

고내압 SiC-IGBT 소자 소형화에 관한 연구

김성수¹, 구상모^{1,a}

¹ 광운대학교 전자재료공학과

A Study on High Voltage SiC-IGBT Device Miniaturization

Sung-Su Kim¹ and Sang-Mo Koo^{1,a}

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

(Received July 17, 2013; Revised July 31, 2013; Accepted October 15, 2013)

Abstract: Silicon Carbide (SiC) is the material with the wide band-gap (3.26 eV), high critical electric field (~ 2.3 MV/cm), and high bulk electron mobility (~ 900 cm²/Vs). These electronic properties allow attractive features, such as high breakdown voltage, high-speed switching capability, and high temperature operation compared to Si devices. In general, device design has a significant effect on the switching and electrical characteristics. It is known that in this paper, we demonstrated that the switching performance and breakdown voltage of IGBT is dependent with doping concentration of p-base region and drift layer by using 2-D simulations. As a result, electrical characteristics of SiC-IGBT device is higher breakdown voltage ($V_B = 1,600$ V), lower on-resistance ($R_{on} = 0.43$ m Ω ·cm²) than Si-IGBT. Also, we determined that processing time and cost is reduced by the depth of n-drift region of IGBT was reduced.

Keywords: 4H-SiC, IGBT, Breakdown-voltage, Threshold-voltage

1. 서론

전력 반도체 소자는 전압 구동 방식으로 동작하는 소자이며, 응용 분야로서 전원 공급 장치, 변환기, 모터 제어기, 국방, 우주항공 등에 널리 사용된다. 최근 전력 반도체 소자의 소재로 기존의 실리콘 (Si) 보다 넓은 에너지 갭을 가진 반도체인 실리콘 카바이드 (SiC), 질화 갈륨 (GaN) 등 화합물 반도체를 이용하려는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 그 중 실리콘 카바이드는 고에너지 갭 반도체 재료 (SiC, AlN, GaN, ZnSe,

diamond 등) 중에서도 4족 원소 중 원자번호가 작은 Si 과 C가 강한 공유결합을 이루고 있는 화합물이다. 따라서 SiC 는 가벼우면서도 우수한 기계적 성질, 열적 안정성, 내산화성 및 부식저항성 등을 가지고 있다. 실리콘에 비해 약 10배 높은 전계강도 ($\sim 2.3 \times 10^6$ V/cm)와 약 3배 높은 열전도율 (~ 4.9 W/cmK at 300 K)을 가지고 있으며, Si 을 이용한 소자는 도핑된 상태에서 다수 캐리어의 온도 의존성 때문에 주로 밴드갭 (1.12 eV)에 의한 제한 동작 온도가 200°C 이하로 한정되지만, SiC를 이용하면 600 ~ 700°C 이상의 고온 환경에서도 동작 가능한 소자를 실현할 수 있다. 또한, Si에 비하여 고전계에서 전자의 drift velocity가 2배 정도 크고, 전자 이동도, 열전도도가 높으며 특히, 실온에서 항복전계가 Si나 GaAs보다 10배 정도 높으므로 고주파, 고전압용 재료로서도 매우 중요한 재료이다.

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

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대표적인 전력 반도체 소자로 정류 다이오드, BJT (bipolar junction transistor), power MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (insulated gate bipolar transistor) 등이 사용되고 있다. 이러한, 전력 반도체 소자는 스위칭 속도가 빠르며 전력 손실이 적고, 높은 전압에서 동작이 가능하다는 장점을 가지고 있다 [1]. 그 중 IGBT 소자는 전류전도 능력이 뛰어난 소자이며, 큰 전력을 처리하기 위해 설계된 스위칭 디바이스로서 전원 공급 장치, 차량 내의 인버터, 컨버터 등에 널리 사용되고 있다. 이러한 IGBT 소자의 사용이 증가함에 따라 효율을 높이기 위해 여러 가지 구조에 대하여 연구 개발이 활발히 진행 중에 있다 [2].

본 논문에서는 Si-IGBT와 SiC-IGBT를 설계하여 두 소자의 전기적 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 4H-SiC IGBT 최적화 구조 설계

본 연구에서는 4H-SiC IGBT 구조를 설계하기 위해 2차원 전산모사 (Atlas Inc., Silvaco tool)를 사용하여 그림 1의 구조로 IGBT를 설계하였다. p형 콜렉터 ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 영역 위에 상대적으로 낮은 도핑 농도를 갖는 n-drift ($2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)은 두께 $88 \mu\text{m}$ 로 형성하여, 항복 전압 (V_B) 강하를 막았다. 이어서, p-base 영역 ($3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)을 형성한 후, n+, p+ 에미터 영역을 각각 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 만큼 도핑 하였으며, 채널 길이는 $0.5 \mu\text{m}$ 로 형성하였다. 또한, 게이트 산화막의 경우 50 nm 로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 후, SiC-IGBT 소자의 항복 전압을 Si-IGBT 소자의 항복 전압과 비슷한 값으로 맞추면서 소자의 소형화를 시키기 위해 SiC-IGBT 소자내의 n-drift 영역의 두께를 $28 \mu\text{m}$ 로 축소하여 시뮬레이션을 진행하였다. IGBT의 항복 전압과 문턱 전압에 영향을 미치는 중요한 파라미터는 n-drift 영역, p-base 영역의 두께 및 도핑 농도이다. 따라서, 화합물 반도체를 이용하며, 새로운 구조 개발을 통해 적절한 문턱 전압과 항복 전압을 증가시키는 것이 전력 반도체 소자 개발의 중요 요소이다 [3,4].

3. 결과 및 고찰

IGBT 소자 제작 시, Si과 SiC를 이용하였을 때의

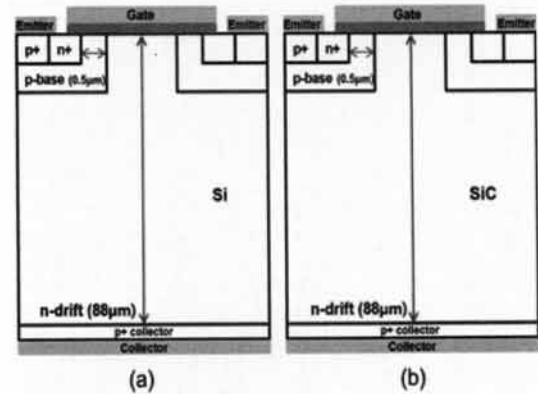


Fig. 1. Simplified cross-section of the (a) Si-IGBT with $V_B = 1,400 \text{ V}$, and (b) with same dimension 4H-SiC IGBT.

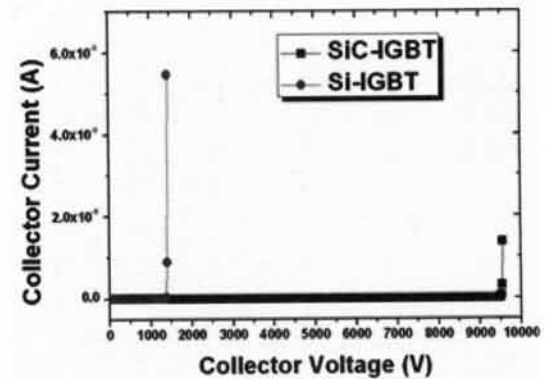


Fig. 2. Blocking characteristics of Si-IGBT ($V_B = 1,400 \text{ V}$) and 4H-SiC IGBT ($V_B = 9,600 \text{ V}$).

전기적 특성을 비교하였다. IGBT 소자의 전기적 큰 영향을 미치는 요소인 n-drift 영역의 도핑농도는 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 으로 하였으며, p-base 영역의 도핑농도는 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 으로 하여 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 2에서 보이는 것과 같이 Si-IGBT 소자의 항복 전압 (V_B)은 약 $1,400 \text{ V}$ 이었으며, 같은 dimension에서 SiC-IGBT 소자의 항복 전압 (V_B)은 약 $9,600 \text{ V}$ 이었다. Si-IGBT와 SiC-IGBT 소자의 항복 전압을 비교해본 결과, SiC-IGBT 소자의 항복 전압이 약 7배 정도 증가한 것을 확인하였다. 물리적 성질 중 임계전압 (E_C)을 비교해보면 Si의 경우 $0.3 \times 10^6 \text{ V/cm}$, SiC의 경우 $3.6 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 로 SiC의 임계전압이 Si의 임계전압보다 약 10배 크기 때문에 소자의 항복 전압도 SiC-IGBT 소자가 Si-IGBT 소자보다 크게 나온 것이라고 사료된다.

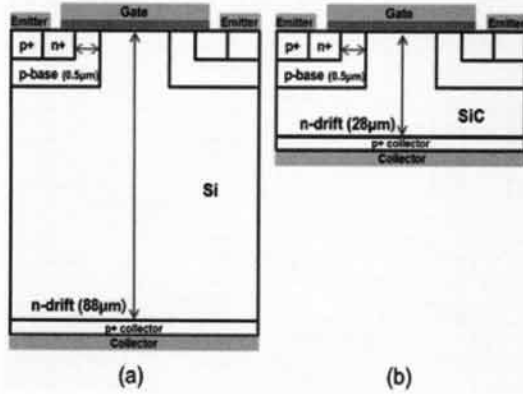


Fig. 3. Simplified cross-section of the (a) Si-IGBT with $V_B = 1,400$ V and (b) reduced n-drift depth 4H-SiC IGBT for similar V_B range ($V_B \sim 1,600$ V).

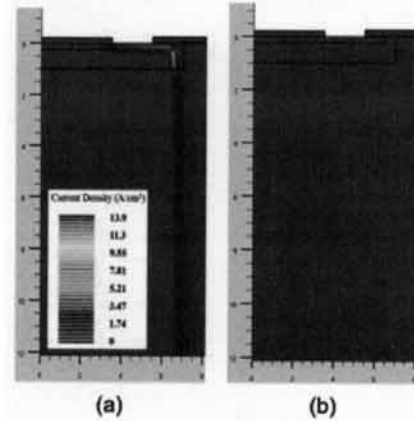


Fig. 5. The current density distribution of device cross section at $V_C = 1,400$ V and $V_G = 0$ V. (a) Si-IGBT structure, (b) reduced n-drift depth 4H-SiC IGBT structure.

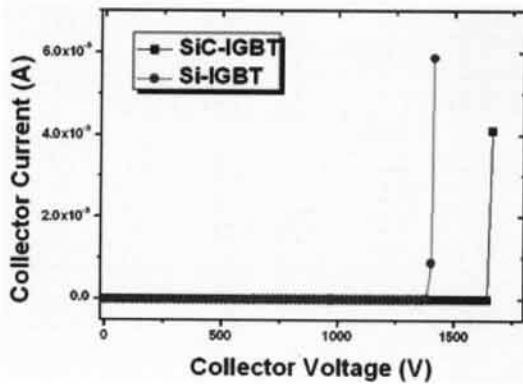


Fig. 4. Blocking characteristics of Si-IGBT ($V_B = 1,400$ V) and reduced n-drift depth 4H-SiC ($V_B = 1,600$ V).

소자의 항복 전압 (V_B)에 큰 영향을 미치는 요소인 n-drift 영역의 두께는 Si-IGBT 소자와 SiC-IGBT 소자에서 $88 \mu\text{m}$ 이었으며, SiC-IGBT 소자의 항복 전압 (V_B)이 약 7배 정도 크다. 이때, SiC-IGBT 소자 내의 n-drift 두께를 줄여 항복 전압 (V_B)은 Si-IGBT 소자의 항복 전압 (V_B)과 비슷한 값을 얻으며, SiC-IGBT 소자의 소형화하기 위하여 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 3은 위에서 언급하였던 SiC-IGBT 소자의 항복전압 (V_B)을 Si-IGBT 소자의 항복전압과 비슷한 스펙으로 얻기 위하여 SiC-IGBT 소자 내의 n-drift 두께를 $28 \mu\text{m}$ 로 줄인 소자의 단면도를 나타낸다. 소자의 n-drift 영역의 도핑농도는 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, p-base

영역의 도핑농도는 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 로 이전에 진행하였던 시뮬레이션의 조건과 같다.

그림 4는 Si-IGBT 소자의 항복전압과 두께가 1/3로 축소된 n-drift 구조를 가진 SiC-IGBT 소자의 항복 전압을 비교한 결과 값으로 소자가 소형화되었음에도 SiC-IGBT 소자의 항복 전압이 Si-IGBT 소자의 항복 전압보다 약 200 V 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 SiC로 IGBT 소자를 제작할 시 소자의 소형화가 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한, 소자의 크기를 줄이지 않는다면 Si-IGBT 소자보다 더 큰 전압에서 동작이 가능하다고 설명할 수 있다. SiC-IGBT 소자 내의 n-drift 두께를 축소시켜 항복 전압을 Si-IGBT 소자의 항복 전압과 근사하게 얻었다. SiC-IGBT 소자의 항복 전압이 약 1,600 V일 때의 n-drift 두께는 약 $28 \mu\text{m}$ 로 진행하였다. SiC-IGBT 소자의 총 depth가 약 1/3로 축소되어도 Si-IGBT 소자의 항복전압인 1,400 V보다 큰 것을 확인하였다.

그림 5는 Si-IGBT 소자의 항복 전압인 1,400 V에서 Si-IGBT 소자와 SiC-IGBT 소자 단면의 current density distribution을 비교한 2차원 전산모사 그림이다. 소자 내의 p-base 영역과 n+ 에미터 영역 내 junction에서의 critical electrical field 값이 $1.2 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 일 때, SiC-IGBT 소자는 항복 특성을 보이지 않는다. 이를 통하여, SiC-IGBT 소자의 n-drift depth를 줄여도 Si-IGBT 소자의 항복전압보다 큰 것을 확인하였다. 채널이 형성되기 위해서는 p-base 영역에서 inversion이 형성되어야 한다. 이는 SiC의 경우 Si과 비

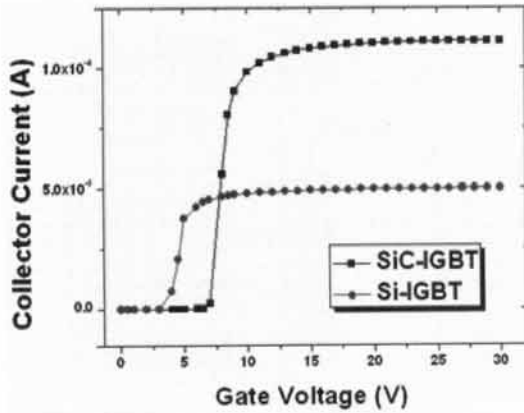


Fig. 6. Threshold characteristics of Si-IGBT ($V_{th} = 4$ V) and reduced n-drift depth 4H-SiC IGBT ($V_{th} = 6.4$ V).

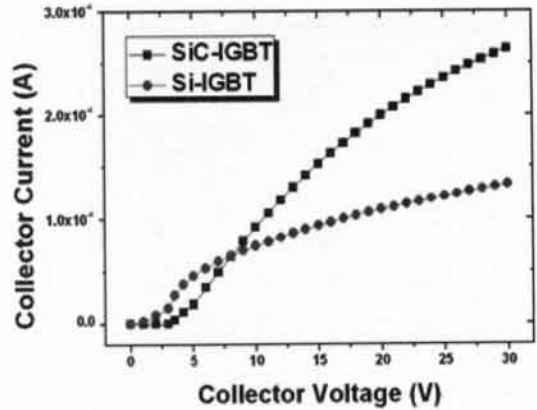


Fig. 8. On-current characteristics of Si-IGBT and reduced n-drift depth 4H-SiC.

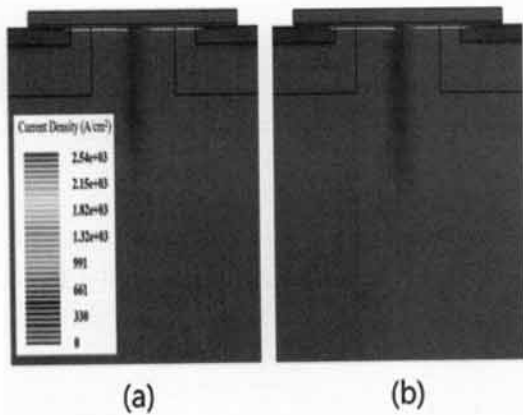


Fig. 7. The current density distribution of device cross section (a) Si-IGBT structure, (b) reduced n-drift depth 4H-SiC IGBT structure.

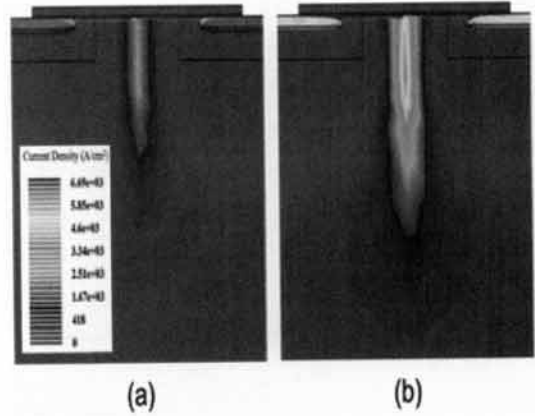


Fig. 9. The current density distribution of device cross section (a) Si-IGBT structure, (b) reduced n-drift 4H-SiC IGBT structure.

교하여 밴드갭이 넓기 때문에 inversion이 형성되려면 gate에 인가되는 전압이 Si 보다 높아야 한다. p-base doping concentration과 게이트 산화막 두께가 같을 때, Si 소자에 비하여 SiC 소자의 문턱전압이 높게 나타난다.

본 실험의 결과로 SiC-IGBT 소자의 문턱전압은 6.4 V, Si-IGBT 소자는 4 V (그림 6)로 측정되었다. 소자의 문턱전압을 낮추기 위해서는 p-base 영역의 doping concentration을 낮게 하거나, 게이트 산화막 두께를 얇게 제작하는 방법이 있다. SiC-IGBT 소자에 적용할 시 Si-IGBT 소자의 문턱전압과 비슷한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

그림 8은 Si-IGBT 소자와 n-drift depth를 줄인 SiC-IGBT 소자의 I_c - V_c 그래프로서, 온-저항을 비교할 수 있다. SiC-IGBT 소자의 온-저항 ($0.42 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$)이 Si-IGBT 소자의 온-저항 ($1.2 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$) 보다 약 3배 작은 것을 알 수 있다. 이는 SiC의 전자포화 속도 ($2.7 \times 10^7 \text{ cm/s}$)가 Si의 전자포화 속도 ($1.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$) 보다 약 3배 큰 이유도 있으며, SiC-IGBT 소자의 n-drift depth가 약 1/3로 줄어 SiC-IGBT 소자의 온-저항이 Si-IGBT 소자의 온-저항보다 작은 것으로 해석할 수 있다. Si-IGBT 소자의 온-전류와 SiC-IGBT 소자의 온-전류를 비교하였을 때, SiC-IGBT 소자의 온-전류가 큰 것을 알 수

있는데, 이를 그림 9에서 current density를 나타낸 구조그림에서 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 1,600 V급 SiC-IGBT 소자를 설계하여 Si-IGBT 소자와 동작 특성을 비교 분석하였다. 1,400 V급 Si-IGBT 소자의 파라미터와 동일한 구조의 SiC-IGBT의 항복전압이 약 9,600 V임을 확인하였다. 또한, SiC-IGBT 소자 내의 n-drift 두께를 줄여 시뮬레이션을 진행하였을 때, 항복전압 ($V_B = 1,600$ V), 문턱 전압 ($V_{th} = 6.4$ V), 온-저항 ($0.42 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)을 확인하였다. SiC를 이용하여 IGBT 소자를 제작할 경우 Si-IGBT 소자에 대비하여 높은 항복전압을 가질 수 있으며, 소형화가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제 기술혁신사업 (WPM사업)으로 수행되고 있는 '초고순도 SiC소재' 개발 사업과 한국연구재단의 지원 (2012M2B2A4029259)과 한국 중소기업청의 지원 (C0010549)을 통해 연구 개발된 결과임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] B. J. Baliga, *Silicon Carbide Power Devices* (World Scientific, USA, 2005)
- [2] S. H. Ryu, L. Cheng, S. Dhar, C. Capell, C. Jonas, J. Clayton, M. Donofrio, M. O'Loughlin, A. Burk, A. Agarwal, and J. Palmour, *Materials Science Forum*, 717, 1135 (2012).
- [3] X. Wang and J. A. Cooper, *IEEE Tran. Elec. Dev.*, 57, 511 (2010).
- [4] F. Zhang, L. Shi, L. Zhang, C. Li, W. Wangm, W. Yu, and X. Sun, *Solid-State Electronics*, 50, 813 (2006).