

신뢰성 개선된 IGBT 소자 신구조

이 명 진*

전남대학교 전자컴퓨터공학부

Advanced IGBT structure for improved reliability

Myoung Jin Lee*

School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

[요 약]

본 논문에서 개발된 IGBT 구조는 DC 송배전을 위한 고전력 스위치 반도체로서 사용되며, 빠른 스위칭 속도 및 개선된 항복전압 특성을 확보하여, 향후 신재생 장거리 DC 송전을 위한 중요한 전자 소자로서 이용될 것이 기대되고 있다.

새로운 타입의 차세대 전력 반도체로서, 스위칭 속도를 향상시키면서 동시에 항복 전압의 특성을 개선시켜, 전력 손실 특성을 줄이도록 설계되었고, 높은 전류 밀도의 장점을 동시에 획득 가능하다. 이러한 개선된 특성은 Planar IGBT의 N-drift 영역에 SiO₂를 추가로 도입함으로써 얻어지며, Sentaurus TCAD 시뮬레이션 툴을 사용하여, 비교 분석하였다.

[Abstract]

The IGBT structure developed in this paper is used as a high power switch semiconductor for DC transmission and distribution and it is expected that it will be used as an important electronic device for new and long distance DC transmission in the future by securing fast switching speed and improved breakdown voltage characteristic. As a new type of next generation power semiconductors, it is designed to improve the switching speed while at the same time improving the breakdown voltage characteristics, reducing power loss characteristics, and achieving high current density advantages at the same time. These improved properties were obtained by further introducing SiO₂ into the N-drift region of the Planar IGBT and were compared and analyzed using the Sentaurus TCAD simulation tool.

색인어 : 절연 게이트 양극성 트랜지스터, 항복 전압, 전력 손실, 스위칭 속도, DC 송전

Key word : Insulated Gate Bipolar Transistor [IGBT], Breakdown voltage [BV], power loss, switching speed, DC transmission

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2017.18.6.1193>



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.

Received 21 September 2017; Revised 05 October 2017

Accepted 25 October 2017

*Corresponding Author; Myoung Jin Lee

Tel: +82-62-530-1810

E-mail: mjlee@jnu.ac.kr

1. 서론

최근 에너지 수요의 증가와 신재생 에너지의 성장으로 인한 전력의 생산지와 소비지 사이의 거리가 더욱 멀어지면서 교류에서 직류송전으로 바뀌고 있는 추세에 있다. 하지만 직류송전은 교류송전에 비해 고장 발생 시 전류 0점이 형성되지 않기 때문에 더 좋은 차단기를 필요하게 되는데 기존의 기계식 차단기보다 빠르고 더 많은 고장전류를 차단할 수 있는 반도체 차단기와 하이브리드 차단기로 발전하고 있는 추세에 있다. 이러한 반도체 혹은 하이브리드 차단기에서 중요한 역할을 하는 것이 전력반도체 소자이다.

차단기에 들어가는 전력 반도체는 일반적으로 스위칭속도와 항복전압 특성을 증가시키고 전력 손실 특성을 줄이는 것이 중요하다. 특히 IGBT [Insulated Gate Bipolar Transistor]는 MOSFET [Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor] [1]의 빠른 스위칭 특성과 BJT [Bipolar Junction Transistor]의 높은 전류 밀도의 장점을 모두 가진 소자로 고전압, 고전류에 적합한 전력 반도체 소자로서 각광 받고 있다.[2][3]

따라서 본 논문에서는 차단기로서 IGBT의 항복전압과 스위칭속도 성능 향상을 위해 Planar PT [Punch Through] IGBT의 N-drift 영역에 SiO₂를 넣는 새로운 구조를 설계하고 전기적인 특성을 소자 분석 시뮬레이터인 Sentaurus TCAD를 사용하여 비교 분석을 하였다.[4]

II. 제안 구조의 Simulation 분석

2-1 새로운 구조의 제안 및 실험 조건

본 논문에서는 소자의 특성에 영향을 주는 파라미터로 SiO₂ 층에 대한 길이에 의존하는 결과를 분석하였다. 기존의 일반적인 IGBT 구조의 최적화를 진행한 후 최적화된 IGBT에서 SiO₂층을 길이별로 실험을 진행하여 파라미터의 영향을 비교하였다. IGBT는 항복전압 1200V와 1.2V의 온 상태 전압강하를 가지는 일반적인 PT IGBT를 통해 비교하였다. 실험을 위해 소자 분석 시뮬레이터인 Sentaurus TCAD를 사용하였고 전력 반도체 소자의 문턱전압은 외부 회로에 영향을 받지 않도록 5V의 문턱전압을 가지는 소자를 설계하였다. 소자의 파라미터는 Fig 1.과 Table 1.에 나타났으며 SiO₂층으로 인한 성능 향상 구조 역시 Fig 1.에 나타내었다. SiO₂층의 두께는 5um이며 파라미터 값인 SiO₂의 길이를 변경해가며 소자의 특성을 파악해나갔다. 기본적인 구조에 SiO₂를 추가함으로써 나타나는 전계에 의한 결과가 Fig 2. 및 3.에 나타나있다. 거리 x에 따르는 전계 E(x)는 다음의 식 (2.1)로 구할 수 있으며 전계의 적분은 전압이므로 전압이 일정하면 소자에 걸린 전계 역시 일정하게 된다. W_d는 디플리션 폭, N_d는 드리프트 영역의 도핑 농도, ε은 드리프트 영역의 유전율을 의미한다.

$$E(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s} (W_d - x) \tag{2.1}$$

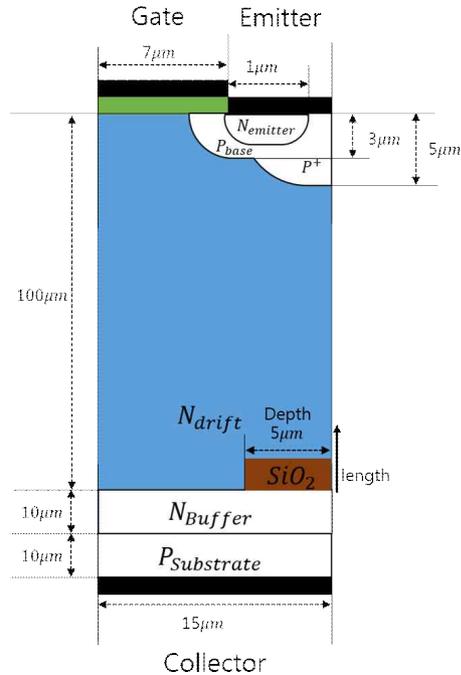


그림 1. PT IGBT 구조
Fig. 1 PT IGBT structure

표 1. PT IGBT 설계 파라미터
Table 1. PT IGBT design parameter

Parameter	Basic structure
Channel length	2µm
N _{drift} Doping Concentration	5 × 10 ¹³ /cm ³
Gate Oxide	0.5µm
N _{emitter} Doping Concentration	1 × 10 ²⁰ /cm ³
P _{base} Doping Concentration	4 × 10 ¹⁷ /cm ³
P ⁺ Doping Concentration	1 × 10 ¹⁹ /cm ³
N _{buffer} Doping Concentration	1 × 10 ¹⁶ /cm ³
JFET Doping Concentration	1 × 10 ¹⁶ /cm ³
JFET length	5µm
P _{substrate} Doping Concentration	1 × 10 ¹⁹ /cm ³

Fig 2.는 기본적인 구조와 새롭게 제안하는 구조의 수직 방향으로 달리 형성되는 Electric Filed의 등고선 분포를 보여준다. 새롭게 제안하는 구조에서 일정한 전계에 유전율이 더 작은 SiO₂물질을 N-drift영역 내에 추가함으로써 전계의 많은 양이 SiO₂부분에 걸리게 되며, 이로 인해 같은 전압에서 Si에 걸리는 전계의 양이 축소가 되는 것을 Fig 3.에 나타나는 수직방향으로 자른 Electric Filed의 단면도를 통해 개선을 확인할 수 있다. 따라서, 소자가 파괴되는 Breakdown Field(Si : $E_B = 0.3 \times 10^6$)에 도달하기까지의 전압이 상승하게 된다. 이로 인해 항복 전압이 상승하는 효과를 가지게 된다.

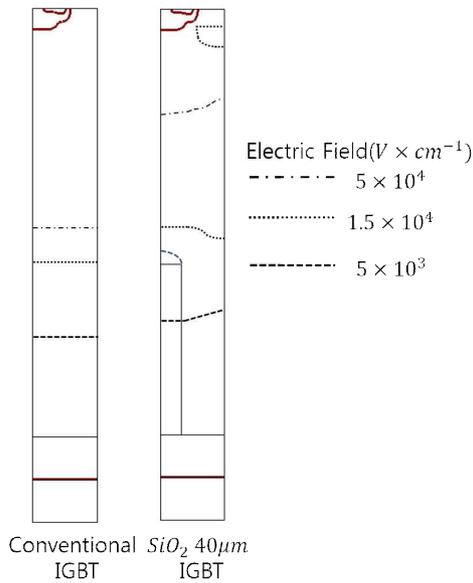


그림 2. 기본 구조와 새로운 구조의 Electric Field($V_{ce}=300V$)
Fig. 2 Electric Field for conventional structure and newly proposed structure ($V_{ce}=300V$)

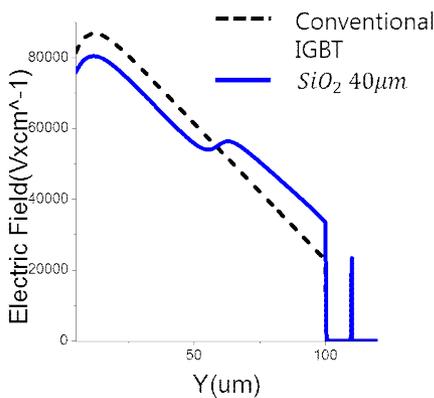


그림 3. 기본 구조와 새로운 구조의 수직(Y)축 전계 단면(X=10µm)
Fig. 3 Y axis Electric Field for conventional structure and newly proposed structure (X=10µm)

하지만 추가되는 SiO₂층에 의해 같은 전압에서 온 상태 전압 강하는 더 커지게 된다. 일반적인 IGBT에서 P-base 사이의 전류 통과 영역은 온 상태에서 p-base와 n-drift 영역의 공핍층의 확장에 의해 변하게 된다. 즉, 공핍층의 크기가 커짐에 따라 저항이 커지게 된다. 저항값은 식 (2.2)로 주어지며, L_G 는 게이트 길이, W_0 는 공핍층의 너비를 의미한다.

$$R_{J.sp} = \rho_d \frac{(L_G + 2m)(x_p + W_0)}{(L_G - 2x_p - 2W_0)} \quad (2.2)$$

새로운 구조는 추가되는 SiO₂층에 의해 공핍층이 크게 되고 이는 온 상태 전압강하에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 공핍층이 더 커지는 것을 Fig 4.에 나타냈다.

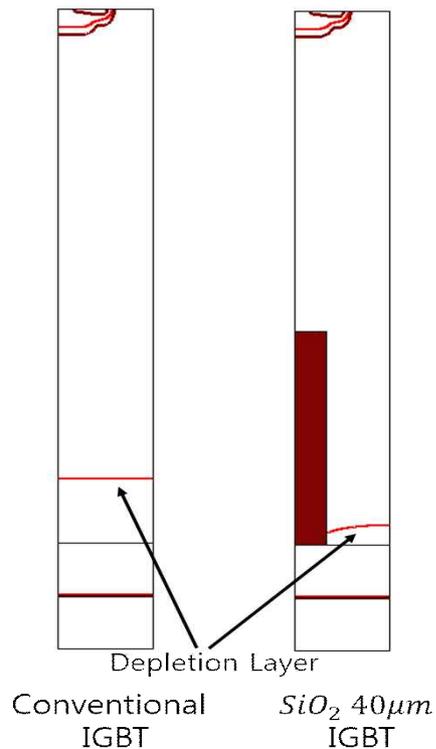


그림 4. 기본 구조와 새로운 구조의 공핍층 차이($V_{ce}=300V$)
Fig. 4 Depletion region for conventional structure and newly proposed structure ($V_{ce}=300V$)

또한, 전력 반도체 스위치로서 턴 오프 시간이 중요하게 되는데 IGBT는 Conductivity modulation으로 인해 턴 온 상태에서 소수 캐리어의 농도가 다수 캐리어의 농도보다 더 커지게 된다.[5],[6] 이 상태에서 턴 오프 상태가 되면 소수캐리어의 농도가 빠지는 속도에 따라 턴 오프 시간이 결정되는데 추가적인 SiO₂ 때문에 소수캐리어의 농도가 커지는 면적의 차이가 나게

된다. 이 때문에 턴 온 및 턴 오프의 스위칭 속도가 차이가 나게 된다.[7][8][9]

2-2 새로운 구조의 실험 결과 및 시뮬레이션 분석

본 논문에서는 IGBT에 추가적인 SiO₂를 넣고 길이를 변화 시키며 IGBT의 전기적 특성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. SiO₂의 길이가 길어질수록 항복전압은 점점 더 커지고 전력손실이 더 작아지고, 온 상태 전압의 크기가 커지는 것을 Fig 5.에서 Fig 8.을 통해 알 수 있다. 전력 손실과 항복 전압의 특성 측면에서는 향상을 보이거나 온 상태 전압 강하 측면에서는 손실을 보이고 있다.

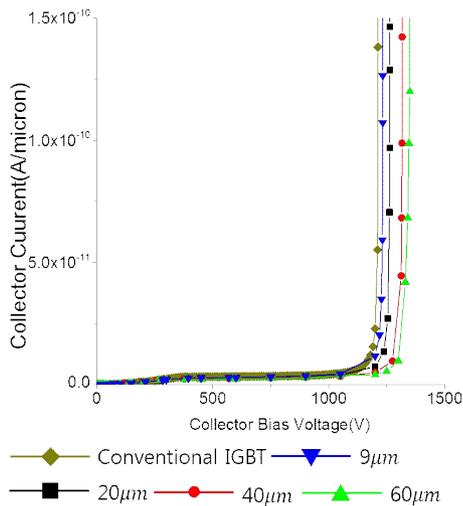


그림 5. SiO₂의 길이에 따른 항복전압의 변화
Fig. 5 Breakdown voltage characteristics depending on SiO₂ length

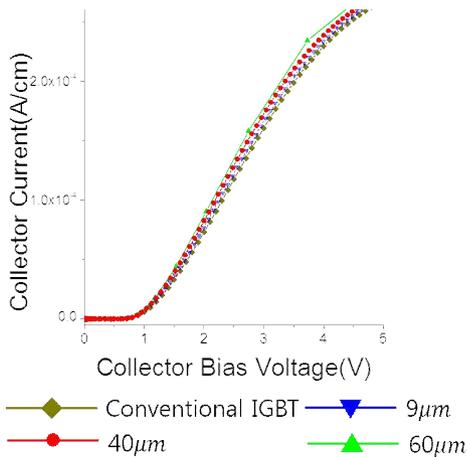


그림 6. SiO₂의 길이에 따른 On state 특성의 변화 (V_{ge}=8V)
Fig. 6 On state characteristics depending on SiO₂ length (V_{ge}=8V)

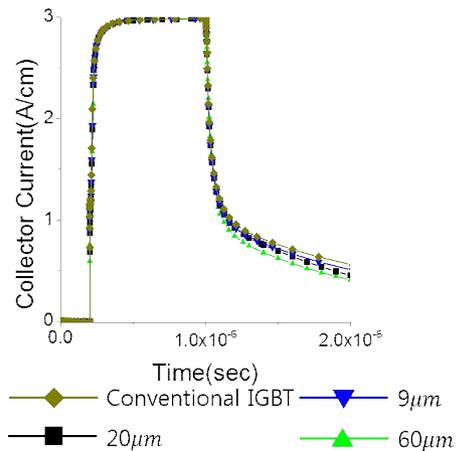


그림 7. Switch Turn On, Turn Off 특성
 (Turn on/off time= 1×10^{-7} , 1×10^{-6})
Fig. 7 Switch turn on/off characteristics (Turn on/off time= 1×10^{-7} , 1×10^{-6})

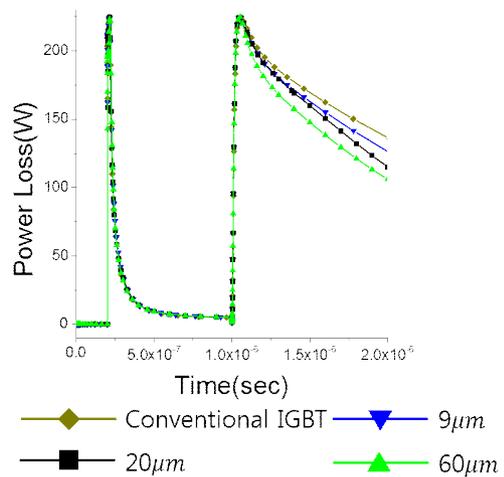


그림 8. SiO₂의 길이에 따른 전력손실
Fig. 8 Power loss depending on SiO₂ length

Table 2.와 Fig 8.의 결과를 통해 기본 구조와 SiO₂의 길이가 60um인 IGBT를 비교하게 되면 항복 전압은 1210V이고, 개선한 구조는 1350V로 11.2%의 향상을 보이게 되었고, 전력손실 측면에서는 25%의 향상을 보이게 되었다. 하지만 온 상태 전압 강하에서는 14%의 손실을 보인다. 하지만 온 상태 전압강하의 값 자체가 매우 작고 또한, 고전압에서 항복 전압으로 인해 고전압인 일정 전압에서 사용되는 소자의 수가 줄어들게 되므로 온 상태 전압강하로 인한 손실이 줄어들게 된다. Table 2의 전력 손실[W/s]은 Fig 8.에서 시뮬레이션을 통해 구해진 스위칭 시간에 따른 전력손실 값의 시간 변화율을 통해 얻었다.

표 2. 시뮬레이션 결과 파라미터 값들

Table 2. the parameters from simulation results

SiO ₂ 두께 (μm)	Break down voltage(V)	On - state Voltage Drop(V)	Power Loss (W/s)
0	1210	1.24	0.002
3	1213	1.26	0.00198
5	1218	1.27	0.00196
7	1223	1.28	0.00193
9	1228	1.3	0.00188
20	1250	1.33	0.00181
40	1300	1.38	0.00158
60	1350	1.45	0.0015

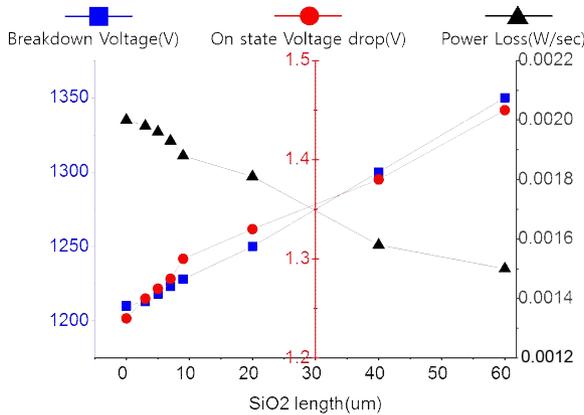


그림 9. SiO₂의 길이에 따른 전력손실, 항복전압, 온상태 전압 강하

Fig. 9 Power loss, breakdown voltage, and on state voltage drop depending on SiO₂ length

IV. 결론

본 논문에서는 차단기 스위치로서의 IGBT 성능 개선을 위한 새로운 구조를 제시하였으며 시뮬레이션을 통해 검증하게 되었다. 전기적 특성을 비교 분석한 결과 항복전압과 전력 손실적인 측면에서 향상된 것을 확인하였다. 온 상태 전압 강

하 측면에서는 손실이 발생하였으나 항복전압의 향상 때문에 고전압에서 차단기에서 사용되는 IGBT소자의 수가 줄어들게 되므로 손실적인 측면에서는 의미가 없는 것이 되기 때문에 차단기 스위치로서 IGBT 소자에 있어서 성능 및 생산성을 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국 전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비 (과제번호: R17XA05-78), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (과제번호: NRF-2015R1D1A1A01061081), 과학기술정보통신부 및 연구개발특구진흥재단에서 시행한 연구개발특구 육성사업(기술이전사업화 과제)에서 지원받았습니다.

참고문헌

[1]J.B. Lee, "Effects of DRAM in The Embedded Processor Performance", Journal of DCS, vol. 18, no. 5, pp.943-948, August, 2017

[2]S. Krstic, E. Wellner, A. Bendre, B. Semenov, "Circuit Breaker Technologies for Advanced Ship Power Systems", IEEE Electric Ship Technology Symposium, 2007

[3]J. HAFNER, B. JACOBSON, "Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids," presented at electric power system of the future- Integrating supergrids and microgrids International Symposium, Bologna, Italy, pp. 13-15, Sep. 2011

[4]Synopsys Sentaurus Device Synopsys Inc.Zürich Switzerland Version H-2013.03.

[5]B. J. Baliga, "Power semiconductor devices", PWS Publishing Company, 1996

[6]V. K. Khanna IGBT theory and Design. 2003 IEEE Press.

[7]S. J. Finney B.W. Williams and T.C. Green "IGBT turnoff characteristics and high frequency application" in Proc. IEE Coll. On Devices Drive Circuits and Protection pp. 5/1 - 5/4, 1994.

[8]S. Pendharkar K. Shenai "Zero voltage switching behaviour of punch -through and non punch -through insulated gate bipolar transistors (IGBTs), " IEEE Trans. Electron Devices vol. 45 no. 8 pp. 1826 - 1835 Aug. 1998.

[9]H. Iwamoto H. Kondo S. Mori J. E. Donlon and A. Kawakami "An investigation of turn-off performance of planar and trench gate IGBTs under soft and hard switching" in Proc. IEEE Ind. Appl. Conf. pp. 2890-2895, 2000.



이명진(Myoung Jin Lee)

2001년 : 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학학사)

2003년 : 서울대학교 전기공학부 대학원 (공학석사)

2007년 : 서울대학교 전기공학부 대학원 (공학박사)

2007년~2011년: SK 하이닉스반도체 선행설계팀, 책임연구원

2011년~2013년: 정부청사 특허청, 표준특허반도체팀, 공업사무관

2014년~현 재: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 조교수

※관심분야 : 차세대 반도체 소자구조, 신뢰성 모델링,
저전력센서 회로설계 및 고전력 파워 시스템 회로설계