

고전압 Ti/4H-SiC 쇼트키 장벽 다이오드 제작 및 특성분석

High Voltage Ti/4H-SiC Schottky Rectifiers

김창교*, 양성준*, 이주현**, 노일호**, 조남인***, 김남균****, 김은동****

(C. K. Kim*, S. J. Yang*, I. H. Noh**, J. H. Lee**, N. I. Cho***, N. K. Kim****, E. D. Kim****)

Abstract

In this paper, we have fabricated 4H-SiC schottky diodes utilizing a metal-oxide overlap structure for electric filed termination. The barrier height and Ideality factor were measured by current-voltage, capacitance-voltage characteristics. Schottky barrier height(SBH) were 1.41eV for Ni and 1.35eV for Pt, 1.52eV for Pt/Ti at room temperature and Pt/Ti Schottky diode exhibited Ideality factor was 1.06 to 1.4 in the range of 25°C~200°C. To improve the reverse bias characteristics, an edge termination technique is employed for Pt/Ti/4H-SiC Schottky rectifiers and the device show excellent characteristics with higher blocking voltage up to 780V compared with unterminated devices.

Key Words : silicon carbide, SBH(schottky barrier height), ideality factor(η), breakdown

1. 서 론¹⁾

현재의 전력용 반도체 소자는 실리콘을 기반으로 하고 있다. 하지만 실리콘을 기반으로 한 반도체 소자는 동작한계 온도가 200°C 이하인 문제점이 있어 고온 동작이 가능한 광역 에너지 대역을 갖은 반도체 물질을 이용한 전력용 반도체 소자에 대한 연구가 활발하다[1]. 대표적인 광대역 반도체 재료로서 SiC, GaN, 다이아몬드 등이 있는데 SiC의 경우 높은 항복 전계($2\sim 4 \times 10^6 \text{Vcm}^{-1}$), 높은 포화속도($2 \times 10^7 \text{cm/s}$), 그리고 높은 열전도도(4.9W/cm K)의 특성을 갖고 있는 물질로서 고전력 소자로서의 다양한 발전 가능성을 보여주고 있다. 또한 다수 carrier 소자로서 즉, 소수 carrier storage가 없으므로 빠른 스위칭 속도와 낮은 switching 전력 손

실 특성으로 고주파수 응용 소자로서의 이상적인 작동을 하는 특성을 갖고 있다. 이에 SiC를 이용한 전력소자의 연구가 활발히 진행되어 6H-SiC, 4H-SiC 쇼트키 다이오드는 최대 항복전압 1000~3000V, 최대 작동 온도 600°C까지 보고되고 있다 [2-5]. 이에 본 연구에서는 산화막 Termination 방법으로 고전압 쇼트키 장벽 다이오드를 제작하여 C-V, I-V의 측정으로 여러 가지 다이오드 변수를 구하였다.

2. 실험

본 실험에서 소자제작에 이용된 4H-SiC 웨이퍼는 도핑농도가 $5.1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 이고 성장된 두께가 10 μm 인 epi층으로 이루어진 Cree Research사의 웨이퍼를 사용하였다. 첫 번째 공정으로 표면의 오염물질을 최소화하기 위해 트리클로로에티렌(TCE), 아세톤, 메탄올, 탈이온 증류수, 그리고 고온의 H_2O_4 용액에 각각 3분 동안 세척하였다. 또한 알칼리 용액($\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1:1:5$)과 산성용액($\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1:1:5$)에서 각각 5분동안 에칭후, 탈

* : 순천향대학교 정보기술공학부
(충남 아산시 신창면 읍내리 646)
Fax : 041-530-1097
E-mail : ckkim1@sch.ac.kr

** : (주) iCurie Lab

*** : 선문대학교 전자공학과

**** : 한국전기연구원

이온 증류수를 사용해 세척하였다. 고전압 소자의 경우, 항복전압을 결정하는데 중요한 역할을 하는 모서리 Termination 기술 중에서 산화막 Termination 방법을 이용하였다. 산화막 고저항층 형성을 위해 Tube Furnace로 1350℃의 온도에서 산소와 트리클로로에틸렌을 혼합한 가스를 이용한 건식 산화방법으로 3000Å 두께의 산화막층을 형성하였다. 뒷면에 옴직접합을 형성하기 위해 BOE로

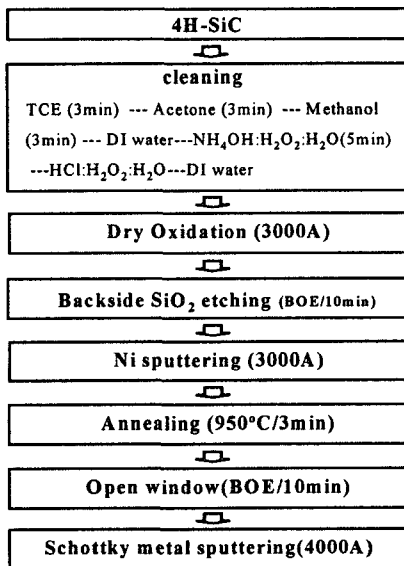


그림 1. 시편 제조에 관한 공정 순서도.
Fig. 1. Flow chart for device fabrication processes.

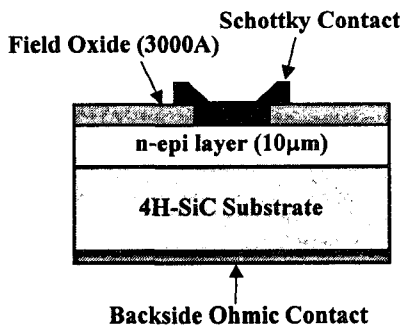


그림 2. 쇼트키 다이오드 소자의 구조.
Fig. 2. Schematic of the SiC Schottky diode structure.

뒷면의 산화막을 제거한 후 rf sputter를 이용하여 Ni를 3000Å의 두께로 증착하였다. Ni/SiC 옴직접합 특성을 향상시키기 위해 급속 열처리 장비 RTP(rapid thermal processor)를 이용하여 950℃에서 3분동안 열처리를 하였다. 쇼트키 접합을 형성하기 전에 표준 웨이퍼 세정공정을 통해 세척하였고, 사진공정으로 지름 220µm의 overlap 구조를 갖는 접합 패턴을 형성한 후 DC magnetron sputter를 사용해 Ti(100Å), Pt(4000Å)의 두께로 형성하였다. 그림 1과 2는 제조공정의 순서도와 소자의 구조를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 옴직접합

산화공정시 형성된 뒷면의 산화막을 BOE로 에칭한 후 Ni를 3000Å으로 증착한 후 옴직접합을 형성하기 위하여 급속 열처리 장비 RTP를 이용하여 1.0×10^{-5} Torr의 진공에서 950℃의 온도로 3분간 열처리를 수행하였다. 그림 3은 열처리 후 Ni/SiC 계면을 XRD 장비를 이용하여 분석한 결과이다. XRD 분석에서 보여지듯이 적절한 열처리로 Ni 실리사이드가 형성되어 졌음이 나타나며 I-V 측정을 통해 구하여진 접촉 비저항 값은 $3.8 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ 으로 측정되었다[6].

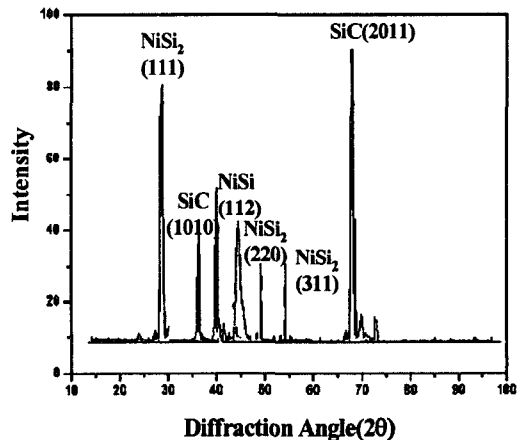


그림 3. Ni/4H-SiC에 관한 XRD 분석.
Fig. 3. The XRD pattern for the sample of Ni/4H-SiC structure annealed at 950℃ for 3 min.

3.2 C-V 특성

쇼트키 장벽의 측정은 C-V 측정법으로 구해졌다. 그림 4은 -10V까지의 역바이어스를 인가한 후 1kHz에서 1MHz의 주파수 범위에서 $1/C^2$ 값을 측정한 결과이다. C-V 측정시 여러 문헌에서 보고되고 있듯이 주파수에 대한 의존성은 나타나지 않았다[7]. 역바이어스에 대한 특정된 $1/C^2$ 값을 통해 아래의 식을 이용하여 쇼트키 장벽을 구하였다.

$$\Phi_B = V_i + V_0 + \frac{kT}{q} \quad (1)$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (2)$$

여기서 V_i 는 Voltage intercept, N_C 는 effective density of state in conduction band, N_D 는 donor concentration, kT 는 thermal energy이다. 여기서 SiC의 도너농도는 $5.1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, V_0 는 0.1V로 근사화하여 계산하였다[7-8]. Ni, Pt, Pt/Ti에 대한 쇼트키 장벽은 각각 1.41eV, 1.35eV, 1.52eV 값으로 측정되었다.

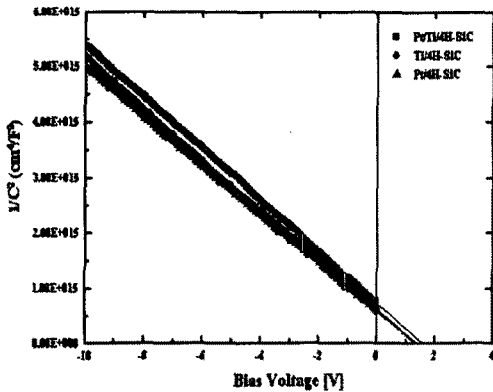
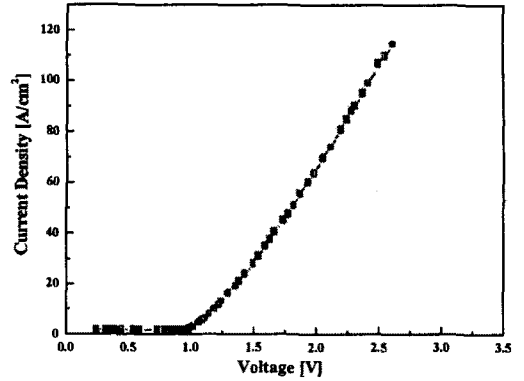


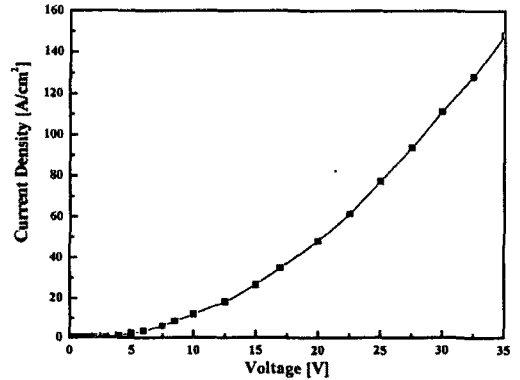
그림 4. 쇼트키 장벽 다이오드의 $1/C^2$ -V 특성 곡선.
Fig. 4. $1/C^2$ -Voltage plots for Schottky barrier diodes.

3.3 I-V 특성

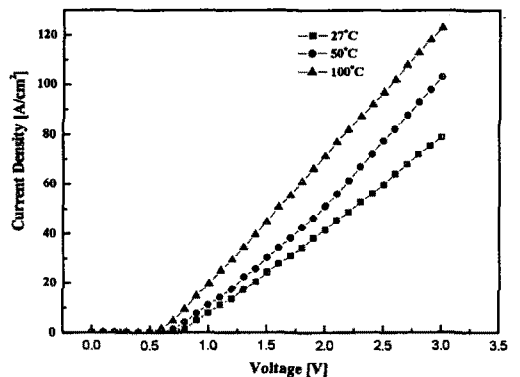
순방향, 역방향 인가시의 I-V 특성은 반도체 변수 분석기(HP 4155)를 이용해 25°C ~ 200°C 범위에서 측정하여 열확산 모델(thermionic emission model)식으로부터 쇼트키 다이오드 변수를 구하였다.



(a) Ni/4H-SiC Schottky diode.



(b) Pt/4H-SiC Schottky diode.



(c) Pt/Ti/4H-SiC Schottky diode
(measure Temp.: 25~100°C)

그림 5. 쇼트키 장벽 다이오드의 순방향 I-V 특성 곡선.

Fig. 5. Forward I-V characteristics for Schottky barrier diode..

$$J = J_s \left[\exp\left(-\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$J_s = A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_B}{kT}\right] \quad (4)$$

여기서 J_s 는 포화전류 밀도이며, η 는 이상계수, A^* 는 Richardson's 상수 ($146Acm^{-2}k^{-2}$)이다[7]. 위 식 (3), (4)에서 쇼트키 장벽 Φ_B 와 이상계수 η 는 다음 식으로 구하여진다.

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^* T^2}{J_s}\right) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{q}{kT} \left(-\frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \right) \quad (6)$$

그림 5는 여러 금속에 대한 순방향 인가시의 전류 전압특성을 나타낸 곡선이다. Pt/Ti, Pt, Ni가 각각 $100Acm^{-2}/2.2V$, $100Acm^{-2}/3.1V$, $100Acm^{-2}/2.8V$ 의 값으로 전압 전류 특성에 있어 Pt보다는 Ni이 우수한 특성을 나타내는데 이는 금속의 일함수 값에 의존한다고 기인된다. 또한 adhesion layer로 일함수가 낮은 Ti를 증착함으로써 Pt/SiC 구조보다 전압 전류 특성이 보다 향상된 특성을 나타냄을 알 수 있다.

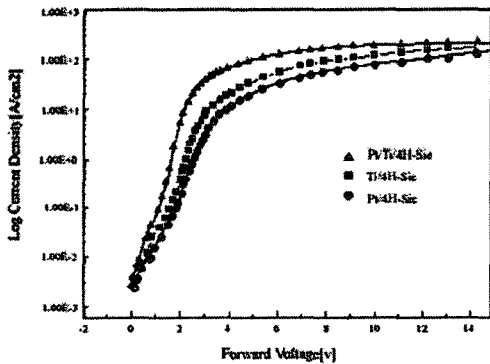


그림 6. 쇼트키 장벽 다이오드의 ln J-V 특성 곡선.
Fig. 6. ln J-Voltage plots for Schottky barrier diodes.

그림 6는 전압 전류 특성 곡선에 대한 log J-V 관계를 나타내고 있다. 그림 7은 측정되어진 log J-V의 값으로부터 식 (6)을 이용하여 얻어진 이상계수 η 의 온도 의존성을 나타낸 그림이다. 그림 7

에서 보여지듯이 25°C~100°C까지는 이상계수 η 값이 1.2~1.06으로 감소하나 150°C 이상에서는 증가함을 알 수 있다.

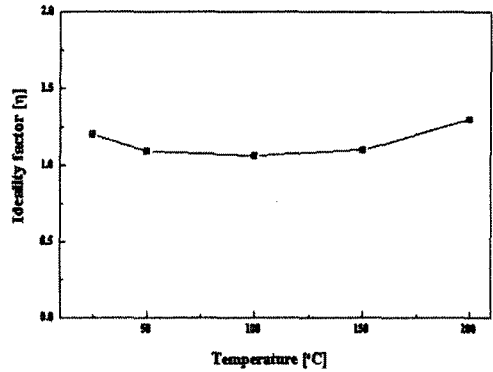


그림 7. Pt/Ti/4H-SiC 쇼트키 다이오드의 이상계수 값의 온도의 의존성
Fig. 7. Ideality factor of Pt/Ti/4H-SiC Schottky diodes as a function of temperature

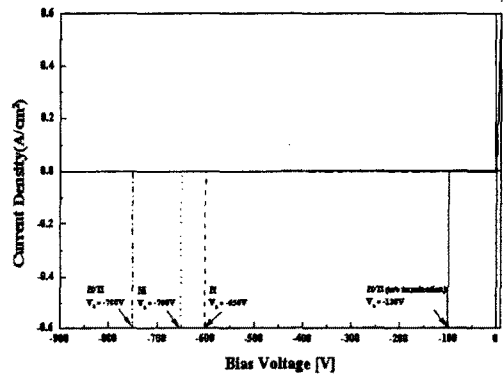


그림 8. Co/Si/Co n형쇼트키 장벽 다이오드의 역방향 바이어스 J-V 특성 곡선.
Fig. 8. Current voltage characteristics of a 220 μm diam Schottky diode.

그림 8은 지름 220 μm 의 overlap 구조로 만들어진 소자의 역바이어스 인가에 따른 항복전압 값을 측정된 그림이다. Pt/Ti/SiC, Ni/SiC, Pt/SiC 소자의 항복전압 값이 각각 780V, 700V, 650V로 나타났다으며, Termination을 하지 않은 소자에 비해 산화막 Termination을 행한 소자가 매우 우수한

특성이 나타남이 보여진다. C-V와 I-V특성을 통해 구하여진 여러 가지 다이오드 변수를 표 1에 나타내었다.

표 1. C-V와 I-V 특성을 통해 구하여진 여러 가지 다이오드 변수.

Table 1. Result of Schottky barrier height, ideality factor, turn-on voltage and breakdown voltage.

	Pt/Ti/4H-SiC	Pt/4H-SiC	Ni/4H-SiC
Breakdown Voltage(V)	780	650	700
Schottky Barrier Height(eV)	1.52	1.35	1.41
Ideality Factor	1.2 / 25℃ 1.09 / 50℃ 1.06 / 100℃	2.1	1.8
Turn-on Voltage(V)	0.7	1.1	0.9

4. 결론

본 연구에서는 도핑농도가 $5.1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 이고 성장된 두께가 $10\mu\text{m}$ 인 epi층으로 이루어진 4H-SiC 웨이퍼에 산화막 Termination 방법을 이용하여 고전압 쇼트키 다이오드를 제작하였다. C-V 측정으로 구하여진 쇼트키 장벽은 1.35~1.52eV의 값을 가졌으며, 이상계수 값은 1.06~2.1의 값을 가졌으며 측정온도 100℃까지는 감소하는 경향을 보이나 그 이상의 온도에서는 증가함이 나타났다. Termination 방법을 행한 소자의 경우 Termination을 행하지 않은 소자의 140V에 비해 780V의 높은 항복전압을 얻었다. 산화막 Termination 방법은 산화막의 두께와 밀도에 많은 의존성을 가짐이 보고되고 있기에 더 높은 항복전압을 이루기 위해서는 산화막 성장의 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 SiCDDP(SiC Device Development Program) 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] Charles E. Weitzel, Jhon W. Palmour, Clavin H. Carter, Karen Moore, "Silicon Carbide high power device", IEEE Trans. ED, 43, pp. 1732-1741, 1996.
- [2] T. Kimoto, N. Miyamoto, "Performance limiting surface defects in SiC epitaxial p-n junction diodes", IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. 46, No. 3, 1999
- [3] Ravi K. Chilukuri, B. Jayant Baliga, "High voltage Ni/4H-SiC Schottky rectifiers", IEEE, 1999.
- [4] Q. Wahab, T. Kimoto, A. Ellison, "A 3kV Schottky barrier diode in 4H-SiC", Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 4, 1998.
- [5] K. J. Schoen, J. P. Henning, J. M> Woodall, "A dual metal trench Schottky pinch rectifier in 4H-SiC", IEEE Elec. Dev. Lett., Vol. 19, No. 4, 1998.
- [6] Ts. Marinova, V. Kraster, L. Hallin, "Interface chemistry and electric characteristic of nickel metallisation on 6H-SiC", Applied surface science 99, pp. 119-125, 1996.
- [7] S. K. Lee, C. M. Zetterling, M. Ostling, "Schottky diode formation and characterization of titanium tungsten to n- and p-type 4H silicon carbide", Journal of Applied Physics, Vol. 87, No. 11, 2000.
- [8] V. Saxena J. N. Su, A. J. Steckl, "High-Voltage Ni- and Pt-SiC Schottky diodes utilizing metal field plate termination", IEEE. Trans. Elec. Dev., Vol. 46, No. 3, 1999.