

반도체형 열중성자 선량 측정센서 개발

The development of a thermal neutron dosimetry using a semiconductor

이 남 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 : pMOSFET having 10 μm thickness Gd layer has been tested to be used as a slow neutron sensor. The total thermal neutron cross section for the Gd is 47,000 barns and the cross section value drops rapidly with increasing neutron energy. When slow neutrons are incident to the Gd layer, the conversion electrons are emitted by the neutron absorption process. The conversion electrons generate electron-hole pairs in the SiO_2 layer of the pMOSFET. The holes are easily trapped in Oxide and act as positive charge centers in the SiO_2 layer. Due to the induced positive charges, the threshold turn-on voltage of the pMOSFET is changed. We have found that the voltage change is proportional to the accumulated slow neutron dose, therefore the pMOSFET having a Gd nuclear reaction layer can be used for a slow neutron dosimeter. The Gd-pMOSFET were tested at HANARO neutron beam port and ^{60}Co irradiation facility to investigate slow neutron response and gamma response respectively. Also the pMOSFET without Gd layer were tested at same conditions to compare the characteristics to the Gd-pMOSFET. From the result, we have concluded that the Gd-pMOSFET is very sensitive to the slow neutron and can be used as a slow neutron dosimeter. It can also be used in a mixed radiation field by subtracting the voltage change value of a pMOSFET without Gd from the value of the Gd-pMOSFET.

Keywords : pMOSFET, Gadolinium, thermal, neutron, radiation, nuclear reaction.

1. 서 론

방사선을 이용한 연구는 의료, 산업, 식품 및 비파괴 검사분야에서 발전을 거듭해 오고 있다. 이렇게 방사선을 사용하는 연구 분야가 다양화되고 폭넓어짐에 따라 방사선에 노출될 위험도 증가하고 있다. 방사선 선량계는 방사선 작업종사자가 안전한 환경에서 작업에 몰두 할 수 있도록 작업자의 피폭량을 실시간으로 알려줄 수 있어야 한다. 현재 이러한 관점에서 실시간 선량계들이 선진국을 중심으로 개발되고 있으나 방사선의 종류 및 에너지에 따라서 센서의 감도가 틀려지므로 특정한 방사선 구역에 알맞은 센서를 개발하여 사용 방사선장에 대한 교정을 해주어야 한다. 일반적으로 저 에너지 중성자라 함은 카드늄 잘라버리기(Cut Off) 이하의 에너지, 즉 0.5 eV 이하를 일컫는다. 저 에너지 중성자 영역에 대하여 관심을 가지는 이유는 국내에서 방사선 작업 종사자들 중에서 많은 비율의 종사자가 원전에서 근무하고 있으며, 이들 원전에서 주로 발생하는 방사선이 저 에너지 중성자이기 때문이다. 따라서 원자로에 종사하는 작업자들을 위한 정확하고 신뢰성 있는 실시간 중성자 선량계의 개발이 필요하다. 저 에너지 중성자는 에너지가 너무 낮아 직접검출이 힘들기 때문에, 물질과의 핵반응으로 발생하는 반응생성물들을 검출함으로써 간접적으로 측정할 수 있다. 저 에너지 중성자 검출기는 크게 두 부분으로 구분할 수 있는데 하나는 핵 반응을 유도하는 반응막이고 다른 하나는 핵 반응

생성물(하전입자)을 검출할 수 있는 검출기이다. 핵 반응막은 중성자와 반응 단면적이 크고 핵반응을 통하여 충분한 에너지를 가진 이차 하전입자들을 방출시키는 물질이다. 이러한 물질 가운데 특히 가돌리늄(Gadolinium, Gd)은 열 중성자에 대하여 47,000 바안(Barn)의 높은 반응 단면적을 가지고 있다. 핵 반응막에서 방출된 이차 하전입자를 검출할 수 있는 검출기의 종류는 가스형, 섬광형 반도체형 등 다양하나 개인 선량계로 사용하기 위해서는 착용이 용이하고 전력소모가 작은 소형의 반도체형이 유리하다. 반도체형 검출기 가운데 pMOSFET은 누적형 방사선 센서로서 소자 내부에 방사선 누적량을 기억하는 기능이 있어 선량계의 구현 시 회로를 단순화시킬 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 pMOSFET의 게이트 극 산화막(Oxide Layer) 층 위에 부착한 Gd 핵반응막과 pMOSFET 반도체 소자를 이용한 열중성자 탐지 센서의 개발에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 Gd 반응막이 있는 소자의 측정치와 반응막이 없는 pMOSFET 측정값의 보정을 통하여 감마선과 열중성자에 대한 피폭선량을 하나의 모듈 내에서 각각 독립적으로 구할 수 있는 선량계의 구현에 관하여 논하였다.

2. 저 에너지 중성자 검출

1) MOSFET의 이온화 방사선 측정

MOSFET는 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체

체 소자의 일종으로 소자 내 산화물층(SiO₂)으로 절연된 게이트의 인가전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 문턱전압(V_T) 이상이면 작동(On)하고, 그 이하이면 정지(Off)하게 된다. 이 V_T 값은 MOSFET를 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수로서, 방사선에 조사될 경우 V_T 값의 변위현상이 나타나는데 방사선 센서는 이 V_T 변위현상을 이용한다. 여러 가지 문턱전압 값을 구하는 방법 가운데 소형의 전자회로로 구현이 유리한 정전류 인가 식은 실험을 통해 결정된 낮은 고정 드레인 전류값(I_d)을 인가하고 이때의 게이트 전압을 추출하는 것으로서, 이때의 드레인 전류의 관계식은 아래 식 1과 같이 표현된다.

$$I_d = \mu_n \frac{W}{L} C_{ox} [(V_g - V_T) V_d - 0.5 V_d^2] \quad (1)$$

여기서 I_d 는 드레인 전류, n 은 전자의 이동도, W 는 채널의 두께, L 은 채널의 길이, C_{ox} 는 산화층의 두께, V_g 는 게이트 전압, V_T 는 문턱전압, 그리고 V_d 는 드레인 바이어스 전압이다.

pMOSFET이 방사선에 노출되면 소자의 게이트 산화물층(Oxide Layer, SiO₂) 내부에서 전자-양공쌍(Electron-Hole Pair)이 형성된다. 전자는 빠르게 게이트 쪽으로 이동하여 게이트 전극에 수집되며, 반면 양공은 산화물층 내부의 산화물(Oxide)과 결합하여 반영구적인 양이온을 형성하게 된다. 이러한 정공 트랩(Hole Trap)과 계면트랩(Interface Trap)들은 pMOSFET에서 양의 전계로 작용하기 때문에 이 소자를 작동시키기 위해서 새로 형성된 전계 만큼 추가적인 전압을 인가하여야 한다. 즉, 방사선 피폭량이 증가할수록 소자에는 높은 게이트 전압을 걸어주어야 소자를 작동시킬 수가 있기 때문에, 이 문턱전압(V_T)이 피폭 이온화 방사선량을 측정하는 변수가 된다. 방사선 노출 이전의 pMOSFET의 출력특성은 채널 왼쪽 곡선이며 방사선에 노출되어 피폭 방사선량이 증가할수록 출력특성(V_G-I_D)에서의 곡선들은 오른쪽으로 이동하게 된다.

MOSFET 타입 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 민감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다.^{[1][2]} pMOSFET의 이온화 방사선에 대한 특성은 방사선의 에너지 및 게이트 산화층의 두께에 따라 다르며 일반적으로 산화층이 두꺼울수록 감마선에 대한 반응이 민감하게 나타난다. 그러나 pMOSFET는 저 에너지의 중성자(일반적으로 카드늄 잘라버리기(cadmium cutoff) 이하의 에너지 < 0.5 eV)에 대해서는 특성변화가 거의 발생되지 않는다. 그 이유는 입사된 저 에너지의 중성자가 pMOSFET의 산화층내에서 전자-양공쌍을 생성시킬 수 있는 에너지(3eV)에 미치지 못하기 때문이다. 따라서 MOSFET를 저 에너지 중성자 검출에 이용하기 위해서는 핵반응 막이 필요하다.

2) 저 에너지 중성자 측정을 위한 Gd 핵 반응막

가돌리늄(Gadolinium, Gd)은 열 중성자에 대하여 총 47,000 barn의 높은 반응 단면적을 가지고 있다. 중성자 반응에 의하여 발생하는 주요 하전입자는 전환 전자(conversion electron)이며, 이들은 ¹⁵⁵Gd과 ¹⁵⁸Gd의 중성자 포획(neutron capture)후 변환된 ¹⁵⁶Gd과 ¹⁵⁹Gd 핵으로부터 방출된다. 전환 전자의 방출 메카니즘은 이들 변환 핵들이 들뜬 상태에서 안정상태로 변화하며 방출되는 감마선이 원자궤도의 전자에 그 에너지를 전이시켜 발생하는 것이다. 그림 1은 중성자 에너지에 따른 Gd의 핵반응 단면적을 도시한 것이다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 ¹⁰B, ⁶Li와 비교하여 볼때, 열중성자영역에서 10배 이상의 단면적을 보이며 빠른 중성자영역에서는 단면적이 줄어든다. 따라서 Gd 핵반응 막은 저 에너지 중성자에 대하여 높은 핵반응 확률을 나타낸다.^[3]

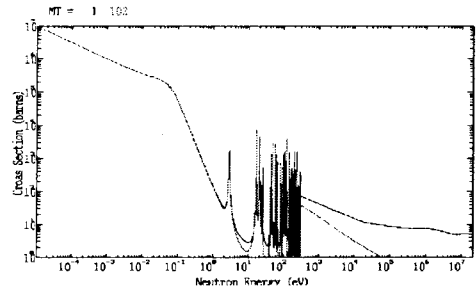


그림 1. 에너지별 ¹⁵⁷Gd의 중성자 반응(n,γ)

위에서 설명한 바와 같이 저 에너지 중성자가 Gd 막에 입사하면 중성자 흡수 반응이 일어난다. 중성자와 Gd 원자와의 반응에 의하여 생성된 이차 하전입자들과 들뜬 원자에서 발생하는 감마선들을 그림 2와 같이 Gd 핵반응 막 바로 아래 놓인 pMOSFET으로 입사되도록 하면, 간접적인 방법으로 pMOSFET을 사용하여 저 에너지의 중성자를 측정할 수 있다. 즉, Gd 막에서의 핵반응에 의해 생성된 이차전자와 감마선이 바로 아래 pMOSFET의 게이트 산화층으로 입사하여 산화층 내에 전자-양공쌍을 생성시킨다. 이 가운데 산화층에 갇힌(Trap) 전공은 양의 전하 중심으로 작용하여 입사 전하량에 비례하는 V_T의 천이 현상으로 나타게 되어, 결과적으로 pMOSFET의 V_T 변화량을 측정함으로써 저 에너지 중성자에 대한 선량 정보를 추출할 수 있게 된다.

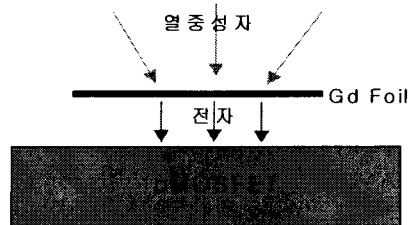


그림 2. Gd 핵 반응막을 이용한 pMOSFET의 중성자 감지

중성자와 반응하여 가장 민감한 반응을 나타낼 수 있는 Gd 반응막을 두께를 알아내기 위한 시물레이션이 수행되어 왔으며, 약 5 um 두께의 Gd 막이 검출 센서에 가장 높은 감도를 가져다주는 것으로 계산되었다.

본 연구에서는 구입 가능한 10 um의 두께의 Gd 핵 반응 막을 입힌 pMOSFET와 같은 특성의 Gd 막이 없는 pMOSFET을 동시에 저 에너지 중성자 빔 조사 시험을 수행하였다. 실험에서 핵 반응 막이 있는 경우와 없는 경우의 저에너지 중성자 반응도를 비교하였으며, 또한 두 소자에 대한 감마선(⁶⁰Co) 조사를 통하여 감마선에 대한 영향에 대하여 확인하여 보았다.

3) 저 에너지 중성자 및 감마선 감지용 pMOSFET

사용한 저 에너지 중성자 탐지용 소자는 NMRC사에서 감마선 탐지용으로 상용으로 제작된 pMOSFET이다. 본 소자는 딥(DIP)형으로 pMOSFET 칩과 소자로 사용하기 위한 어셈블리로 구성되어 있고 칩과 어셈블리는 가는 금선(Gold Wire)로 연결되어 있으며, 칩을 보호하기 위한 금속성 뚜껑이 위에 씌워져 있는 형태로 되어있다. 본 MOSFET을 방사선에 조사할 경우 반응하는 부분은 칩 내부의 게이트 산화층 부분이므로 열중성자에 대한 컨버터(Converter)로서 Gd 막(Foil)을 뚜껑 안쪽에 부착하여 열중성자 조사시험에 투입하였다. 그림 3은 소자의 뚜껑을 제거한 pMOSFET(왼쪽)과 Gd 막을 부착한 것(오른쪽)의 사진이다. 그림 4는 Gd 막을 부착한 pMOSFET의 상세한 구조를 명칭과 함께 보여 주고 있다.

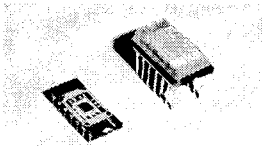


그림 3. pMOSFET과 Gd 막 pMOSFET

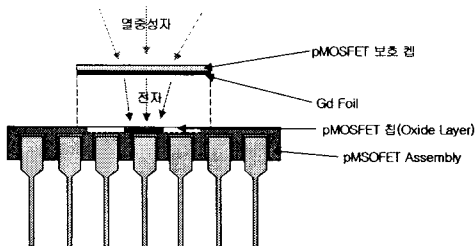


그림 4. Gd 막을 부착한 pMOSFET의 상세한 구조

3. 저 에너지 중성자 및 감마선 조사시험

1) 열중성자 조사시험

Gd-pMOSFET의 중성자 감도를 측정하기 위하여 한국원자력연구소 내에 위치한 연구용 원자로인 하나

로의 NR(Neutron Radiography) 포트(Port) 제 2 조사실에서 열중성자 조사 실험을 수행하였다. 조사 위치는 콜리메이터 입구(Aperture)부터의 6.8m 거리이며, 그 지점에서의 흡수선량(Tissue)을 MCNP 시물레이션을 통하여 계산하였다. NR 제 2 조사실의 중성자 에너지 분포는 대략 0.025eV에서 최대 피크를 가지며 1 MeV 까지가 80 %, 1~3 MeV가 그 나머지이다. 조사 지점의 중성자 플럭스는 4.2×10^6 n/cm²s이고, DE/DF tally card를 사용하여 계산된 흡수선량은 15.91 rad/h(Tissue)이다.

샘플 테이블에 시험 소자를 설치한 후 하나로의 운용상 사용 가능한 최대 선량치, 704cGy를 조사하도록 모두 다섯 단계에 걸쳐 방사선 조사와 연이은 소자의 측정을 반복하였다. 방사선 조사시 p-MOSFET의 게이트 전극에 DC 6V의 전압을 인가하고, 소스와 드레인을 그라운드에 접지 시켰는데, 이는 방사선 피폭으로 인해 분리된 전자와 정공이 즉시 재결합하는 것을 막음으로서 방사선에 대한 감도를 높이기 위해서였다. 조사된 소자에 대하여 10μA의 정전류 측정법으로써 V_T의 값을 구하였고 이 과정에서 p-MOSFET의 방사선 영향 회복현상인 풀림(annealing) 효과를 최대한 줄이기 위해 각 단계별 측정을 위한 방사선 조사 중단시간을 최소화하였다.

2) 감마선 조사시험

pMOSFET에 부착된 Gd이 열중성자 뿐만아니라 감마선에도 반응을 한다면 열중성자의 영향과 감마선의 영향을 구분하여 감지할 수 없게 되므로 앞서의 열중성자 실험에서 사용된 동일한 형태의 두 소자에 대하여 감마선장에서의 실험을 통하여 Gd에 대한 감마선 영향을 평가하였다. 두 소자에 대한 감마선 실험은 한국원자력연구소 ⁶⁰Co 저준위 감마선선 조사시설에서 다섯 단계에 최대 1,000cGy를 조사하였다. 조사시 감마선원으로부터 소자까지의 거리는 130.3cm, 이때의 선량은 170cGy/h 이고 측정에서의 조건과 과정은 열중성자 실험에서와 동일하게 하였다.

4. 방사선 조사시험 결과

열중성자에 조사된 두 소자에서 측정된 V_T의 변화치(ΔV_T)들을 피폭 방사선량(x축)에 대한 ΔV_T(y축)의 그래프로 옮긴 것이 그림 5이다. 이 그래프를 통해서 Gd 반응막을 부착한 pMOSFET은 열중성자에 민감한 반응을 보인 반면 Gd 막이 없는 pMOSFET은 열중성자에 대하여 거의 반응이 없다는 것을 알 수 있다. 또한 Gd-pMOSFET은 열중성자의 전체 조사량의 범위에서 거의 선형적인 변화특성을 보여줌으로써 열중성자의 탐지소자로서 사용 가능성이 충분하다는 것을 알 수 있게 해준다. 조사에 사용한 Gd-pMOSFET소자의 열중성자에 대한 직선 근사식은

$$\Delta V_T(V) = 0.46173 + 0.01559 \times \text{Dose (cGy)} \quad (2)$$

로써 이 관계에 따라 ΔV_T 의 값을 측정하면 그때까지 피폭된 중성자의 누적선량을 쉽게 구할 수 있다. 실험에서 사용된 Gd-pMOSFET의 열중성자 감도는 단위 cGy당 15.6mV이고, 이 감도는 본 연구와 관련된 중성자탄 폭발 탐지용 반도체 센서가 만족해야할 10cGy-999cGy 범위에서의 중성자 탐지소자로써의 가능성뿐만 아니라 이를 이용한 실제 선량계의 구현에 있어서도 만족할만한 수준이라고 판단된다.

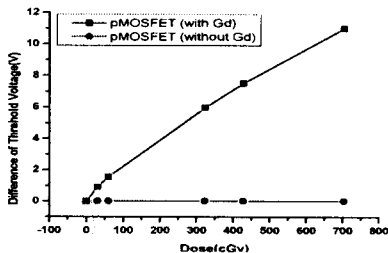


그림 5. Gd-pMOSFET과 pMOSFET의 열중성자 특성

감마선장에서의 두 소자에 대한 방사선 조사시험 결과를 그림 6에 나타내었다.

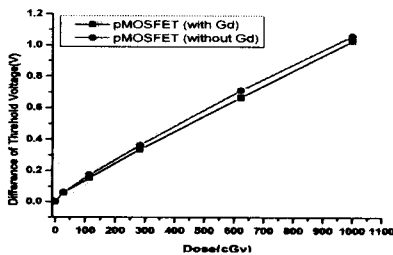


그림 6. Gd-pMOSFET과 pMOSFET의 감마선 특성

Gd-pMOSFET, pMOSFET 소자는 모두 감마선에 대해서 선형적인 반응특성을 가지며, 각각의 감도는 단위 cGy당 1.027mV과 1.06mV이다. 이 실험을 통해 두 소자는 Gd 막의 유무에 관계없이 감마선에 대해서 유사한 특성과 감도를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 두 소자 사이의 감도 차이는 반도체 소자 자체의 제조특성에서 기인된 오차라고 사료된다.

이상의 두 가지 실험을 통해서 Gd-pMOSFET, pMOSFET의 두 소자는 감마선에 대해서는 유사한 감도로서 반응을 보이는 반면 열중성자에 대해서는 Gd-pMOSFET 소자만 민감한 반응을 나타낸다는 사실을 확인하였다. 이 결과를 볼 때, Gd 막을 사용한 pMOSFET은 열중성자 탐지소자로서 사용이 가능하다

는 것과 더불어 감마선과 열중성자를 독립적으로 탐지할 수 있다는 사실도 알 수 있다. 즉, 그림 7과 같이 Gd-pMOSFET의 출력값에서 pMOSFET 소자의 출력값을 감산기(Subtractor)에서 보상하게 되면 열중성자의 피폭선량만을 추출할 수 있게되어, 결국 동일한 소자를 이용한 간단한 회로를 사용한 혼합방사선 장에서의 실시간 감마/열중성자 통합 선량계의 구현이 가능하게 된다.

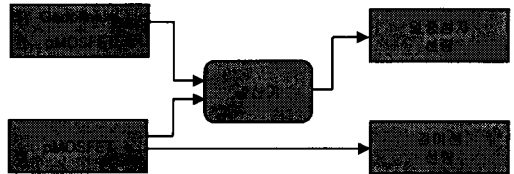


그림 7. pMOSFET, Gd 반응막, 감산기를 이용한 감마선/열중성자 감지

5. 결 론

본 연구에서는 pMOSFET 반도체 소자와 핵반응막을 이용한 열중성자 탐지소자의 개발을 위하여 열중성자장에서의 실험을 수행하였다. 또한 감마선에 대한 영향을 평가하기 위한 감마선장에서의 조사시험을 병행하였다. 열중성자 조사시험에서 Gd-pMOSFET 소자는 열중성자에 대해 선형적인 민감한 반응을 나타낸 반면 Gd 막이 없는 pMOSFET은 무시할 정도의 반응을 보였고, 감마선에 대해서 두 소자는 유사한 감도의 방사선 특성 결과를 보여주었다. 이 두 실험을 통하여 Gd 막을 부착한 pMOSFET은 열중성자를 감지할 수 있는 우수한 감도의 센서로 사용이 가능하다는 사실을 확인할 수 있었고, 감산기를 사용하여 Gd-pMOSFET과 pMOSFET의 출력값을 보상할 경우, 열중성자와 감마선이 혼재된 방사선장에서 두 방사선의 양을 각각 독립적으로 감지할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

현재 본 연구 결과에 기반한 소형의 전자적 실시간 통합 선량계를 구현 중이며 향후 원전 등에서 개인 피폭선량계로 사용하기 위한 감도 개선연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. Andrew Holmes-Siedle: "The Space-Charge Dosi-meter," Nuclear. Instruments. & Methods, vol. 121, pp. 169~179, 1974.
3. P. N. Cooper: Introduction to Nuclear Radiation Detector, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 84~96, 1986.