

## 중성자 조사된 SiC Schottky Diode의 온도 의존 특성

김성수<sup>1</sup>, 구상모<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 광운대학교 전자재료공학과

### Temperature Dependence of Neutron Irradiated SiC Schottky Diode

Sung-Su Kim<sup>1</sup> and Sang-Mo Koo<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received July 30, 2014; Accepted September 12, 2014)

**Abstract:** The temperature dependent characteristics on the properties of SiC Schottky Diode has been investigated. In this study, the temperature dependent current-voltage characteristics of the SiC Schottky diode were measured in the range of 300 ~ 500 K. Divided into pre- and post- irradiated device was measured. The barrier height after irradiation device at 500 K increased 0.15 eV compared to 300 K, the barrier height of pre- neutron irradiated Schottky diode increased 0.07 eV. The effective barrier height after irradiation increased from 0.89 eV to 1.05 eV. And ideality factor of neutron irradiated Schottky diode at 500 K decreased 0.428 compared to 300 K, the ideality factor of pre- neutron irradiated Schottky diode decreased 0.354. Also, a slight positive shift in threshold voltage from 0.53 to 0.68 V. we analyzed the effective barrier height and ideality factor of SiC Schottky diode as function of temperature.

**Keywords:** Neutron, 4H-SiC, Schottky diode, Temperature, Effective barrier height, Ideality factor

#### 1. 서 론

최근, 고온, 고전압, 그리고 고주파수와 같은 극한 상황에서 작동할 수 있는 전력소자에 대한 요구가 커지고, 실리콘 (silicon) 소재를 이용한 전력소자가 물성의 한계에 접근함에 따라 Si를 대체할 수 있는 전력소자용 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1,2].

탄화규소 (silicon carbide)는 넓은 밴드갭, 높은 전자 포화속도, 높은 열전도도와 큰 항복전계 등 고온, 고출력 소자로서 적합한 물성을 갖고 있기 때문에 실리콘 소재를 이용한 소자에 비해 화학적 (chemical), 고온 환

경에서 안정함을 보인다 [3]. 그러므로, 탄화규소 (SiC) 소재를 이용한 소자는 고온에서 안정적으로 동작하며 높은 전력 범위를 가지는 소자로서 효율을 높이기 위해 여러 가지 소자구조에 대하여 연구 개발이 활발히 진행 중에 있다 [4,5].

중성자를 이용하는 일부 분야에서는 중성자 조사를 이용한 연구들이 진행 중이나 화합물반도체나 광학재료 등과 같은 신소재 설계 분야에 대한 연구는 미진한 상태이다. 또한, nanotechnology, biotechnology와 관련 다양한 신기능 소재 기술개발이 활발하게 진행되고 있지만 중성자를 이용한 신기능 소재 응용 개발은 미약한 실정이다 [6,7].

최근 진행되는 연구에서는 고에너지 양성자 조사의 영향에 대한 연구에 초점이 맞춰져있다 [8]. 중성자 조사가 화합물반도체 소자의 전기적 특성에 미치는 영향에 대한 상세한 연구가 부족하기 때문에, 중성자 조사

a. Corresponding author: smkoo@kw.ac.kr

가 화합물 반도체 소자의 온도 의존 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 중요하다.

본 연구에서는 탄화규소 (SiC) Schottky diode 소자의 온도 의존 특성을 분석하기 위하여 300 ~ 500 K 범위의 온도에서 측정 / 분석하였다. 소자는 중성자 조사 전과 후로 나누어 측정하였으며, 온도에 따른 유효 장벽높이 (effective barrier height), 이상 계수 (ideality factor)와 같은 전기적 특성을 분석하였다.

### 2. 실험 방법

고도핑된 n-type 4H-SiC 기판에 에피택셜층 (epitaxial layer)을 성장시킨 웨이퍼를 사용하여 탄화규소 쇼트키 다이오드 (SiC Schottky diode)를 제작하였다 (그림 1). 전자빔 증발기 (e-beam evaporator)를 이용하여 웨이퍼의 뒷면에 100 nm 두께의 니켈 (Ni) 박막층을 증착한 후, 질소분위기에서 950°C의 온도로 90초 동안 급속 열처리 (rapid thermal annealing)하여 오믹 접합 (ohmic contact) 층을 형성하였다. 포토 리소그래피 (photo lithography)와 전자빔 증발기 공정을 이용하여 웨이퍼의 앞면에 100 nm 두께의 니켈을 지름 1 mm의 원형으로 패터닝하였다.

제작한 4H-SiC Schottky diode는 한국원자력연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute)의 하나로 (Advanced Neutron Application Reactor)를 이용하여 중성자 조사를 진행하였다. 중성자 조사는  $3.1 \times 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>의 세기로 60초 동안 진행되었다. SiC Schottky diode 소자의 온도 의존 특성을 확인하기 위해 300 ~ 500 K 범위의 온도에서 측정하였으며, 소자는 중성자 조사 전과 후로 나누어 측정하였다.

SiC Schottky diode 소자의 각 온도에서의 유효 장벽 높이 (effective barrier height)과 이상 계수 (ideality factor)를 비교 / 분석하였다. 유효 장벽 높이와 이상 계수는 current-voltage (*I-V*) 측정을 통하여 확인하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 제작한 SiC Schottky diode의 SEM 이미지로 (a)는 중성자 조사 전 소자의 표면이며, (b)는 중성자 조사 후 소자의 표면을 나타낸다. 각각의 소자 표면을 확인하였을 때, 중성자 조사에 의하여 소

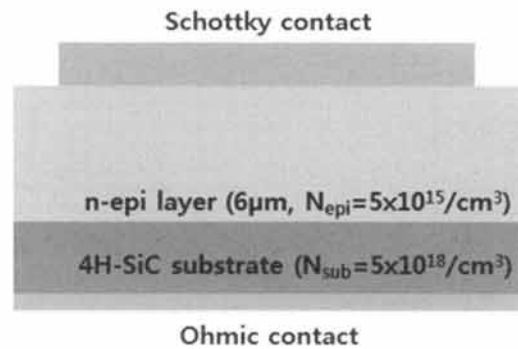


Fig. 1. Schematic cross-section of 4H-SiC Schottky diode structure.

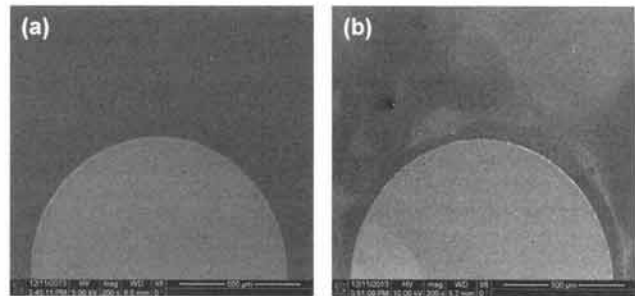


Fig. 2. Field emission scanning electron microscopy of SiC Schottky diode (a) pre-irradiation and (b) post-irradiation.

자 표면이 변한 것을 알 수 있으며, 이에 따라 중성자 조사가 SiC Schottky diode 소자의 온도 의존 특성에 영향을 줄 것이라 판단된다. 열 특성을 측정하기 위하여 300 ~ 500 K 온도를 50 K씩 증가시키며 소자에 가해주며 전류-전압 특성을 측정하였다.

측정한 자료는 식 (1)에 나타난 열전자 방출 이론 (thermionic emission)으로 전류밀도와 유효전위장벽, 이상 계수의 변화를 분석하였다.

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \tag{1}$$

*A*는 다이오드의 면적, *A\**는 리차드슨 상수 (Richardson constant,  $A^* = 146 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$  for SiC), *q*는 전하량 ( $1.6 \times 10^{-19}$  C), *k*는 Boltzmann 상수 ( $1.38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>), *T*는 절대온도 (T), 그리고  $\phi_B$ 는 유효 전위장벽이다.

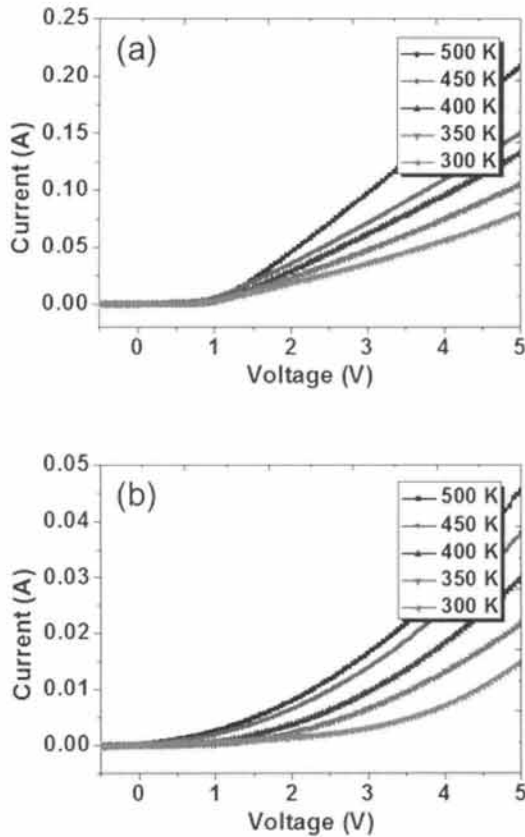


Fig. 3. I-V curve of measurement with (a) pre- and (b) post- neutron irradiation at elevated temperature.

그림 3(a)는 중성자 조사 전 SiC Schottky diode 소자의 온도 의존 current-voltage ( $I$ - $V$ ) 특성을 나타낸 것으로, 500 K에서의 전류는 300 K에서의 전류보다 약  $\Delta I = 0.05$  A 증가하는 결과를 얻었다.

그림 3(b)는 중성자 조사 후 SiC Schottky diode 소자의 온도 의존  $I$ - $V$  특성을 나타낸 것으로, 500 K에서의 전류는 300 K에서의 전류보다 약  $\Delta I = 0.013$  A 증가하였다. 중성자 등의 방사선을 조사한 SiC Schottky diode 소자 내부에 결함 형성과 이에 따른 전기적 변화가 보고된 바 있다 [9,10]. 온도가 증가함에 따라 결함들의 scattering 효과에 의하여 전류의 증가량이 조사 전 소자보다 작은 것으로 판단된다. 또한, 조사 후 소자의 전류의 증가량을 유효 전위 장벽으로 해석할 수 있다.

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_S}\right) \quad (2)$$

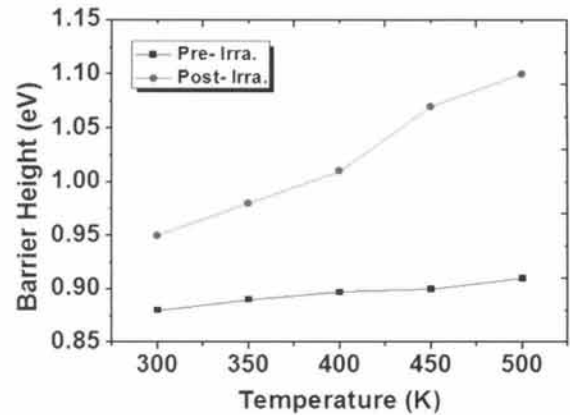


Fig. 4. Effective barrier height with pre- and post- neutron irradiation at elevated temperature.

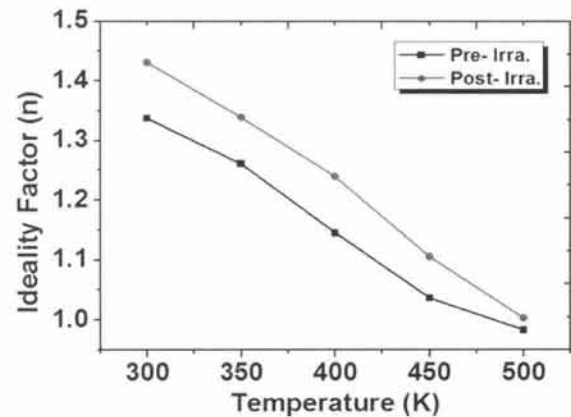


Fig. 5. Ideality factor with pre- and post- neutron irradiation at elevated temperature.

다음 식(2)를 통하여 유효 장벽 높이의 값을 얻을 수 있다.  $I$ - $V$  측정을 통하여 금속과 SiC 사이의 유효 장벽 높이를 추출한 결과 300 K에서 중성자 조사 전 소자의 유효 장벽 높이는 0.88 eV였으며, 중성자 조사 후 소자의 유효 장벽 높이는 1.05 eV이다. 온도를 300 K에서 500 K로 증가시켰을 때, 중성자 조사 전 소자의 유효 장벽 높이는 0.88 eV에서 0.91 eV로 약  $\Delta\Phi_B = 0.09$  eV 증가하였으며, 중성자 조사 후 소자의 유효 장벽 높이는 0.95 eV에서 1.1 eV로 약  $\Delta\Phi_B = 0.09$  eV 증가하였다 (그림 4).

온도의 증가가 유효 장벽 높이의 증가에 큰 요인이 되는 것을 식 (2)와 추출한 유효 장벽 높이를 통하여 확인하였다. 즉, 온도에 비례한  $kT/q$ 의 영향을 받았

**Table 1.** The electrical parameters of Ni/4H-SiC Schottky diodes obtained pre- and post- irradiation. The barrier height ( $\Phi_B$ ), ideality factor have been calculated from I-V characteristics.

|          | 300 K      | 350 K | 400 K | 450 K | 500 K |       |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Phi_B$ | Pre-Irra.  | 0.88  | 0.89  | 0.897 | 0.9   | 0.91  |
|          | Post-Irra. | 0.95  | 0.98  | 1.01  | 1.07  | 1.1   |
| n        | Pre-Irra.  | 1.337 | 1.261 | 1.145 | 1.037 | 0.983 |
|          | Post-Irra. | 1.431 | 1.339 | 1.24  | 1.105 | 1.003 |

음을 알 수 있다.

이상계수 (ideality factor)는 이상적인 쇼트키 장벽 다이오드의 캐리어 이동 메카니즘인 열전자 방출이 해당소자의 캐리어 이동에 얼마만큼 지배적인가를 나타내는 것으로 측정된 I-V를 통하여 본 연구에서 제작한 소자의 이상계수를 식 (3)을 이용하여 추출하였다.

$$n = \frac{e}{kT} \cdot \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (3)$$

온도가 증가할 때 많아진 전자들은 높아진 전위 장벽을 극복할 수 있는 충분한 활성화에너지를 가지게 되어 전류가 흐르게 되고 이상 계수는 1에 근사한 값을 가지게 된다. 온도 증가에 따른 유효 전위 장벽의 증가와 저온에서 이상 계수 값의 증가의 관계는 SiC Schottky diode의 전기적 특성이 열전자 방출 이론으로 해석 가능하다.

식 (3)을 이용하여 추출한 각 온도에서 이상 계수를 그림 5에 나타내었다. 온도가 300 K에서 500 K로 증가할 때, 중성자 조사 전 소자의 이상계수는 1.337에서 0.983으로 약 0.354 감소하였고, 중성자 조사 후 소자의 이상계수는 1.431에서 1.003으로 약 0.428 감소하였다.

온도가 증가할수록 조사 전/후 소자의 이상 계수 차이가 작아지는 결과를 보인다. 이는 중성자 조사 후 소자의 유효 전위 장벽이 증가하지만 온도가 증가할수록 유효 전위 장벽을 극복할 수 있는 충분한 활성화에너지를 갖는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 SiC 소재에 기반한 Schottky diode

를 제작하여 중성자 조사가 온도 의존 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

표 1에서 볼 수 있듯이, 온도가 300 K에서 500 K로 증가할 때, 조사 전 소자의 유효 장벽 높이는 약  $\Delta\Phi_B = 0.03$  eV 증가하였고, 조사 후 소자는 약  $\Delta\Phi_B = 0.06$  eV 증가하였다. 이상계수의 경우 온도가 300 K에서 500 K로 증가할 때, 조사 전 소자는 0.354 감소하였으며, 조사 후 소자는 0.428 감소하였다.

온도가 증가함에 따라 결함들의 scattering 효과에 의하여 중성자 조사 후 소자의 전류증가량이 조사 전 소자보다 작은 것으로 판단되며, 온도가 증가할수록 유효 전위 장벽을 극복할 수 있는 충분한 활성화에너지를 갖는 것으로 이해할 수 있다. 고온에서 중성자 조사 후 SiC Schottky diode 소자의 전류전송 메카니즘을 열전자 방출이론으로 해석할 수 있다. 이는 SiC 소재를 기반으로 제작한 소자가 고에너지/고온의 극한 환경에서 안정적으로 동작하며 응용 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제 기술혁신사업 (WPM사업)으로 수행되고 있는 ‘초고순도 SiC소재’ 개발사업과 한국연구재단의 지원 (2014M2B2A4032086)과 그린카 등 수송시스템 산업원천기술개발사업 (10042566)을 통해 연구 개발된 결과임을 밝힙니다.

#### REFERENCES

- [1] A. Larry, *Nucl. Inst Meth A*, 428, 95 (1999).
- [2] H. Morkoc, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov, and M. Burn, *J. Appl. Phys.*, 76, 1363 (1994).
- [3] A. Saha and J. A. Cooper, *IEEE Trans. Electron Devices*, 52, 2786 (2007).
- [4] W. Cunningham, A. Gouldwell, G. Lambm, J. Scott, K. Mathieson, P. Roya, R. Bates, P. Thornton, K. M. Smith, R. Cusco, M. Glaser, and M. Rahman, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 487, 33 (2002).
- [5] K. Cinar, C. Coskun, E. Gur, and S. Aydogan, *Nucl. Inst. Meth. in Physics Research B*, 267, 87 (2009).
- [6] T. R. Oldham and F. B. McLean, *IEEE Trans. on Nuclear Sci.*, 50, 483 (2003).
- [7] P. Roche, *IEEE International Reliability Physics*

- Symposium* (San Jose, USA, 2006).
- [8] P. Jayavel, K. Santhakumar, and J. Kumar, *Physica B*, 315, 88 (2002).
- [9] J. H. Kim, S. Nigam, F. Ren, D. Schoenfeld, G. Y. Chung, and S. J. Pearton, *Electrochem. Solid State Lett.*, 6, G105 (2003).
- [10] K. Cinar, C. Coskun, E. Gur, and S. Aydogan, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Research B*, 267, 87 (2009).