낸다. 프로그램은 Timer1 인터럽트와 Com 인터럽트 신호로 시작되고 두 센서로부터 측정 및 변환된 방사선량 값에서 기준치 이상의 오차가 발생할 경우 이상발생을 알려주는 경보신호를 발생시키게 된다.

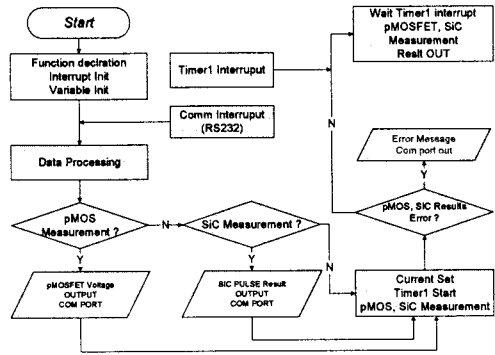


그림 4. 탐지기부 신호처리 기능도

그림 5는 디스플레이 화면을 캡처한 것이다. 각 센서로부터의 전압 출력 값과 이 값들에 해당하는 방사선률(Dose rate)과 누적방사선량을 나타내도록 구성하였고, SiC 다이오드로부터의 방사선률 적분 값과 pMOSFET에서 측정된 누적 방사선량에서 오차가 나타나면 경보신호가 켜지도록 설계하였다.

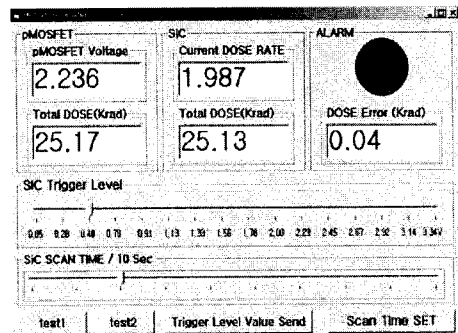


그림 5. 제어/모니터링 윈도우

3. 실험 및 결과

3.1 방사선 조사시험

실험에 사용된 SiC 소자는 HAMAMATSU사에서 제작한 JEC1 포토 다이오드로 1mm^2 의 수광부 면적을 가지고 있으며 작동온도는 $-25\sim+75^\circ(\text{C})$ 로 나타나 있다. 한국원자력연구소 코발트(Co-60) 저준위 감마 방사선 조사시설에서 이루어진 실험은 조사 선률에 따라 소자의 위치를 이동시키면서 그 때 생성된 전류펄스의 개수를 원격에서 실시간으로 계수하는 절차로 진행되었으며, 방사선 조사값은 원자력발전소 원

자료 지역의 실제 방사선 예상치를 기준으로 설정된 양이다. 상용 pMOSFET은 HITACHI사의 J182를 채용하여 SiC 다이오드와 동일한 시설에서 유사한 절차로 진행하였고 측정된 수는 MOS의 V_T 값이다.

3.2 실험결과 및 분석

SiC 다이오드에 대한 실험결과를 조사 선별별 펄스수의 그래프로 그림 6에 도시하였다. 선형화된 직선으로 보아 조사선률에 대한 소자 출력 펄스수의 관계는 선형적으로 비례함을 알 수 있고 측정 가능한 방사선률의 범위가 18rad/h로부터 20krad/h에 이르는 넓은 범위임을 확인할 수 있다. 선형화 함수는 다음과 같다.

$$Y_C = 0.3869 \times X_C + 28.4557 \quad (3)$$

여기서 Y_C 는 SiC의 펄스수, X_C 는 조사선률을 나타낸다.

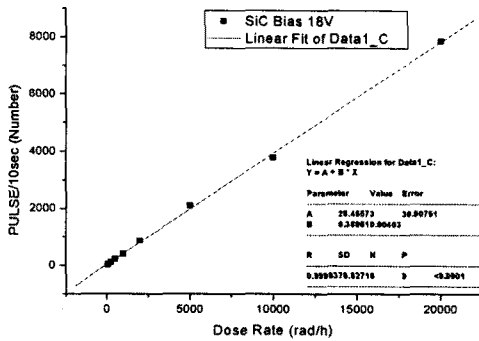


그림 6. 조사 방사선 별 SiC 다이오드 출력 펄스 수

그림 7은 pMOSFET에 대한 방사선 실험 결과로서 조사 선량에 대한 소자의 V_T 값의 변화를 보여주고 있다. 이 값들을 선형화한 직선은 다음 함수로 표시된다.

$$Y_M = 0.3869 \times X_M + 28.4557 \quad (4)$$

여기서 Y_M 은 MOSFET의 pMOSFET의 V_T , X_M 는 조사 방사선량이다.

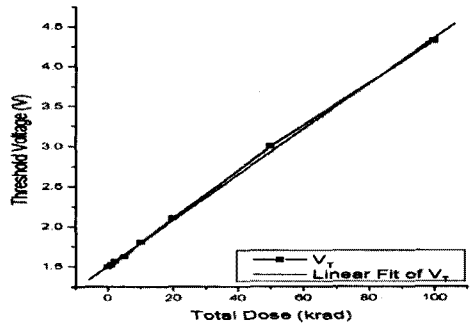


그림 7. 조사 방사선량에 대한 pMOSFET V_T 변화량

4. 결론

본 논문에서는 원자로 내부 검사용 로봇에 적용 가능한 고준위 방사선 측정용 방사선 센서와 측정기 구현에 관하여 논하였다. 고준위 방사선 측정을 위해 SiC 다이오드와 pMOSFET 센서를 각각 펄스형과 정전류 방식으로 채택하고 감마 방사선장에서 방사선 시험을 통해 특성을 분석하였다. 그 결과 두 센서는 각각 순간 방사선률과 누적 방사선량을 측정할 수 있는 측정기로 구현이 용이함을 확인하였고, 이 실험 결과를 바탕으로 수중 로봇에 부착 가능한 소형 경량의 형태로 복합 측정기를 설계 하였다. 구현된 복합 방사선 측정기는 고준위 방사선 측정에서 신뢰도와 안전성이 향상된 것으로 평가된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Metzger, Silicon carbide radiation detector for harsh environments Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, pp. 1351~1355, 2002.
- [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] Andrew Holmes-Siedle, The Space-Charge Dosimeter, Nuclear Instruments & Methods, vol.121, pp.169~179, 1974.