

Gd-pMOSFET 열중성자 측정기 구현 및 감도개선

The implementation of a Gd-pMOSFET thermal neutron detector and the enhancement of its sensitivity

이남호*, 김승호**
 Nam-Ho Lee*, Seung-Ho Kim**

Abstract - 저에너지 중성자가 가돌리늄(Gd) 막에 입사되면 중성자 포획과정에서 전환전자가 생성된다. 이 전환전자에 의해 pMOSFET SiO₂ 산화층에서 발생된 전자-전공쌍이 발생되고, 이 가운데 정공은 산화층 내부에 쉽게 붙잡혀(Trap) 양전하 센터로 작용하게 된다. 이 측정된 전하는 pMOSFET의 문턱전압(Threshold voltage)을 변화시킨다. 본 연구에서는 이러한 간접측정 원리를 이용하여 열중성자를 실시간 탐지할 수 있는 반도체형 탐지소자를 개발하고 하나로(HANARO) 방사선장에서 시험을 통해 성능을 검증하였다. 그리고 감도관련 변수의 최적화를 통하여 작업자가 사용 가능한 범위의 고감도 열중성자 선량계로 개선 제작하였다. 개발된 선량계는 소형으로 실시간 열중성자 측정이 가능하며 감마방사선으로부터 독립적으로 열중성자를 측정할 수 있는 장점도 지니고 있다.

Key Words : Gadolinium, Semiconductor, Dosimetry, pMOSFET

1. 서론

중성자 센서는 원자력발전소, 중성자 치료 병원, 잠재적 중성자탄 사용 환경에서의 군인과 탱크용, 그리고 우주 탐사용 원격 센서로서 널리 사용되고 있다. 최근에는 고집적 마이크로 단위의 소자를 사용하는 마이크로 센서에 대한 요구가 증대되고 있다. 하지만 현재 사용 중인 대부분의 중성자 센서는 일부 반도체형을 제외하고는 대형의 센서로 인해 소형화로 화하여 제작하거나 집적회로(IC)화 하기에는 어려움이 있다. 원자력발전소 작업 종사자와 우주 수반 탐사용 위성은 1keV 이하 0.025eV 열중성자 영역에 민감한 마이크로 센서가 필요하다. 반도체형 선량계는 일정 에너지 이상의 중성자에 대해 반응하는데, 그 이유는 원자의 변위를 이동시키는데 필요한 최소의 에너지 때문이다. 예를 들어 실리콘의 경우가 최소변위에너지는 25eV로 알려져 있다. 따라서 그 이하의 에너지를 가진 중성자로는 실리콘 원자에 충돌하여 원래 위치로부터 위치를 이동시킬 수 없으므로 이론상 열중성자는 실리콘에 변위손상을 줄 수가 없다. 따라서 반도체를 이용한 저에너지 중성자의 직접 측정은 쉽지 않다.

본 연구에서는 Gd 막과 p형 MOSFET을 이용하여 간접적인 방법으로 열중성자를 측정할 수 있는 탐지소자를 개발하였다. 이 측정과정의 첫 단계는 Gd 막에서의 핵반응 과정으로서 중성자의 세기가 이온화 방사선 세기로 변환되는 과정이다. 두 번째 단계는 변환된 이온화 방사선의 양을 pMOSFET에서 감지하고 기록하는 것이다. 이와 함께 본 연

구에서는 개발된 Gd-pMOSFET의 감도개선 연구를 통하여 원전 작업자가 현장에서 활용할 수 있는 수준의 고감도 실시간 선량계를 개발하고 열중성자장에서 성능을 검증하였다.

2. Gd-pMOSFET 열중성자 탐지소자 개발

2.1 열중성자 간접 측정

저 에너지 중성자가 가돌리늄 막에 입사하면 (n, r) 핵반응에 의해 전환전자와 감마선이 방출되고, 방출된 이차 입자들을 그림 1과 같이 가돌리늄 핵반응 막 바로 아래에 놓인 pMOSFET으로 입사되도록 하면 간접적인 방법으로 저 에너지의 중성자를 측정할 수 있다.

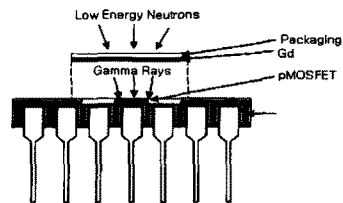
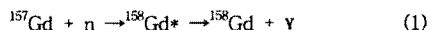


그림 1. Gd-pMOSFET 저에너지 중성자 감지 개념도

가돌리늄에 입사된 열중성자는 가돌리늄의 높은 반응 단면적으로 인해 높은 포획 확률로 포획되고, 핵반응에 의하여 전환 전자(Conversion electron)를 포함한 하전입자가 발생한다. ¹⁵⁷Gd 동위원소는 다음 반응식과 같은 과정으로 질량수 158을 가진 안정한 가돌리늄으로 변환된다.



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

pMOSFET이 이온화 방사선에 피폭될 경우 피폭 방사선량에 비례하여 산화물층(SiO₂) 내에 정공이 축적되고 이로 인해 소자의 작동 전압이 이동하게 되는데, 이 문턱전압(Threshold Voltage, V_T)의 변위 현상은 선량 측정에 활용이 가능하다.^[1,2]

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

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

2.2 열중성자 측정시험 및 분석

10μm의 Gd막과 400nm NMRC pMOSFET을 이용하여 그림 1에서의 구성과 같이 Gd-pMOS 열중성자 선량계를 제작하고 열중성자 탐지능의 확인하기 위해 열중성자 조사시험을 수행하였다. 시험은 한국원자력연구소 하나로 연구용 원자로 중성자 레디오그래피(Neutron radiography) 포트(Port)에서 수행되었다. 샘플 설치 위치에서의 중성자 플럭스는 4.2×10⁶ n/cm²s로서, MCNP 시뮬레이션을 통하여 계산된 흡수 선량율은 15.91cGy/hr(Tissue)이다. 최대 조사선량은 704cGy로 설정하였고 Sv 단위에서 Gy(Tissue)로의 전환 상수는 1/2.3이 사용되었다. 시험에는 각각 두 개의 Gd 막을 가진 MOSFET과 Gd 막이 없는 MOSFET을 사용하였으며 혼합장에서 이온화 방사선으로부터 잠재적인 오염을 보상하기 위해 가돌리늄 막이 없는 pMOSFET을 이온화 방사선 감지기로 사용한 것이다.

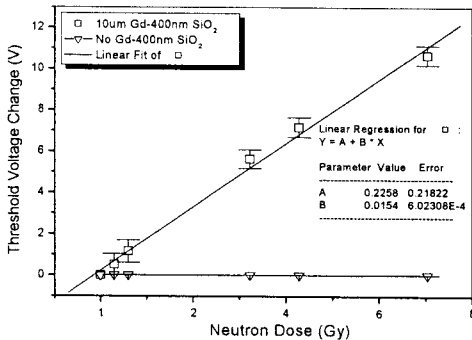


그림 2. Gd-MOSFET과 MOSFET의 열중성자 조사특성

그림 2의 시험결과에서 Gd-pMOS의 단위 선량당 감도는 15.4 mV/cGy로서 전형적인 열중성자 감도를 보여주고 있다. 이에 반해 Gd막이 없는 pMOSFET의 감도는 0.021mV/cGy로서 Gd-pMOS 측정 결과의 0.13%에 해당하는 수치이다 따라서 Gd-pMOSFET 소자는 열중성자에는 민감히 반응하는 반면 감마방사선에는 거의 반응을 하지 않는다는 사실을 시험 결과에서 확인할 수 있다. pMOSFET에 부착된 Gd이 열중성자뿐만 아니라 감마방사선에도 반응을 한다면 열중성자와 감마선의 영향을 구분하여 감지할 수 없게 되므로 열중성자 실험에서 사용된 동일한 두 소자에 대하여 감마방사선 영

향 평가 시험을 수행하였다.

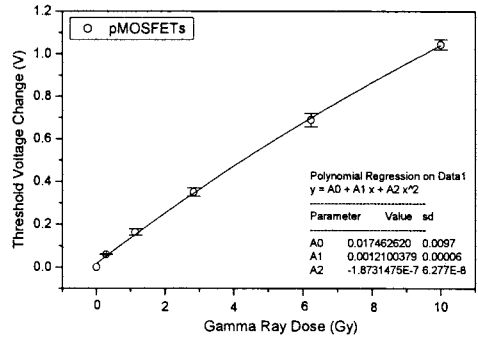


그림 3. 감마방사선 반응특성 시험결과

그림 3은 열중성자 시험에서 사용된 두 종의 센서에 대한 한국원자력연구소 준위 감마선(Co-60) 조사시설에서의 시험 결과를 나타내고 있다. 모두 다섯 단계에 걸친 최대 1,000cGy의 감마 방사선 조사에 대한 단계별 소자의 특성변화에 대한 그래프이다. 감마선 선량률은 170cGy/hr으로 고정하고 특성변화 측정에서 적용한 조건과 과정은 열중성자 실험에서의 조건과 동일하게 유지하도록 하였다. 시험결과 그래프에서 Gd-pMOS와 Gd막이 없는 pMOS 소자 모두 감마방사선에 대해서 유사한 감도 특성을 보여주고 있으며, 이는 Gd이 이온화 방사선에는 영향이 없다는 것을 알려주고 있다.

이상의 두 시험의 결과는 고안 및 개발된 Gd-MOSFET 선량계가 열중성자와 감마선이 혼재된 일반적인 방사선 혼합장에서 사용 가능성이 충분하다는 것을 입증하고 있다.

3. 고감도 열중성자 선량계 구현

3.1 열중성자 탐지감도 개선

Gd-MOS 소자의 감도를 개선하기 위한 변수는 Gd 막의 두께, pMOS의 산화막의 조건 및 두께, 그리고 측정회로의 정밀도 등을 들 수 있다. Gd 핵반응막은 그 두께에 비례하여 입사 중성자와 Gd 원자와의 반응 확률이 높아지므로 열중성자의 측정감도 개선을 위해서는 Gd 막 두께의 증가가 중요하다. 그러나 핵 반응막에서 방출되는 전자는 그 비정도로 인해 Gd 막의 두께의 증가는 소자의 감도 증가에 한계를 가져오게 된다. 이와 관련하여 논문과 특허 자료를 종합 분석한 결과 Gd 핵반응으로부터 방출된 전자가 pMOS 소자의 감도에 최적인 Gd의 두께의 조건은 약 1 ~ 2nm로 판단된다^[3,4].

이와함께 pMOSFET 소자의 감도도 산화막 두께 및 물질 구성과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 그러나 Gd 막과 MOS의 구조배경 및 결합에서 발생하는 기구적 원인으로 인해 열중성자 감도가 달라질 가능성이 있으므로 pMOSFET과 Gd 막의 조합에 의한 다양한 종류별 저에너지 중성자 감도평가 시험이 필요하다. 또한 Gd-MOSFET 열중성자 측정용 센서에 저장된 방사선 피폭정보를 정확하게 판독하기 위해서는 향상된 센서 자체의 감도를 정확히 읽어내는 판독용 선량계 회로의 정밀도 및 신뢰도도 전체 중성자 선량계의 감도에 결정적인 영향을 미치게 된다. 특히 복잡한 전자회로로

구성된 전자적 선량계는 외부 전자장의 간섭뿐만 아니라 내부 회로 상호간의 잡음 영향에 의해 판독 오차가 발생하기도 한다.

$$V_T = 8.567 + 0.014 \times T_M \quad (3)$$

여기서 V_T 는 소자 문턱전압, T_M 는 소자시간(min.)이다.

3.2 고감도 열중성자 선량계 제작 및 성능 검증

Gd-pMOS에 대한 감도 분석과 함께 다양한 감도시험을 통해 구현 가능한 최적감도를 가지는 Gd-pMOS는 그림 4와 같은 0.5um의 Gd막과 TOT501/CC-3 pMOS으로 이루어졌다.



그림 4. Gd 막 결합 전후의 pMOSFET

그림 4의 왼쪽 사진은 pMOSFET 원 형태로부터 상부의 캡을 제거한 모습이고 오른쪽은 Goodfellow사의 0.5mm 고순도(99.99%) Gd 막을 이용하여 밀봉처리 후 제작한 Gd-pMOS 센서의 결과물 사진이다.

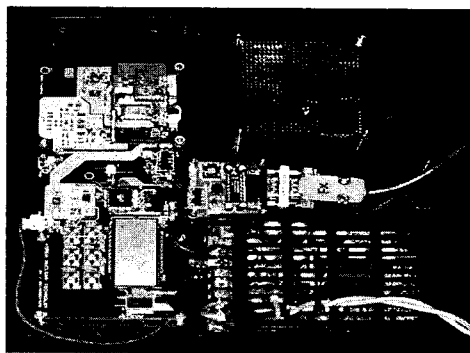


그림 5. 온라인 열중성자 선량측정 모듈

그림 5는 정밀도를 향상시켜 설계 및 제작한 선량계 모듈이다. 이 정밀 측정회로는 잡음 제거와 측정 정밀도 향상시키기 위해 Instrument Amplifier 및 Active 형태의 Low Pass Filter(4th LPF, $f_c=30\text{Hz}$)단을 추가함으로써 센서로부터 측정되는 전압의 오차를 최소화하였고, 기존의 12BIT의 ADC(LTC1298)를 16BIT타입의 LTC1285 IC를 대체하여 보다 정밀한 측정이 가능하도록 설계되었다. 또한 DAC로부터 출력되는 전류 출력 패스 및 센서로부터 전압을 읽어내는 아날로그 처리부의 PCB 패턴의 길이를 최소화하여 설계함으로써 잡음의 발생 가능성을 최소화 하였다.

고감도 열중성자 감지소자로 제작된 Gd-pMOS 소자 및 선량모듈에 대해 방사선 시험과 분석을 통하여 단위 전압당 최소 측정가능 방사선 감도(mGy/mV)를 추출하였다. 열중성자 조사 및 평가시험은 앞서의 열중성자 시험과 동일한 조건에서 이루어졌다. 시험결과 그림 6에서 조사선량과 Gd-pMOS 소자의 변화관계는 다음과 같이 선형식으로 표현이 가능하였다.

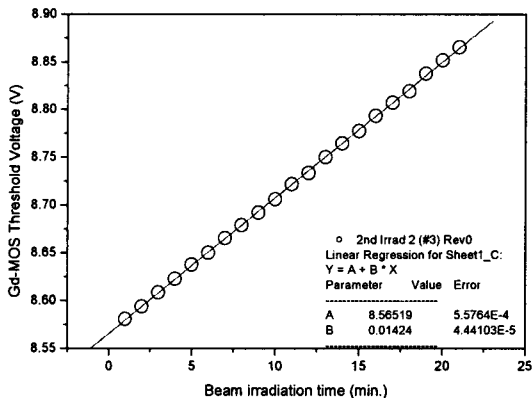


그림 6. Gd-MOS 선량계의 열중성자 감도시험 결과

결과 선형 수식에서 나타난 감도는 14.24mV/min이며, 단위 mV당 방사선량값으로 변환하면 11.7mrad/mV로 표현된다. 이 감도결과로부터 측정회로의 구분 가능한 0.3mV 단위를 고려할 경우 수 mrad의 감도를 가지게 되어 작업자의 피폭 선량계로 사용이 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 열중성자가 Gd 막에서의 핵반응으로 이온화 방사선으로 변환되고, 이 변환된 이차 방사선을 pMOS에서 탐지함으로써 열중성자를 간접적으로 측정하는 Gd-pMOS 구조의 열중성자 탐지소자를 개발하고 열중성자 장에서 기능을 검증하였다. 그리고 Gd-pMOS 소자에 대한 다양한 감도 변수시험을 통해 작업자가 사용 가능한 고감도의 열중성자 선량계를 제작하고 열중성자 장에서 그 성능을 확인하였다. 제작된 실시간 열중성자 선량계는 감마 방사선과 열중성자를 구분하여 측정할 수 있는 특징을 지니고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Dorschel B, Pforzner F, Streubel C., Knorr, L. and Paul, W., "Neutron Detection Using MOSFET Breakdown Counters Combined with Fissile Radiators," Nucl. Instrum. Methods 216, 227-229(1983).
- [2] Streubel, C., Dorschel, B., Hanisch T., Reinhard, J. and Schoop K. P., "A MOSFET Sensor Application Neutron Field Monitoring," Nucl. Instrum. Methods A274(1-2), 194-202 (1989).
- [3] A. Miresghhi, G. Cho, J. Frewery, T. Jing, S.N. Kaplan, V. Perez-Mendez, and D. Wildermuth, "Amorphous Silicon Position Sensitive Neutron Detector," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, No. 4, 1992