

온도에 따른 4H-SiC에 기반한 SBD, PiN 특성 비교

서지호¹, 조슬기^{1,2}, 이영재¹, 안재인¹, 민성지¹, 이대석¹, 구상모^{1,a}, 오종민^{1,b}

¹ 광운대학교 전자재료공학과

² 고려대학교 전기전자공학과

Temperature-Dependent Characteristics of SBD and PiN Diodes in 4H-SiC

Ji-Ho Seo¹, Seulki Cho^{1,2}, Young-Jae Lee¹, Jae-In An¹, Seong-Ji Min¹, Daeseok Lee¹,
 Sang-Mo Koo^{1,a}, and Jong-Min Oh^{1,b}

¹ Department of Electric Materials Engineering, Kwang-woon University, Seoul 01897, Korea

² Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received May 9, 2018; Revised June 11, 2018; Accepted June 15, 2018)

Abstract: Silicon carbide is widely used in power semiconductor devices owing to its high energy gap. In particular, Schottky barrier diode (SBD) and PiN diodes fabricated on 4H-SiC wafers are being applied to various fields such as power devices. The characteristics of SBD and PiN diodes can be extracted from C-V and I-V characteristics. The measured Schottky barrier height (SBH) was 1.23 eV in the temperature range of 298–473 K, and the average ideal factor is 1.17. The results show that the device with the Schottky contact is characterized by the theory of thermal emission. As the temperature increases, the parameters are changed and the V_{th} is shifted to lower voltages.

Keywords: Silicon carbide, Power devices, PiN, SBD, Barrier height, Ideality factor

1. 서론

SiC (silicon carbide)는 우수한 특성과 기술적 성숙으로 인해 전력 반도체로서 주목을 받고 있다 [1,2]. 그리고 지난 10년 동안 높은 온도, 높은 주파수 등 유망한 소자 재료로써 현저한 주목을 받아 왔다 [3,4]. 위에 언급된 이점을 기초하여, SiC를 이용한 전력 소자는 반도체 산업에서 많은 잠재력을 가지고 있다. 전력 소자는 신재생 에너지 시장, 스마트 그리드, 스마트 주택, 운송 전기, 하이브리드 전기 자동차(EV/HEV) 및 기타 신흥 산업 및 의료 응용 분야로 계속 확장되고 있

으며, 엔지니어는 SiC 같은 WBG (wide bandgap) 물질을 이용한 전력 소자에 많은 관심이 있다. 4H-SiC에 의한 높은 전력 소자는 전력 반도체 산업에서 괄목할 만한 잠재력을 가지고 있다. 특히 4H-SiC에 기반을 둔 SBD와 PiN 다이오드는 많은 곳에 적용되기 시작했다.

금속-반도체 접점은 전계 효과 트랜지스터(MESFET)의 게이트 전극, 금속 산화물 반도체 전계 효과 트랜지스터(MOSFET)의 source 및 drain contact, high voltage impact ionization을 이용한 전극과 같은 많은 소자에 적용이 되는 구조이다 [5].

SBD에서 schottky barrier height의 조절 및 분석은 전력 손실의 최소화와 발전된 소자 구현을 위하여 매우 중요하다 [6]. 4H-SiC SBD는 여러 분야에서 Si PiN 다이오드를 대체하기 시작했다. 그러나 블로킹 능력이 증가함에 따라 저항이 증가하기 때문에 SBD는 약 2.5 kV보다 큰 전압 영역에 대해서는 상대적으로

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

b. Corresponding author; jmOH@kw.ac.kr

비실용적이다. 4H-SiC PiN 다이오드는 높은 전력 처리가 요구되는 응용 분야에 매우 적합하지만 아직까지는 시장에서의 양산이 이루어지지 않고 있다 [7]. 본 연구에서는 4H-SiC 기반의 대표적인 실용적 소자인 SBD와 PiN 다이오드 소자들의, 온도 변화에 따른 특성을 중심으로 주요 파라미터를 도출하여 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 소자는 Cree에서 제공되었고, 모든 웨이퍼는 4인치이며 4H-SiC의 substrate층은 N type이며, $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑 농도를 가지며, 에피층은 4 μm 의 두께를 가지며, 도핑 농도는 $1.2\text{--}1.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 소자의 단면도는 그림 1에 나타나 있으며, dicing된 개별 소자들을 이용하여 측정 분석을 수행하였다. 전류-전압 측정은 그림 2에 나타난 고전력 소자 특성을 측정할 수 있는 반도체 파라미터 분석기 probe station을 이용하여 각각의 다른 온도(25, 50, 100, 150 및 200°C)에 따른 측정을 진행하였고, 캐패시턴스-전압을 상온에서 주파수(1 MHz, 100 KHz, 10 KHz, 1 KHz)별로 측정하였다.

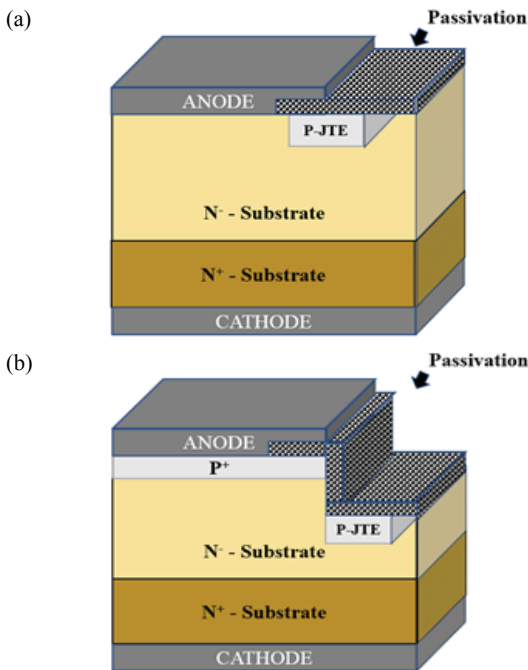


Fig. 1. Schematic cross section of an integrated 4H-SiC. (a) SBD and (b) PiN diode.

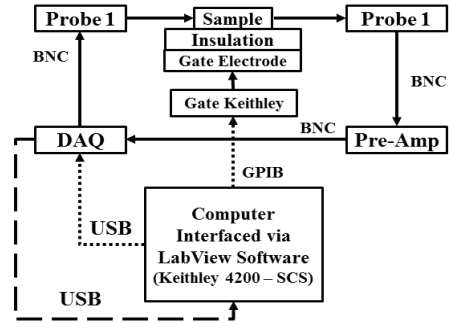


Fig. 2. An image of on-wafer probing system for high-power device characterization.

3. 결과 및 고찰

3.1 C-V 특성

SBD와 PiN 다이오드의 경우 각각 n-타입 SiC 에피 영역과 저도핑된 에피 영역의 doping 농도와 함께 M-S 접합 및 PN 접합의 barrier height를 capacitance 측정을 통하여 구하였다.

Schottky barrier는 다음 관계식을 기반으로 역전압 상태의 $1/C^2$ 그래프를 상의 전압 절편에 의해 결정할 수 있다.

$$\Phi_B = V_i + V_n + \frac{kT}{q} - \Delta\phi \quad (1)$$

여기서 V_i 는 전압 절편, V_n 는 전도대 아래에 fermi level의 전위, $\Delta\phi$ 는 schottky barrier를 낮추는 image force, 그리고 kT 는 열에너지이다.

C-V 측정은 상온에서 1 KHz ~ 1 MHz 범위에서 측정을 진행했다. 그림 3에 각 다이오드 구조의 C-V 측정 결과를 나타내었다. 각각 그래프를 통해 barrier height를 구할 수 있다. 전압 절편을 구함으로써 $-\phi_{bi}$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{w_{dep}^2}{A^2 \epsilon_s^2} = \frac{2(\phi_{bi} + V_r)}{qN_e \epsilon_s A^2} \quad (2)$$

식 (2)는 $1/C_{dep}^2$ 과 V_r 사이의 선형관계를 암시한다. 위 그림 3에서 선의 기울기로부터 N (혹은 일방형 접합에서 적게 도핑된 쪽의 도펀트 농도)을 결정할 수 있으며, 수평축과의 교차점으로부터는 내부 전위 ϕ_{bi} 를

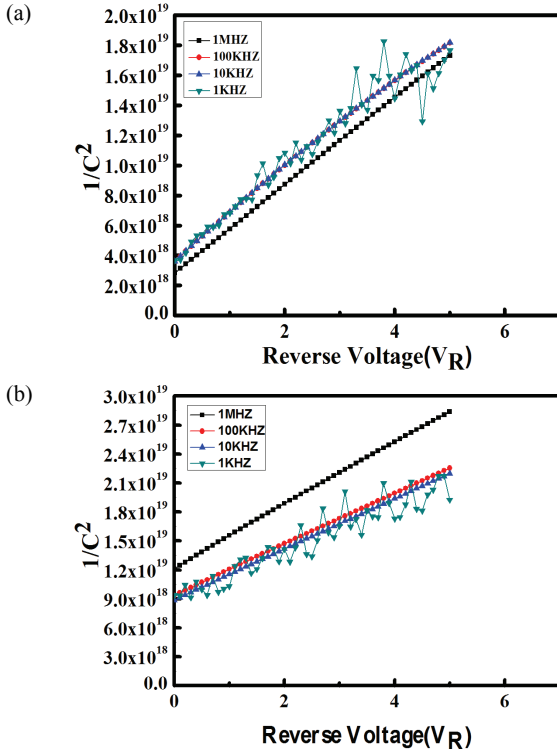


Fig. 3. $1/C^2$ vs reverse voltage (V_R) (a) for schottky barrier diode and (b) PiN diode in the frequency range of 1 KHz ~ 1 MHz at room temperature. The contact area is 0.256 mm^2 .

결정할 수 있다. 기울기가 더 작은 PiN 다이오드가 SBD의 경우보다 barrier height 값이 더 작음을 알 수 있으며, C-V 측정에 의한 SBD, PiN 각각 barrier height에 의한 결과는 $\sim 1.01 \text{ eV}$ 와 $\sim 3.49 \text{ eV}$ 로 도출되었다. 즉, SiC-금속 접합과 SiC p-n 접합 구조에 따른 barrier height의 차이에 주로 기인함을 알 수 있다.

3.2 I-V 특성

SBD의 순방향 I-V 특성은 열적 방출 이론에 의존된다. 식 (3)으로 주어진 SBD의 이상적인 전류-전압 관계는 PN 다이오드와 같은 형태이지만, 역포화 전류 밀도의 크기가 다르다.

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

$$I_s = AR^{**} T^2 e^{-\frac{q\phi_{bi}}{kT}} \quad (4)$$

Table 1. Results of schottky barrier height and ideality factor measurement of SBD using a C-V and I-V measurements as a function of the measurement temperature.

Measurement temp.	Ideality factor	Barrier height I-V	Barrier height C-V	Reverse current density
298 K	1.40	1.15	1.01	4.68×10^{-3}
323 K	1.16	1.17		4.39×10^{-3}
373 K	1.13	1.24		4.37×10^{-3}
423 K	1.10	1.27		4.83×10^{-3}
473 K	1.08	1.30		5.91×10^{-3}

여기서 I_s 는 포화 전류 밀도, η 는 ideality factor, A^{**} 는 유효 리처드슨 상수($146 \text{ Acm}^2 \text{K}^{-2}$)이다. 이상 계수와 포화 전류 밀도는 순방향 전류-전압 특성에서 실험적으로 얻을 수 있다. Schottky barrier height과 ideality factor는 다음 식으로 얻을 수 있다.

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

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

위 식을 이용하여 각각의 온도별에 따른 파라미터를 표 1에 정리하였다.

표 1을 보면 온도가 증가함에 따라 ideality factor는 감소하는 경향이 보이며, 이것은 곧 이상적인 다이오드에 근접하는 것을 의미한다. 그리고 추출된 데이터를 통해 얻은 값들이 표 1에 나와 있듯이, barrier height는 상온에서 I-V와 C-V 측정 분석에 의한 barrier height는 유사한 값을 나타낸다. 온도에 따라 점점 증가한다. 왜냐하면, 온도가 증가함에 따라 열전압이 증가하기 때문이다. 결국, ideality factor와 barrier height는 서로 trade-off 관계를 보이며, 식 (4)에 의해 reverse current density는 온도가 올라가면서 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 각각 SBD와 PiN의 온도에 따른 전류-전압 관계를 나타낸 그래프이다. 쇼트키 다이오드와 PiN 다이오드의 I-V 특성은 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 PiN 다이오드가 SBD보다 threshold voltage가 더 높으며, SBD 및 PiN 다이오드의 평균 barrier height 값인 $\sim 1.22 \text{ eV}$ 및 $\sim 3.49 \text{ eV}$ 과 관련이 있으며 어떠한 주어진 전류를 얻기 위하여 순방향으로 공급되

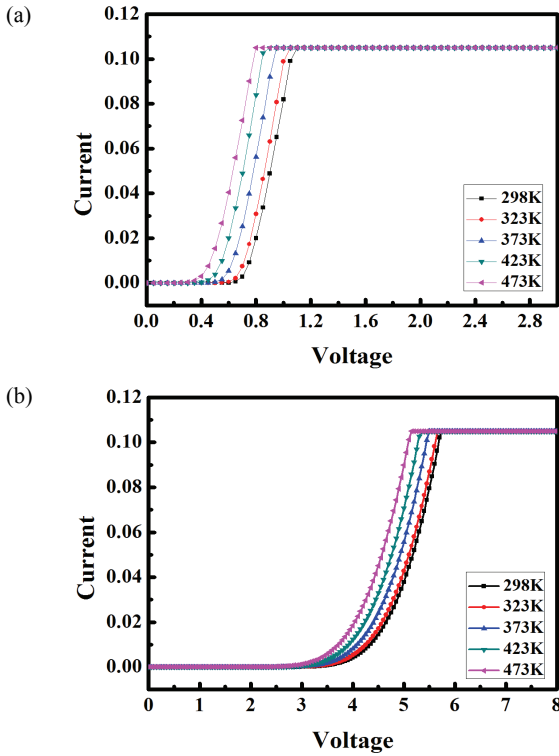


Fig. 4. Current vs forward voltage (V_f) (a) for schottky barrier diode and (b) PiN diode with measurement temperature from 25 to 200°C.

는 바이어스는 SBD가 PiN보다 낮다. 또한 역포화 전류의 차이와 함께 정전용량 특성 등의 이러한 파라미터 및 구조적 차이에 의하여 소자의 스위칭 특성 등에도 영향을 미치게 된다. 값이 크다는 것은, 특정 값의 다이오드 전류를 생성하기 위해 상대적으로 더 작은 정바이어스 전압 V 를 필요로 한다는 것을 의미한다.

두 종류 다이오드들의 순방향 바이어스 특성들은 역시 다를 것이다. 어떠한 주어진 전류를 얻기 위하여 순방향으로 공급되는 바이어스는 PiN보다 SBD가 낮다. 다른 말로 표현하면, SBD의 유효 턴-온 전압은 PiN보다 작다. 그림 4에 의하면 각 소자들은 온도에 의존한다. 온도가 상승하면서, threshold voltage가 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 즉, V_{th} 가 더 작아짐으로써 턴-온 전압도 작아지므로 이는 보다 이상적인 다이오드에 근접하는 것을 의미한다.

식 (2)를 이용하면, 낮게 도핑된 쪽의 도핑 농도는 다음과 같다.

$$N_n = 2 / (\text{기울기} \times q\epsilon_s A^2) \tag{7}$$

Table 2. Results of barrier height measurement of PiN using a C-V measurements as a function of the measurement temperature.

Measurement temp.	$1/C_{dep}^2$	Low doping concentration	High doping concentration	Barrier height C-V
298 K	1.23×10^{19}	6.93×10^{15}	7.00×10^{18}	2.75
323 K	1.23×10^{19}	6.93×10^{15}	7.00×10^{18}	2.99
373 K	1.23×10^{19}	6.93×10^{15}	7.00×10^{18}	3.45
423 K	1.23×10^{19}	6.93×10^{15}	7.00×10^{18}	3.91
473 K	1.23×10^{19}	6.93×10^{15}	7.00×10^{18}	4.37

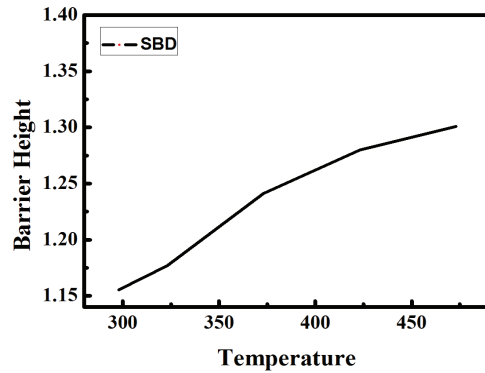


Fig. 5. Temperature dependence of schottky diode model parameters 'barrier height'.

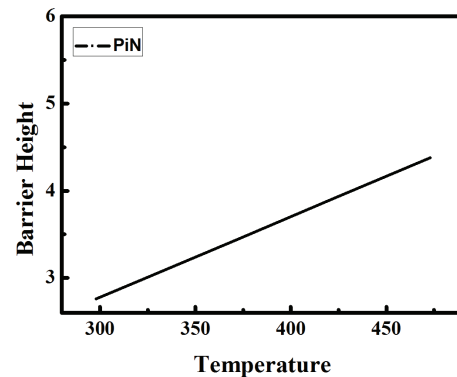


Fig. 6. Temperature dependence of PiN diode model parameters 'barrier height'.

식 (7)을 통해 도핑 농도를 구하며,

$$\phi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_n N_p}{n_i^2}\right) \tag{8}$$

식 (7), (8)을 통해 높게 도핑된 쪽의 도핑 농도를 구할 수 있다. 표 2와 같이 PiN 소자 특성을 분석한 파라미터를 정리하였다. 근사화된 식 (7)에서 알 수 있듯이 pn 접합의 고도핑-저도핑 영역의 차이가 클수록 저도핑 영역의 값을 높은 정확도로 얻을 수 있으나, 고도핑 영역의 값을 구하지 못하며, 그 차이가 작아질수록 단일 도핑레벨 수치의 정확도가 떨어지게 된다. 한편 그림 5와 그림 6의 경우 온도에 따른 PiN 다이오드와 SBD의 barrier height 파라미터 특성을 분석할 수 있다. 온도가 증가함에 따라 식 (8)에 의해 barrier height는 역시 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 4H-SiC 위에 증착하여 만든 전력 반도체 소자 'SBD'와 'PiN' 특성을 비교 분석했다. 각각의 온도에 따른 C-V 측정 및 I-V 측정을 통해 데이터를 추출하였으며, 얻어진 데이터를 통해 여러 파라미터를 얻어 분석하였다. SBD의 barrier height는 온도에 따라 1.15 eV에서 1.30 eV으로 증가하였고, PiN diode의 barrier height는 온도에 따라 2.75 eV에서 4.37 eV으로 증가함을 확인하였으며, 온도가 증가함에 따라 문턱전압은 낮아지며, SBD의 ideality factor는 '1'에 점점 가까워진다. 즉 온도가 증가함에 따라 SBD와 PiN diode의 barrier height는 커지고 turn-on voltage는 낮아지는 결론을 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전기연구원 주요 사업(No.17-12-N0101-35)과 한국연구재단의 지원(2015R1D1A1A01056596, 2015 K1A3A1A59074209) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원(10080321)을 통해 연구 개발된 결과임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology* (John Wiley & Sons, Singapore, 2014) p. 1-6.
- [2] B. J. Baliga, *Silicon Carbide Power Devices* (World Scientific Publishing Co., Pvt. Ltd. Singapore, 2005) p. 16.
- [3] K. M Geib, C. Wilson, R. G. Long, and C. W. Wilmsen, *J. Appl. Phys.*, **68**, 2796 (1990). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.346457>]
- [4] R. J. Trew, *Phys. Status Solidi A*, **162**, 409 (1997). [DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(199707\)162:1%3C409::AID-PSSA409%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1521-396X(199707)162:1%3C409::AID-PSSA409%3E3.0.CO;2-O)]
- [5] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1981) p. 375.
- [6] J. Millan, P. Godignon, and D. Tournier, *Proc. 2004 24th International Conference on Microelectronics (IEEE Cat. No.04TH8716)* (IEEE, Nis, Serbia, 2004) p. 23.
- [7] H. Lendenmann, F. Dahlquist, N. Johansson, R. Söderholm, P. A. Nilsson, J. P. Bergman, and P. Skytt, *Mater. Sci. Forum*, **353**, 727 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.353-356.727>]