

## Ti/SiC(4H) 쇼트키 장벽 다이오드의 전기적 특성

박국상, 김정윤, 이기암, 장성주\*

단국대학교 물리학과, 천안, 330-714

\*동신대학교 물리학과, 나주, 520-714

## The electrical properties of a Ti/SiC(4H) schottky diode

Kook-Sang Park, Jung-Yun Kim, Ky-Am Lee and Seong-Joo Jang\*

*Department of Physics, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea*

*\*Department of Physics, Dongshin University, Naju 520-714, Korea*

요 약 SiC(4H) 결정에 Ti을 열증착하여 Ti/SiC(4H) 쇼트키(Schottky) 장벽 다이오드를 만들었다. SiC(4H)의 주개농도(donor concentration)는 전기용량-전압(C-V) 측정으로 부터  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이였으며, 내부전위(built-in potential)는 0.65 V이였다. 전류-전압(I-V) 특성으로 부터 다이오드의 이상계수(ideality factor)는 1.07이였으며, 역방향 항복전장(breakdown field)은 약  $1.7 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 이였다. 상온에서 140°C까지 온도변화에 따라 측정된 포화전류로 부터 구한 전위장벽(potential barrier)은 0.91 V이었는데, 이는 C-V 특성으로 부터 구한 전위장벽과 거의 같았다.

Abstract Ti/SiC(4H) Schottky barrier diodes were fabricated. The donor concentration and the built-in potential obtained by capacitance-voltage(C-V) measurement was about  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  and 0.65 V, respectively. The ideality factor of 1.07 was obtained from the slope of current-voltage(I-V) characteristics at low current density. The breakdown field under the reverse bias voltage was about  $1.7 \times 10^3 \text{ V/cm}$  and was very high. The barrier height of Ti for SiC(4H) was 0.91 V, which was determined by the analysis of the saturation current-temperature and the C-V characteristics.

## 1. 서 론

IV-IV족 화합물 반도체인 실리콘 카바이드(SiC)는 에너지 띠 간격(bandgap)이 약 3 eV인 광대역(wide bandgap) 반도체로서 전기적 특성이 우수하여 고전력(high-power), 고주파수(high-frequency), 고온(high-temperature) 및 내환경성 소자로서 사용된다 [1-4]. 또한 SiC는 자외광(UV) 수광소자(photodetector)로서 매우 유용하다[5-8]. 육방정 SiC( $\alpha$ -type)의 결정다형(polytype) 가운데 SiC(4H)는 전자 이동도(electron mobility)가 SiC(6H)의 것보다 높고 이동도의 이방성(anisotropy)이 아주 작아서 SiC(6H) 보다 유망한 반도체로 알려져 있다[9, 10].

쇼트키 접합(Schottky junction)을 기초로 한 소자(device)는 금속과 반도체의 계면 특성에 크게 영향을 받는다. 금속과 SiC(6H)의 접합에 관하여 전위 장벽높이(barrier height)가 조사되었으나[11,12], 금속/SiC(4H) 구조에 관한 자세한 해석이 거의 없다 [13]. 본 연구에서는 Ti/SiC(4H) 쇼트키 장벽 다이오드(Schottky barrier diode: SBD)를 만들어 전류-전압(I-V), 전기용량-전압(C-V) 특성을 조사하여 쇼트키 장벽높이를 결정하였다.

## 2. 실험

SiC는 레리법(Lely method)으로 성장되었으며[14], 전도형이 n-형으로서 주개농도(donor concentration)는  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이었다. SiC의 결정구조를 확인하기 위하여 X-선 회절기(Philips PW3710)로 회절각도를 측정하였다. SiC의 결정방향을 [0001]로

하여 측정된 X-선 회절상을 Fig. 1에 나타내었다. 회절각도는  $30^\circ$ 에서  $80^\circ$  범위까지 Cu-K $\alpha$ ( $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ )선을 이용하여 측정되었다.

SiC의 라만(Raman) 스펙트럼은 상온에서 He-Cd 레이저의 325 nm를 이용하여 후방산란(back scattering)으로 측정되었다. 산란된 빛은 RAMANOR U-1000 (JOBIN YVON Co.)를 이용하여 검지되었다. Fig. 2는 SiC(4H) 결정의 [0001]방향 라만 스펙트럼이다.

SiC 결정의 표면은 먼저 트리클로로에틸렌(trichloroethylene), 아세톤 및 메탄올로 세척되었고, 다음 염산(HCl), 왕수(aqua regia), 불산(HF)을 사용하였고, 마지막으로 탈이온수로 세척되었다.

Ti/SiC 쇼트키 접합을 위하여 Ti 금속은 진공도  $\sim 5 \times 10^{-6}$  torr에서 열증착(thermal evaporation) 되었고, 접촉 면적은 원형으로서 직경이 각각  $500 \mu\text{m}$ ,  $800 \mu\text{m}$  및  $1000 \mu\text{m}$ 이었다. 시료 뒷면의 저항성 접촉(Ohmic contact)으로서 Ti은  $1200^\circ\text{C}$ 에서 10분간 열처리되었다.

## 3. 실험 결과 및 분석

Fig. 1의 X-선 회절상에서 X-선 피크들은 SiC의 결정다형이 4H이며 결정방향이 [0001]인 SiC임을 나타낸다. 단결정 SiC(4H)의 전형적인 라만 스펙트럼을 Fig. 2에 보였는데, TO(transverse optic) 포논피크(phonon peaks)들은 파수(wavenumber)  $799 \text{ cm}^{-1}$  및  $778 \text{ cm}^{-1}$ 에서, 그리고 LO(longitudinal optic) 영역에서는  $970 \text{ cm}^{-1}$ 에서 관측되었다. X-선 회절상과 라만 스펙트럼으로 부터 SiC(4H)가 단결정으로 성장되었

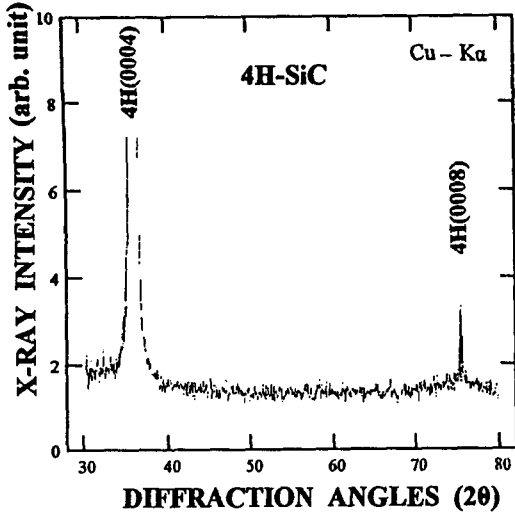


Fig. 1. X-ray diffraction pattern of SiC(4H) from the [0001] direction.

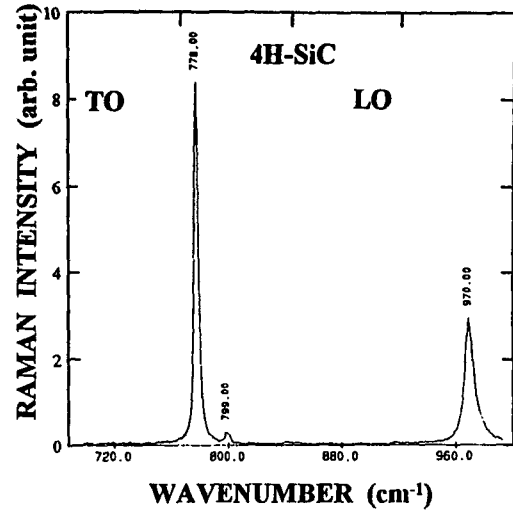


Fig. 2. The Raman spectrum of the optical phonon of a SiC(4H) crystal.

음을 보여준다[15].

Fig. 3은 Ti/SiC(n-형) SBD의 평형상태에서 에너지 띠(energy band) 그림이다[16]. 여기서  $e$ 는 전자 전하량이고,  $\phi_b$ 는 쇼트키 장벽의 높이(Schottky barrier height),  $V_b$ 는 내부전위(built-in potential),  $e\phi_m$  및  $e\phi_s$ 는 각각 Ti 및 SiC(4H)의 일함수(work function),  $\chi_s$ 는 전자 친화도(electron affinity), 그리고  $W$ 는 공핍영역(depletion region)의 폭이다.  $\Delta\phi$ 는 경계면에서 쇼트키 효과(Schottky effect)에 기인하여 낮아지는 장벽의 높이이다. 쇼트키 장벽의 높이  $\phi_b$ 를 결정하기 위하여 순방향 바이어스 하에서 Ti/SiC(4H) SBD의 전형적인 전류-전압(I-V) 특성을 Fig. 4에 보였다. 열이온 방출(thermionic emission) 이론에 의하면 순방향 전류 밀도  $J$ 는[17]

$$J = J_s \exp\left[\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1\right] \quad (1)$$

이고, 여기서  $J_s$ 는 역방향 포화(saturation)

전류밀도,  $n$ 은 다이오드의 이상계수(ideality factor),  $k$ 는 Boltzman상수, 그리고  $T$ 는 절대 온도이다. Fig. 4에서 낮은 전류밀도( $<10^{-2} \text{A/cm}^2$ )일 때 그래프의 기울기로 부터 구한 이상계수  $n$ 은 1.07이었다. 이상계수가 거의 1에 가까운 것으로 보아 순방향 전류는 거의 전자들의 확산에 의존하며, 다이오드는 이상적 특성(ideal characteristics)을 나타낸다. Fig. 4의 그래프를 전류밀도축에 외삽하여 얻은 포화 전류밀도는  $5.0 \times 10^{-8} \text{A/cm}^2$ 이었다. 식(1)에서 포화 전류밀도  $J_s$ 는

$$J_s = A^* T^2 \exp\left[\frac{-e(\phi_b - \Delta\phi)}{kT}\right] \quad (2)$$

으로 주어지는데,  $A^*$ 는 유효 Richardson 상수로서

$$A^* = \frac{m^* e k^2}{2\pi^2 \hbar^3} \quad (3)$$

로 주어진다[17]. 여기서  $m^*$ 은 전자의 유효 질량으로서  $0.206m_0$ ( $m_0$ 는 전자질량)이고,

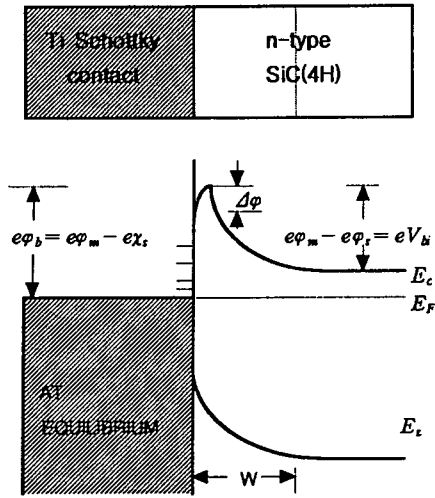


Fig. 3. The energy band diagram of the Ti/SiC(4H) Schottky barrier diode at equilibrium,

$\hbar$ 는  $2\pi$ 로 나눈 Planck상수이다. 식(3)의  $A^*$ 의 이론적인 계산치는  $24.7 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 이다. 식(2)의  $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE_m}{4\pi\epsilon_s}} \quad (4)$$

이고, 여기서  $E_m$ 은 Ti/SiC 계면에서 최대 전기장의 세기이고,  $\epsilon_s$ 는 SiC(4H)의 유전률로서  $9.7\epsilon_0$  ( $\epsilon_0$ 는 진공 유전률)이다.  $\Delta\phi$ 는 약 1V의 순방향 바이어스에서 0.01 V로 계산되었다.

장벽의 높이  $\phi_b$ 는 식(2)에서 온도변화에 따라 포화 전류밀도를 측정하여 구할 수 있다. Fig. 5는 온도범위  $26^\circ\text{C}$ 와  $140^\circ\text{C}$  사이에서 포화 전류밀도를 측정하여  $T^{-1}$ 의 함수로서  $\log(J_{s0}/T^2)$ 의 그래프를 그린 것이다. Fig. 5의 그래프의 기울기로 부터 구한 장벽의 높이  $\phi_b$ 는 0.91 V이었고,  $A^*$ 는  $25 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 이었다. 이는 A. Itoh에 의하여 측정된 SiC(4H)의 장벽의 높이 0.95 V와 근사하다

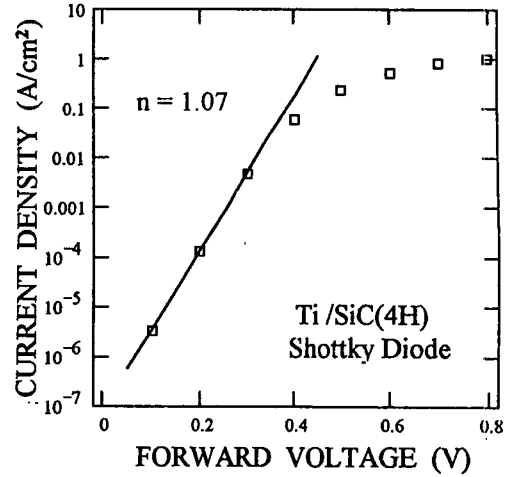


Fig. 4. I-V characteristic of a Ti/SiC(4H) Schottky barrier diode under the forward bias voltage.

[14].

Ti/SiC(4H) SBD의 역방향 I-V 특성을 Fig. 6에 나타내었다. 역방향 항복전장은 약  $1.7 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 로서 아주 높았다.

계단접합(abrupt junction)인 경우,  $x < W$ 인 영역에서 전하밀도  $\rho \approx eN_d$ , 그리고  $x > W$ 인 영역에서 전위의 기울기  $dV/dx \approx 0$ 이다. 이는 Ti/SiC SBD의 편면(one-side)  $p^+/n$  접합과 유사하다. 공핍층의 폭  $W$ 는[17]

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_d}(V_{bi} - V - \frac{kT}{e})} \quad (5)$$

이고, 여기서  $N_d$ 는 주개농도(donor concentration)이다. 단위면적당 공간전하  $Q_{sc}$  및 공핍층 전기용량  $C$ 는 각각

$$Q_{sc} = eN_dW = \sqrt{2eN_d\epsilon_s(V_{bi} - V - \frac{kT}{e})} \quad (6)$$

및

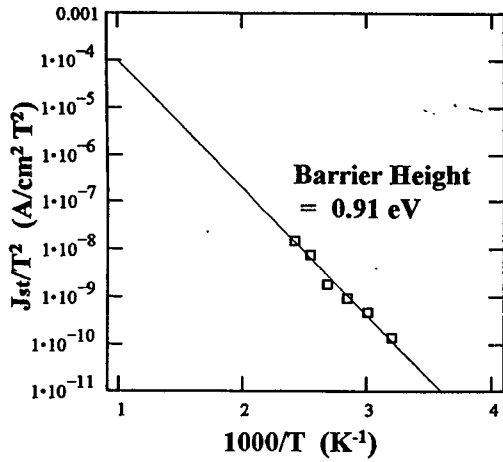


Fig. 5. A plot of  $\log(J_{st}/T^2)$  versus  $T^{-1}$  for the Ti/SiC(4H) shottky barrier diode.

$$C = \frac{|\partial Q_{sc}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{e\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} - V - kT/e)}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (7)$$

이다. 식(7)을 다시 쓰면

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V - kT/e)}{e\epsilon_s N_d} \quad (8)$$

이고, 또는

$$N_d = \frac{2}{e\epsilon_s} \left[ -\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right] \quad (9)$$

으로 쓸 수 있다. 만일  $N_d$ 가 공핍층 영역에서 일정하면  $1/C^2$ 과  $V$ 의 그래프는 일차비례한다. Fig. 7은 Ti/SiC(4H) SBD의 전기용량-전압( $1/C^2$ - $V$ ) 특성을 보여준다. 내부전위  $V_{bi}$ 와 주개농도  $N_d$ 는 각각 식(8)과 (9)를 이용하여 전압축의 절편과  $1/C^2$ - $V$  특성의 기울기로 부터 구하였다. Fig. 7의 그래프의 기울기로 부터 식(9)를 이용하여 계산된  $N_d$ 는  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 전압축 절편으로 부터  $V_{bi}$ 는 0.65 V를 얻었다[18].  $1/C^2$ - $V$  특성에서 장벽높이  $\phi_b$ 는[17]

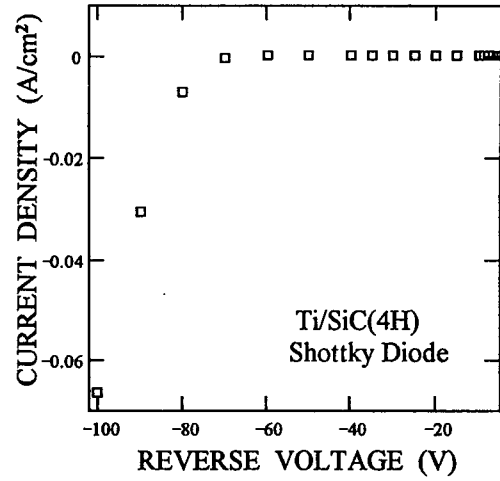


Fig. 6. I-V characteristic of the Ti/SiC(4H) shottky barrier diode under reverse bias voltage.

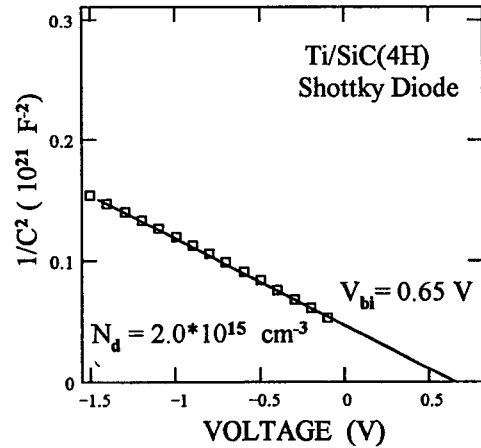


Fig. 7. A plot of the inverse square of capacitance( $1/C^2$ ) versus voltage( $V$ ) in a Ti/SiC(4H) shottky barrier diode.

$$\phi_b = V_{bi} + V_n - \Delta\phi + \frac{kT}{e} \quad (10)$$

이다. 여기서 전위  $V_n$ 은 Fermi 준위와 전도대(conduction band)의 하단 사이의 전위차로서

$$V_n = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (11)$$

으로 주어진다.  $N_c$ 는 전도대의 전자들의 유효 상태밀도로서  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이다.  $N_d$ 가  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 식(11)에서 계산된  $V_n$ 은 0.245 V이다. 식(10)에서 온도 300 K일 때 장벽높이  $\phi_b$ 는 0.91 V로서 I-V 특성으로 구한 장벽 높이와 거의 같다.

#### 4. 결 론

SiC(4H) 결정에 Ti을 열증착하여 Ti/SiC(4H) 쇼트키 장벽 다이오드를 만들었다. 사용된 SiC는 X-선 회절상과 라만 스펙트럼으로부터 결정다형이 4H인 단결정 SiC(4H)임을 보였다. SiC(4H)의 주개농도는 전기용량-전압( $1/C^2$ -V) 측정으로부터  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이었으며, 내부전위는 0.65 V이었다. 순방향 바이어스에서 전류-전압(I-V) 특성의 기울기로 부터 구한 다이오드의 이상계수는 1.07이었으며, 이 전류는 거의 전자들의 확산에 의한 것이다. 역방향 바이어스에서 항복전장(breakdown field)은 약  $1.7 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 이었으며, 매우 크다. 상온에서 140°C까지 온도변화에 따라 포화전류를 측정하여 구한 전위 장벽은 0.91V이었는데, 이는  $1/C^2$ -V 특성으로 부터 구한 전위장벽과 같았다.

#### 감사의 글

SiC(4H) 결정 시료를 제공해 주신 교토대학 전자물성 공학과 H. Matsunami 교수님과 A. Itoh 박사에게 감사드립니다. 라만 산

란 측정에 도움을 주신 기초과학 지원 센터의 나 훈균 박사님에게 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J.W. Palmour, J.A. Edmond, H.S. Kong and C.H. Carter, *Physica B* 185 (1993) 461.
- [2] K. Ueno, T. Urushidani, K. Hashimoto and Y. Seki, *IEEE Elect. Dev. Lett.* 16 (1995) 331.
- [3] P.M. Shenoy and B.J. Baliga, *IEEE Elec. Dev. Letts.* 16 (1995) 454.
- [4] C.I. Harris, A.O. Konstantinov, C. Hallin and E. Janzen, *Appl. Phys. Lett.* 66 (1995) 1501.
- [5] K.S. Park and K.A. Lee, *J. Kor. Phys. Soc.* 29 (1996) 225.
- [6] K.S. Park, T. Kimoto and H. Matsunami, *J. Kor. Phys. Soc.* 30 (1997) 123.
- [7] 박국상, 이기암, *응용물리* 10 (1997) 73.
- [8] 박국상, 이기암, *한국결정성장학회지* 7 (1997) 126.
- [9] D.L. Barrett and R.B. Campbell, *J. Appl. Phys.* 38 (1967) 531.
- [10] A. Itoh, H. Akita, T. Kimoto and H. Matsunami, *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 1400.
- [11] Y. Wu and R.B. Campbell, *Solid State Electron* 17 (1974) 683.
- [12] M.M. Anilin, A.N. Andreev, A.A. Lebedev, S.N. Pyaiko, M.G. Rastegaeva, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk, A.L. Syrkin and V.E.

- Chelnokov, *Sov. Phys. Semicond.* 28 (1991) 198.
- [13] A. Itoh, T. Kimoto and H. Matsunami, *IEEE Elec. Dev. Lett.* 16 (1995) 280.
- [14] A. Itoh, Control of Electrical Properties of 4H-SiC Grown by VPE for Power Electronic Application (Thesis of Doctor Degree, Kyoto Univ., 1991) pp.4-11.
- [15] H. Okumura, E. Sakuma, J.H. Lee, H. Mukaida, S. Misawa, K. Endo and S. Yoshida, *J. Appl. Phys.* 61 (1987) 1134.
- [16] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics* (McGraw-Hill Inc., New York, 1995) pp.286-333.
- [17] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, New-York, 1981) Chap.5.
- [18] K.S. Park, Physical Properties of Silicon Carbide and Device Applications (Thesis of Doctor Degree, Dankook Univ., 1997) pp.141-153.