

탄화규소 중성자 검출기의 원자로 내 중성자 반응 평가

박준식, 김한수, 신희성, 김호동, 김용균*, 박세환

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

*한양대학교, 서울시 성동구 행당동 한양대학교

ex-spark@kaeri.re.kr

1. 서론

Silicon carbide(SiC)는 넓은 bandgap energy, 우수한 열전도성 및 electron mobility를 가지는 반도체 소자로서, 종래의 반도체 물질과 비교하여 고방사선 하 방사선 검출을 위한 센서로서 많은 이점을 갖고 있다. 4H-SiC는 3.26 eV의 bandgap 에너지를 가지며 thermal excitation으로 인한 누설전류가 낮아 고온에서도 냉각 없이 동작이 가능하다. 특히 높은 displacement threshold energy로 인하여 내방사성이 우수하여, 원자로 내 및 사용후핵연료 저장 수조와 같은 고방사선 환경 하에서 중성자를 검출할 수 있는 물질로 주목을 받아왔다. 열중성자 검출은 SiC diode 상에 ^{10}B , ^6LiF 의 중성자 변환막을 증착함으로써 (n, α) 반응을 통해 발생하는 하전입자 α , T 를 측정하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 4H p-i-n type SiC를 이용하여 전극 종류를 달리한 몇 가지 종류의 SiC 검출기를 제작하여 내방사성 평가를 수행하였다. 또한, 제작된 검출기를 이용하여 원자로 내 열중성자 선속 측정용 어셈블리를 제작하였고, 원자로 출력에 따른 검출기의 중성자 반응성을 평가하였다.

2. 본론

2.1. 검출기 제작

CREE사에서 구입한 $406\ \mu\text{m}$ 두께의 4H SiC p-i-n diode를 diamond saw를 이용한 절단 및 세척작업을 통해 $5 \times 5\ \text{mm}^2$ 크기의 SiC 시료를 제작하였다. SiC wafer 시료의 양면에 $0.2\ \mu\text{m}$ 두께의 원형 전극을 thermal evaporator를 이용하여 증착하였다. 전극과 wafer 표면 사이의 접착력을 높이기 위하여 $30\ \text{nm}$ 두께의 buffer 층을 sputter를 통해 증착하였다. Buffer 층 및 전극으로 쓰인 금속을 달리하여 총 6가지 종류의 SiC diode 센서를 제작하였으며 그 중 2 종류의 센서에는 열중성자 검출을 위하여 중성자 변환막인 ^6LiF 를 증

착하였다. 증착된 ^6LiF 층은 센서의 Si-face 면 (P-type diode 면)에 위치시켰으며 두께 및 직경 각각 $2\ \mu\text{m}$ 와 $2\ \text{mm}$ 이었다. 또한, ^6LiF 의 공기와의 접촉을 통한 산화를 막기 위하여 $\phi 4\ \text{mm} \times 6\ \mu\text{m}$ 의 전극 층을 덮어 증착하였다. 이번 연구에서 제작된 검출기의 금속구조는 다음과 같다: Ti/Cr, Ti/Au, Cr/Au, Ni/Au, Ni/ ^6LiF /Au, Ti/ ^6LiF /Cr.

2.2. 특성 평가

증착 금속구조에 따른 내방사성 변화를 평가하기 위하여 제작된 SiC diode 검출기에 중성자 선속 $3 \times 10^{13}\ \text{n/cm}^2\ \text{s}$ 에서 5 시간, $3 \times 10^{10}\ \text{n/cm}^2\ \text{s}$ 에서 20 시간 조사시켰다. 중성자 조사는 한국원자력연구원의 HANARO 연구로에서 수행되었다. 1차 중성자 조사(total neutron flux $5.40 \times 10^{17}\ \text{n/cm}^2$)의 경우 ^6LiF 가 증착되지 않은 센서 4 종류에 대해서 수행되었으며, 조사 전과 후의 검출기 I-V곡선 및 하전입자 검출 성능을 비교, 분석하여 전극 구조에 따른 내방사성을 평가하였다. 제작된 diode 검출기의 I-V 곡선 및 하전입자 반응을 평가하였다. I-V 곡선 측정은 4200 Keithley Semiconductor Characterization System을 이용하여 상온에서 측정하였으며 결과를 Fig. 1에 보였다.

하전입자 측정을 위한 회로는 charge sensitive preamplifier (Cremat CR-110), shaping amplifier (ORTEC 575A), High voltage power supply (Aptec AHV-1B)으로 구성하였으며 선원은 ^{238}Pu 를 사용하였다. 알파 스펙트럼 측정은 10분간 이루어졌으며 조사 전 후 피크의 count를 비교하여 Fig 2.에 나타내었다.

2.3. 원자로 내 중성자 반응 선형성

내방사성 실험 결과를 기반으로, 가장 우수한 radiation tolerance를 보여준 전극인 Ni/Au/ ^6LiF 와 Ti/Au SiC 센서를 이용하여, 10 m의 MI cable 및 SUS 하우징을 통해 동시 측정 어셈블리를 제작하였다. 제작된 어셈블리를 HANARO 연구로의

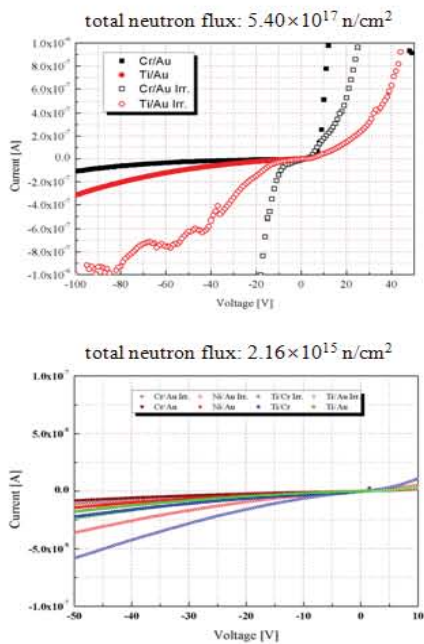


Fig. 1. Forward and reverse bias characteristics of SiC detector before and after irradiation.

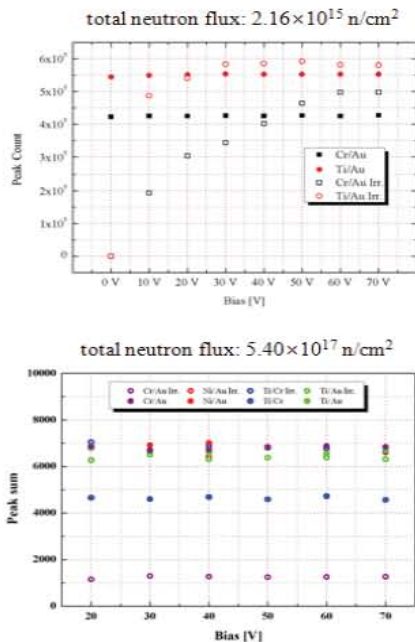


Fig. 2. Peak summation of SiC detector with respect to the bias before and after irradiation.

반사체영역 IP5 조사공에 삽입하여 원자로 출력에 따른 검출기 반응을 측정하였다. SiC 어셈블리의 중성자 반응 측정은, 장거리 신호전달선으로 인한 노이즈를 최소화하기 위하여 current mode

로 수행되었다. 또한, HANARO 원자로 내 열중성자 선속 모니터에 사용되는 CIC ion chamber와의 전류를 기준으로 출력 증가에 따른 SiC 검출기의 반응 선형성을 분석하였으며 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

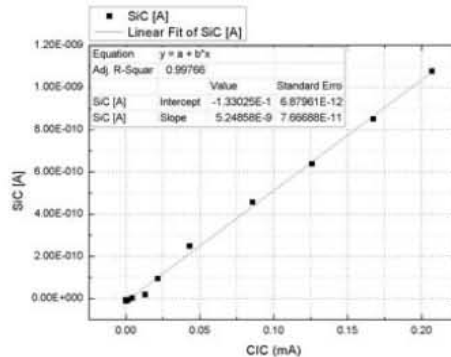


Fig. 3. SiC neutron response (current mode) with respect to the current of CIC ion chamber.

SiC 검출기의 중성자유도전류 선형성은 0.998로서 우수한 선형성을 보였으며 5MW 출력까지 중성자 조사에 의한 신호의 감소효과가 보이지 않았다.

3. 결론

본 연구를 통하여, 원자로 및 사용후핵연료 저장시설 환경에서 중성자를 검출할 수 있는 SiC 중성자 검출기를 개발하였으며, 1차 현장 평가로서 HANARO 원자로 내에서 중성자 반응 실험이 이루어졌다. 향후 노이즈 최소화 및 검출 성능 향상을 위한 어셈블리 구조 개선이 진행될 것이며 사용후핵연료수조 내에서의 중성자 측정을 계획 중에 있다.

4. 감사의 글

이 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원 하에 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] C. Manfredotti et al., NIM A 552, pp. 131-137, 2005.