

중성자 조사에 따른 SiC Schottky Diode의 전기적 특성 변화

김성수¹, 강민석¹, 조만순², 구상모^{1,a}

¹ 광운대학교 전자재료공학과

² 한국원자력연구원

The Effect of Neutron Radiation on the Electrical Characteristics of SiC Schottky Diodes

Sung-Su Kim¹, Min-Seok Kang¹, Man-Soon Cho², and Sang-Mo Koo^{1,a}

¹ Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

² Korea Atomic Energy Research Institute, Daegu 305-353, Korea

(Received February 4, 2014; Revised March 3, 2014; Accepted March 14, 2014)

Abstract: The effect of neutron irradiation on the properties of SiC Schottky Diode has been investigated. SiC Schottky diodes were irradiated under neutron fluences and compared to the reference samples to study the radiation-induced changes in device properties. The condition of neutron irradiation was 3.1×10^{10} n/cm². The current density after irradiation decreased from 12.7 to 0.75 A/cm². Also, a slight positive shift ($\Delta V_{th} = 0.15$ V) in threshold voltage from 0.53 to 0.68 V and a positive change ($\Delta \Phi_B = 0.16$ eV) of barrier height from 0.89 to 1.05 eV have been observed by the neutron irradiation, which is attributed to charge damage in the interface between the metal and the SiC layer.

Keywords: Neutron, 4H-SiC, Schottky diode, Barrier height, Threshold-voltage, Current density

1. 서론

최근, 반도체에 대한 고에너지 입자선의 영향에 대한 연구가 실행되어지고 있으나 아직까지 중성자 조사에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 기존의 반도체 소자는 고에너지 입자선에 대하여 낮은 저항과 동작 온도 범위에 크게 제한되어 있다 [1,2].

반면, 탄화규소 (silicon carbide) 소재를 이용한 소자는 방사선 입자에 대한 저항이 크고, 높은 온도에서 안정적으로 동작하며, 넓은 밴드갭 (wide band-gap, ~

3.26 eV)을 가진다 [1,3]. 그래서 실리콘 (silicon) 소재를 이용한 소자에 비해 화학적 (chemical) / 중성자적 (neutronic)으로 안정함을 보인다. 그러므로 탄화규소 (SiC) 소재를 이용한 소자는 고온에서 동작하며 높은 전력 범위를 가지는 소자로서 효율을 높이기 위해 여러 가지 소재 및 소자에 대하여 연구 개발이 활발히 진행 중에 있다 [4,5].

반도체 소자가 군사, 우주, 전자 분야 등에서 응용되려면 고에너지를 갖는 양성자 (proton), 중성자 (neutron)의 노출에서도 동작이 가능해야 하기 때문에 잠재력을 갖는 탄화규소 (SiC) 소재를 이용한 반도체 소자에서 중성자 조사 (neutron irradiation)가 반도체 물질 및 반도체 소자의 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이 매우 중요하다 [5-8].

최근 몇 년간 방사선 노출에 대하여 중성자 검출기의

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

요구가 늘어나고 있는 실정이다. 이에 따라, 중성자를 검출하기 위하여 반도체 물질을 이용한 여러 가지 센서 개발 방법들이 제시되어 왔고, 그 가운데 특히 Schottky diode를 이용한 센서가 주목받고 있다 [9].

본 연구에서는 탄화규소 (SiC) Schottky diode를 제작하여 중성자를 조사하였으며, 조사 후 변하는 소자의 문턱 전압 (threshold voltage), 유효장벽 높이 (barrier height), 전류 밀도 (current density) 등과 같은 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 본 연구에서 사용된 SiC Schottky diode의 단면 구조를 나타냈다. 탄화규소 (SiC) epitaxial layer (6 μm thickness, n-type)를 고도평한 4H-SiC substrate 위에 성장시켰다. 뒷면의 옴릭 접합 (ohmic contact)은 e-beam evaporation 공정으로 100 nm 두께의 Ni 박막을 입히고, 그 후 90초 동안 950°C의 질소 환경에서 RTA (rapid thermal annealing) 공정을 하였다. 포토 리소그래피 (photo-lithography)와 e-beam evaporation을 사용하여, 4H-SiC 웨이퍼 앞면 100 nm 두께의 Ni 박막을 증착하였다. 그리고 Ni metal은 lift-off 공정으로 지름 1 mm의 원형 패턴을 형성하여 4H-SiC Schottky diode를 제작하였다.

중성자 조사는 KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute)의 HANARO (advanced neutron application reactor)로 진행하였다. 중성자는 60초 동안 3.1×10^{10} n/cm²의 세기로 조사하였다.

전기적 특성을 확인하기 위해 반도체 분석 장비인 Keithley 4200-SCS를 이용하여 current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V)을 측정하였다. SiC Schottky diode의 중성자 조사 전과 후의 전기적 특성을 비교한 후, 중성자 조사의 효과를 분석하였다. Forward current density가 10^{-3} A/cm²일 때, 문턱전압을 확인하였으며 current density는 forward voltage 3 V에서 확인하였다. Barrier height는 capacitance-voltage (C-V) 측정을 통하여 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

탄화규소 (SiC) 소재를 이용하여 Schottky diode를

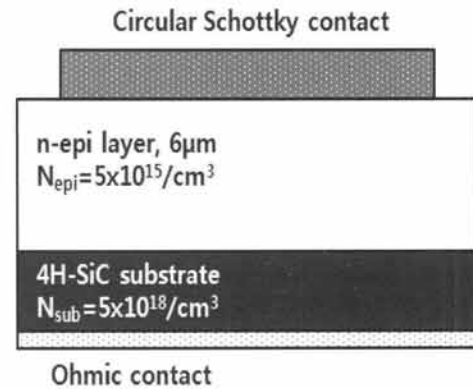


Fig. 1. Schematic cross-section of 4H-SiC Schottky diode structure.

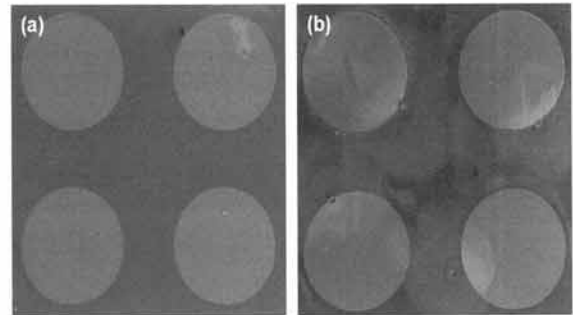


Fig. 2. Field emission scanning electron microscopy of SiC Schottky diode. (a) pre- irradiation, (b) post- irradiation.

제작하고 중성자 조사를 하여 조사 전의 전기적 특성과 조사 후의 전기적 특성을 비교하여 중성자 조사 소자에 미치는 영향을 확인하였다.

그림 2는 본 연구에서 사용된 SiC Schottky diode의 SEM (scanning electron microscope) 이미지로 (a)는 중성자 조사 전의 SiC Schottky diode이며, (b)는 중성자 조사 후의 SiC Schottky diode이다. SEM 이미지를 확인하였을 때, 중성자 조사에 의하여 소자 표면이 변한 것을 알 수 있으며, 이에 따라 전기적 특성이 변하였을 것이라 판단된다.

그림 3은 제작한 SiC Schottky diode의 중성자 조사 전과 조사 후의 current density-voltage (J-V)로 중성자 조사 전의 문턱전압은 $V = 0.53$ V (at $I_F = 10^{-3}$ A/cm²)이었으며, 조사 후의 문턱전압은 $V = 0.68$ V (at $I_F = 10^{-3}$ A/cm²)이었다. 중성자 조사 후의 문턱전압이 조사 전의 문턱전압에 비하여 약 $\Delta V = 0.15$ V 증가한 것을 확인하였다.

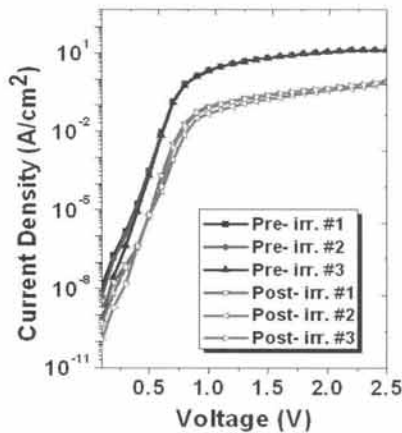


Fig. 3. I-V curve of simulation and measurement with pre- and post- neutron irradiation at log scale. The radiation fluences of up to 3.1×10^{10} n/cm².

또한, 중성자 조사 전의 전류 밀도는 12.7 A/cm² (at V=3 V)이었으며, 조사 후의 전류 밀도는 0.75 A/cm² (at V= 2.5 V)이었다. 중성자 조사 후의 전류 밀도가 조사 전과 비교하여 감소 ($\Delta J= 11.95$ A/cm²) 한 것을 확인하였다.

그림 4는 중성자 조사 전과 조사 후 소자의 문턱전압 (V_{th}) 과 유효 장벽 높이 (Φ_B)의 평균값을 나타내었다. 중성자 조사 후의 문턱전압과 유효 장벽 높이가 모두 증가하였다. Ni과 탄화규소 (SiC)의 Schottky contact에 Gammy-Ray, 중성자 등의 방사선을 조사하여 방사선과 격자의 충돌에 의한 결함의 형성과 이에 따른 전기적 특성 변화가 보고된 바 있다 [10,11]. 내부에 결함이 형성되는 Ni과 탄화규소 (SiC)의 계면에 영향을 주어 유효 장벽 높이가 증가하여 문턱전압이 증가한 것으로 판단된다. Capacitance-voltage (C-V) 측정은 실온에서 1 MHz의 주파수에서 진행하였다. 이 측정을 통하여 voltage 축을 포함한 $1/C^2$ -V 특성의 직선 절편을 확인하며, 다음 식 (1)을 통하여 유효 장벽 높이의 값을 얻을 수 있다.

$$\Phi_B = V_i + V_n \quad (1)$$

식 (1)에서, V_i 가 전압 절편이며, V_n 은 전도대의 최소 에너지와 n-type SiC의 페르미 준위의 차이 [$V_n = kT/e \cdot \ln(N_C/N_D)$]이며, N_C 는 300 K에서 4H-SiC의 전도대의 상태밀도 (1.66×10^{19} cm⁻³)이다.

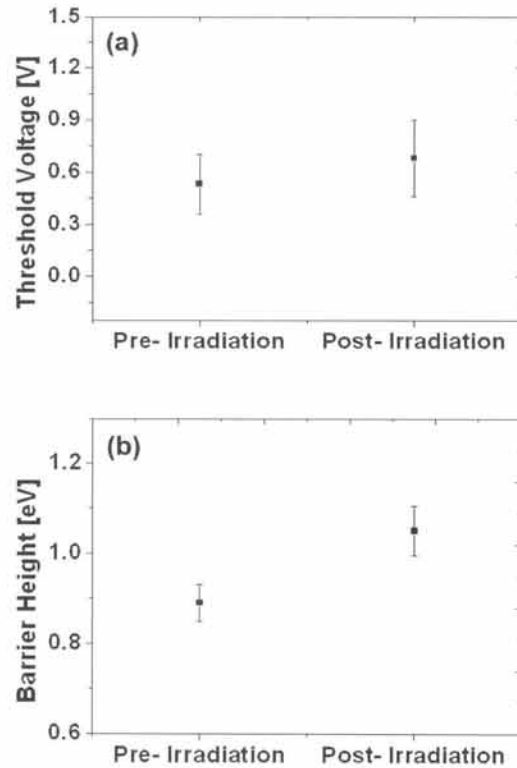


Fig. 4. The average value of (a) threshold voltage and (b) barrier height with pre- and post- neutron irradiation. The squares are the average value of the data and the error bars are the standard deviation.

Table 1. The electrical parameters of Ni/4H-SiC Schottky diodes obtained pre- and post- irradiation. The Threshold voltage (V_{th}), current density have been calculated from I-V characteristics and barrier height (Φ_B), from C-V measurements.

	Φ_B (eV)	V_{th} (V)	Current density (A/cm ²)
Pre-Irradiation	0.89	0.53	12.7
Post-Irradiation	1.05	0.68	0.75

위의 식 (1)을 이용하여 중성자 조사 전과 후의 유효 장벽 높이를 비교하였을 때, 조사 전 (0.89 eV) 보다 조사 후 (1.05 eV) 약 $\Delta\Phi_B= 0.16$ eV 증가한 것을 확인하였다. 외에 문턱 전압도 조사 전 (0.53 V) 보다 조사 후 (0.68 V) 약 $\Delta V_{th}= 0.15$ V 증가하였으며, 전류 밀도는 조사 전 (12.7 A/cm²) 보다 조사 후 (0.75 A/cm²) 약 $\Delta J= 11.95$ A/cm² 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 SiC 소재에 기반한 Schottky diode를 제작하여 중성자 조사 전과 조사 후의 전기적 특성을 비교 분석하였다.

표 1에서 볼 수 있듯이, 유효 장벽 높이의 경우 조사 전 (0.89 eV)보다 조사 후 (1.05 eV) 약 $\Delta\Phi_B = 0.16$ eV 증가하였고, 문턱전압은 조사 전 (0.53 V)보다 조사 후 (0.68 V) 약 $\Delta V_{th} = 0.15$ V 증가하였으며, 전류 밀도는 조사 전 (12.7 A/cm^2)보다 조사 후 (0.75 A/cm^2) 약 $\Delta J = 11.95 \text{ A/cm}^2$ 감소함을 확인하였다. 이는 중성자 조사로 인하여 격자의 구조 및 Ni과 탄화규소 (SiC)의 계면에 영향을 주어 유효 장벽 높이가 증가하는 경향이 나타났다고 판단된다. 본 연구는 중성자 조사가 탄화규소 (SiC)를 기반으로 하는 소자의 특성 변화를 예측 가능하며, 고에너지 입자가 발생하는 군사, 우주, 전자 분야 등에 응용하기 위한 연구에 기반 가능할 것이라고 판단한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제 기술혁신사업 (WPM사업)으로 수행되고 있는 '초고순도 SiC소재' 개발사업과 한국연구재단의 지원 (2013M2B2A4029259)과 한국중소기업청의 지원 (C0010549)을 통해 연구 개발된 결과임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] H. Morkoc, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov, and M. Burns, *J. Appl. Phys.*, 76, 1363 (1994).
- [2] A. Larry, *Nucl. Instr. Meth. A*, 428, 95 (1999).
- [3] P. Masri, *Surf. Sci. Rep.*, 48, 1 (2002).
- [4] W. Cunningham, A. Gouldwell, G. Lamb, 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] J. Kim, *Appl. Lett.*, 84, 371 (2004).
- [6] F. Nava, P. Vanni, M. Bruzzi, S. Lagomarsino, S. Sciortino, G. Wagner, and C. Lanzieri, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-36, 238 (2004).
- [7] F. H. Ruddy, A. R. Dullo, J. G. Seidel, M. K. Das, S. H. Ryu, and A. K. Agarwal, *Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference, Symposium on Nuclear Power Systems and the 14th International Workshop on Room Temperature Semiconductor X- and Gamma-Ray Detectors* (Rome, Italy, 2004)
- [8] M. Bruzzi, M. Bucciolini, F. Nava, S. Pini, and S. Russo, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 485, 172 (2002).
- [9] A. R. Dullo, F. H. Ruddy, J. G. Seidel, J. M. Adams, J. S. Nico, and D. M. Filliam, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 498, 415 (2003).
- [10] J. H. Kim, S. Nigam, F. Ren, D. Schoenfeld, G. Y. Chung, and S. J. Pearton, *Electrochem. Solid State Lett.*, 6, G105 (2003).
- [11] K. Cinar, C. Coskun, E. Gur, and S. Aydogan, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 267, 87 (2009).