

SiC 파워 디바이스란?

SiC(실리콘 카바이드)는 실리콘(Si)과 탄소(C)로 구성된 화합물 반도체 재료이다. 절연 파괴 전계 강도가 Si의 10배, 밴드갭이 Si의 3배로 매우 우수하며, 디바이스 제작에 필요한 P형, N형의 제어가 넓은 범위에서 가능하므로 Si의 한계를 뛰어넘는 파워 디바이스용 재료로서 기대를 모으고 있다. SiC에는 다양한 Polytype(다형성)이 존재하며, 각각 물성치가 다르다. 파워 디바이스용으로는 4H-SiC가 최적이다.

글/로움 코리아

SiC 재료의 물성과 특징

SiC(실리콘 카바이드)는 실리콘(Si)과 탄소(C)로 구성된 화합물 반도체 재료이다. 절연 파괴 전계 강도가 Si의 10배, 밴드갭이 Si의 3배로 매우 우수하며, 디바이스 제작에 필요한 P형, N형의 제어가 넓은 범위에서 가능하므로 Si의 한계를 뛰어넘는 파워 디바이스용 재료로서 기대를 모으고 있다. SiC에는 다양한 Polytype(다형성)이 존재하며, 각각 물성치가 다르다. 파워 디바이스용으로는 4H-SiC가 최적이다.

파워 디바이스로서의 특징

SiC는 절연 파괴 전계 강도가 Si에 비해 약 10배 높으므로, 600V~수천V의 고내압 파워 디바이스를 Si 디바이스에 비해 높은 불순물 농도 및 박막의 드리프트층에서 제작할 수 있다. 고내압 파워 디바이스의 저항 성분의 대부분은 이 드리프트층의 저항이므로, SiC에서는 단위 면적당 ON 저항이 매우 낮은 고내압 디바이스를 실현할 수 있다. 이론상 동일한 내압의 경우, Si에 비해 1/300로 면적당 드리프트층 저항을 저감할 수 있다.

Properties	Si	4H-SiC	GaAs	GaN
Crystal Structure	Diamond	Hexagonal	Zincblende	Hexagonal
Energy Gap: E_G (eV)	1.12	3.26	1.43	3.5
Electron Mobility: μ_n (cm^2/Vs)	1400	900	8500	1250
Hole Mobility: μ_p (cm^2)	600	100	400	200
Breakdown Field: E_B (V/cm) $\times 10^6$	0.3	3	0.4	3
Thermal Conductivity($\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$)	1.5	4.9	0.5	1.3
Saturation Drift Velocity: v_s (cm/s) $\times 10^7$	1	2.7	2	2.7
Relative Dielectric Constant: ϵ_s	11.8	9.7	12.8	9.5
p, n Control	○	○	○	△
Thermal Oxide	○	○	×	×

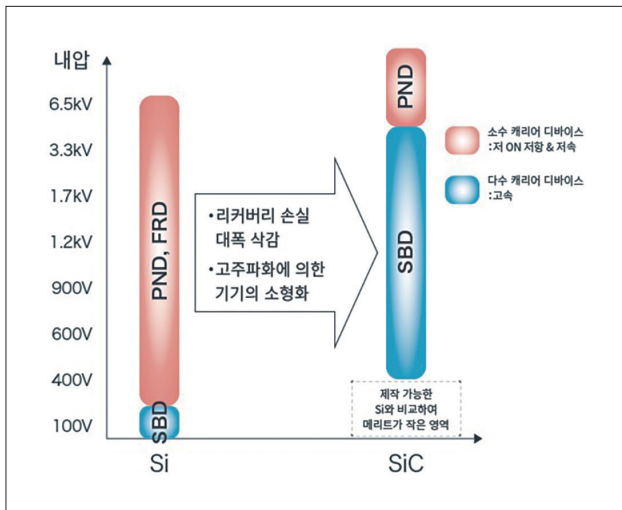
Si는 고내압화에 따른 ON 저항의 증대를 개선하기 위해 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor: 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터) 등의 소수 캐리어 디바이스(바이폴라 디바이스)가 주로 사용되었다.

SiC는 고속 디바이스 구조인 다수 캐리어 디바이스(쇼트키 배리어 다이오드 및 MOSFET)에서 고내압을 실현할 수 있으므로 고내압, 저 ON 저항, 고속을 동시에 실현할 수 있다. 또한, 밴드갭이 Si에 비해 약 3배 넓으므로, 고온에서도 동작 가능한 파워 디바이스를 실현할 수 있다.

SiC SBD 디바이스 구조와 특성

SiC는 고속 디바이스 구조인 SBD(쇼트키 배리어 다이오드) 구조로 600V 이상의 고내압 다이오드를 실현할 수 있다.(Si SBD는 200V정도까지) 따라서, 현재 주류를 이루고 있는 고속 PN 접합 다이오드(FRD: 패스트 리커버리 다이오드) 대신 사용함으로써 리커버리 손실을 대폭 삭감할 수 있다.

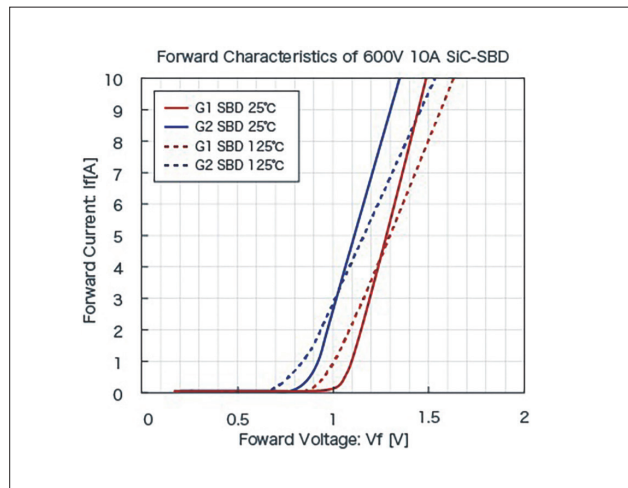
전원의 고효율화 및 고주파 구동에 의한 코일 등 수동 부품의 소형화, 노이즈 저감에 기여한다. 역률 개선 회로(PFC 회로) 및 정류 브릿지를 중심으로 에어컨, 전원, 태양광 발전 파워 컨디셔너, EV 급속 충전기 등에 응용이 확대되고 있다.



SiC-SBD의 순방향 특성

SiC-SBD의 turn-on 전압은 약 1V로 Si-FRD와 동등하다. Turn-on 전압은 쇼트키 장벽의 배리어 높이에 따라 결정되며, 통상적으로 배리어 높이를 낮게 설계하면 turn-on 전압은 낮아지는 반면, 역바이어스 시의 리크 전류가 증가한다는 트레이드 오프 관계에 있다.

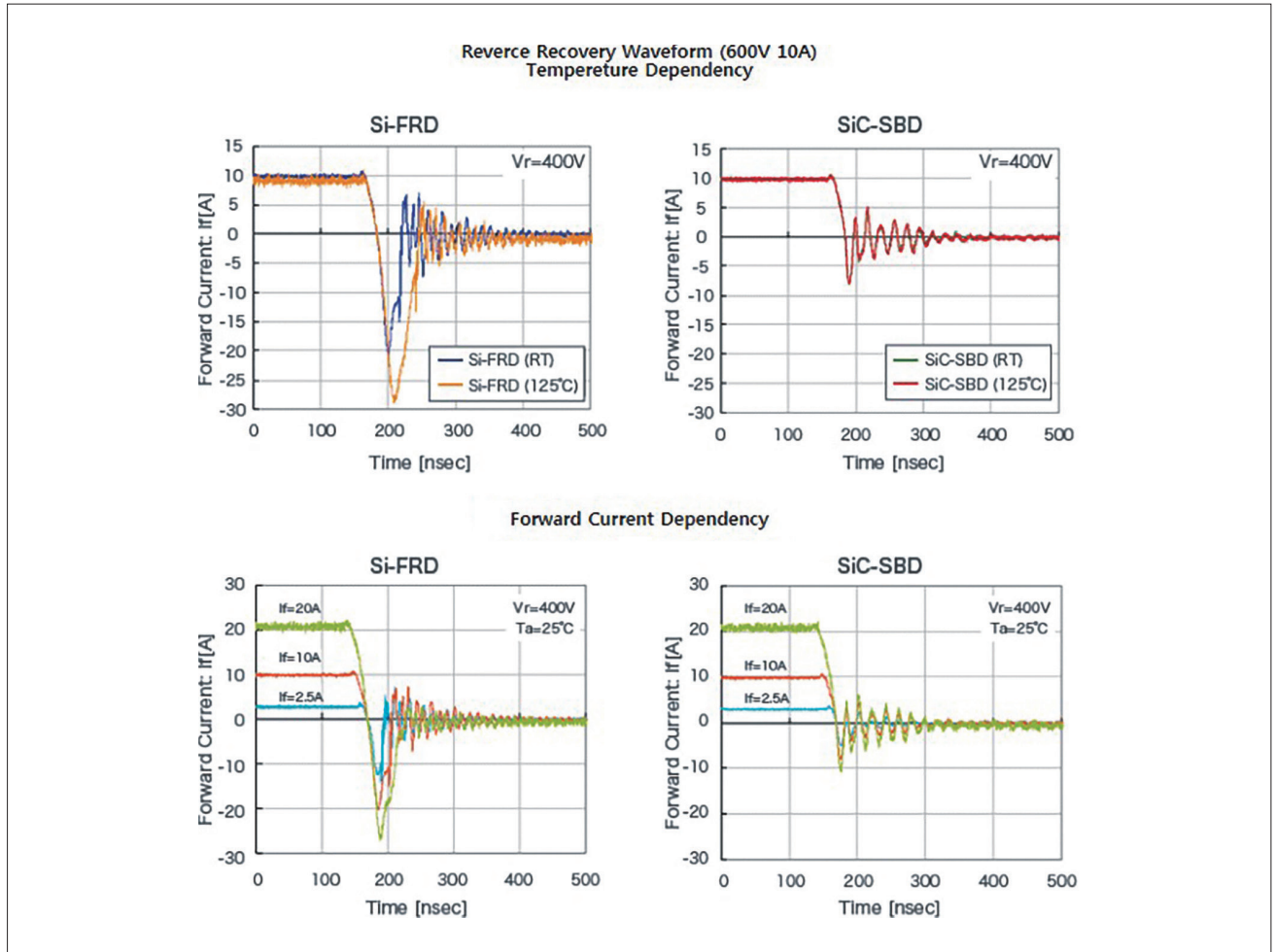
로옴의 제2세대 SBD는 프로세스를 고안함으로써, 리크 전류 및 리커버리 성능을 기존품과 동등하게 유지하면서 turn-on 전압을 약 0.15V 저감하는데 성공하였다. 온도의 존성은 Si-FRD와 달리, 고온일수록 동작 저항의 증가에 따라 Vf가 증가한다. 열폭주가 발생하기 어려운 경향이 있으므로 안심하고 병렬 접속으로 사용할 수 있다.



SiC-SBD의 리커버리 특성

Si의 고속 PN 다이오드(FRD : 패스트 리커버리 다이오드)는 순방향에서 역방향으로 전환되는 순간에 큰 과도 전류가 흘러, 이 기간에 역바이어스 상태로 이행함으로써 큰 손실을 발생시키게 된다.

이는 순방향 통전 시에 드리프트층 내에 축적된 소수 캐리어가 소멸되기까지의 기간(축적 시간) 전기 전도에 기여하기 때문이다. 순방향 전류가 클수록, 또한 온도가 높을수록 리커버리 시간 및 리커버리 전류가 커지므로 손실이 많아진다.



한편, SiC-SBD는 소수 캐리어를 전기 전도에 사용하지 않는 다수 캐리어 디바이스(유니폴라 디바이스)이므로 원리적으로 소수 캐리어의 축적이 발생하지 않다. 접합 용량을 방전할 정도의 작은 전류만 흐르므로 Si-FRD에 비해 손실을 대폭 삭감할 수 있다.

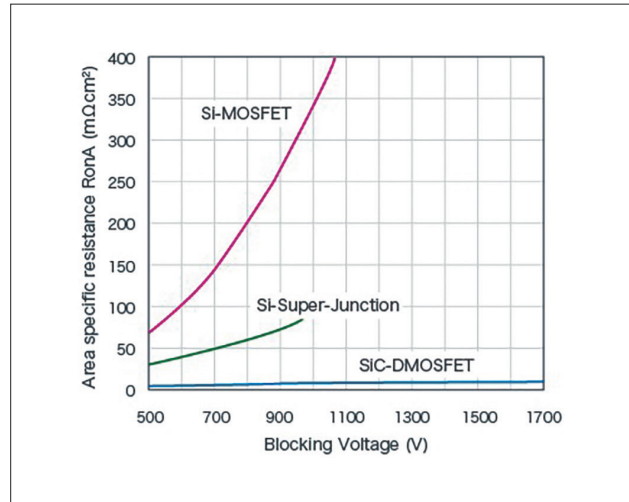
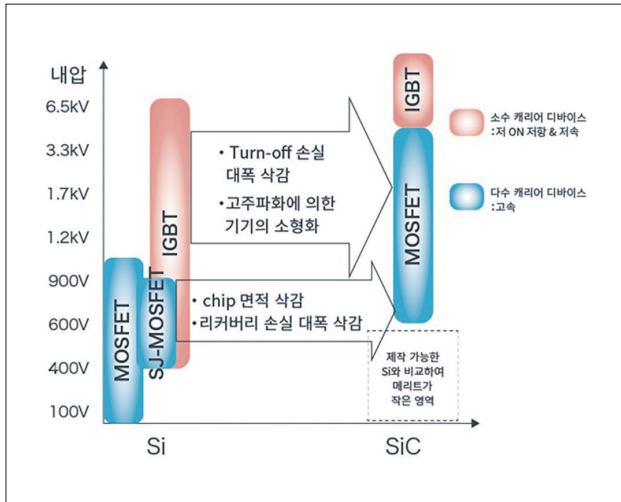
이러한 과도 전류는 온도 및 순방향 전류에 거의 의존하지 않으므로, 어떠한 환경에서도 안정된 고속 리커버리를 실현할 수 있다. 또한, 리커버리 전류에 기인하여 발생하는 노이즈 삭감도 기대할 수 있다.

SiC-MOSFET

Si는 고내압의 디바이스일수록 단위 면적당 ON 저항이

높아지므로(내압의 약 2~2.5승으로 증가), 600V 이상의 전압에서는 주로 IGBT(절연 게이트 바이폴라 트랜지스터)가 사용되었다. IGBT는 전도도 변조라고 하여, 소수 캐리어인 정공을 드리프트층내에 주입함으로써 MOSFET보다 ON 저항을 작게 하지만, 한편으로 소수 캐리어의 축적에 의해 turn-off 시 tail 전류가 발생하여 큰 스위칭 손실의 원인이 된다.

SiC는 드리프트층의 저항이 Si 디바이스보다 낮으므로, 전도도 변조를 사용할 필요가 없어, 고속 디바이스 구조인 MOSFET에서 고내압과 저저항을 동시에 실현할 수 있다. MOSFET은 원리적으로 tail 전류가 발생하지 않으므로, IGBT 대신 사용할 경우, 스위칭 손실의 대폭적인 삭감과 냉각기의 소형화를 실현할 수 있다.



또한, IGBT에서는 불가능한 고주파 구동이 가능하여 수동 부품의 소형화에도 기여한다. 600V~900V의 Si-MOSFET에 대해서도 chip 면적이 작다는 점(소형 패키지에 실장 가능)과 보디 다이오드의 리커버리 손실이 매우 작다는 점 등의 이점이 있다. 산업기기의 전원 및 고효율 파워 컨디셔너의 인버터·컨버터부 등에서 응용이 확대되고 있다.

규격화 ON 저항

SiC는 절연 파괴 전계 강도가 Si의 10배이므로 낮은 비저항, 박막의 드리프트층으로 높은 내압을 실현할 수 있다. 따라서, 동일한 내압일 경우, 규격화 ON 저항(단위 면적당 ON 저항)이 작은 디바이스가 가능하다. 예를 들어, 900V에서는 Si-MOSFET의 1/35, SJ-MOSFET의 1/10의 chip 사이즈로 동일한 ON 저항을 실현할 수 있다.

작은 패키지에서 저 ON 저항을 실현할 수 있을 뿐만 아니라, 게이트 전하량 Q_g , 용량 등도 작아진다. SJ-MOSFET는 900V 정도까지의 제품밖에 없지만, SiC는 1700V 이상의 내압도 낮은 ON 저항으로 실현할 수 있다. IGBT와 같은 바이폴라 디바이스 구조(ON 저항은 낮아지는 반면, 스위칭이 느다)를 사용할 필요가 없으므로 저 ON 저항, 고내압, 고속 스위칭을 모두 갖춘 디바이스가 가능하다.

SiC-MOSFET Vd-Id 특성

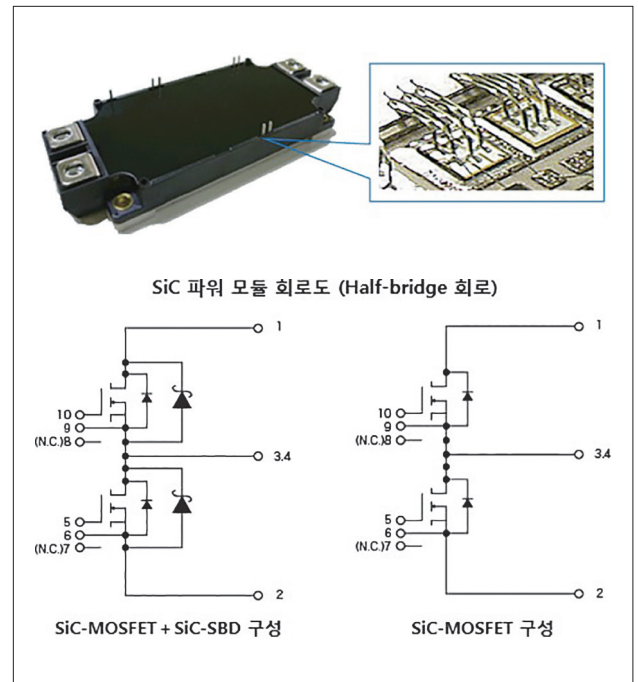
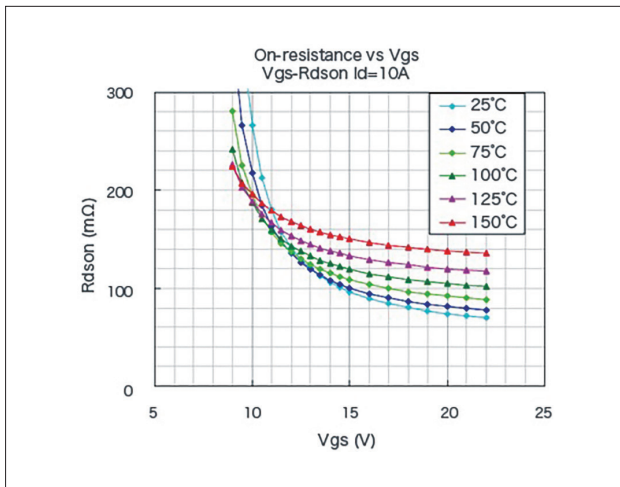
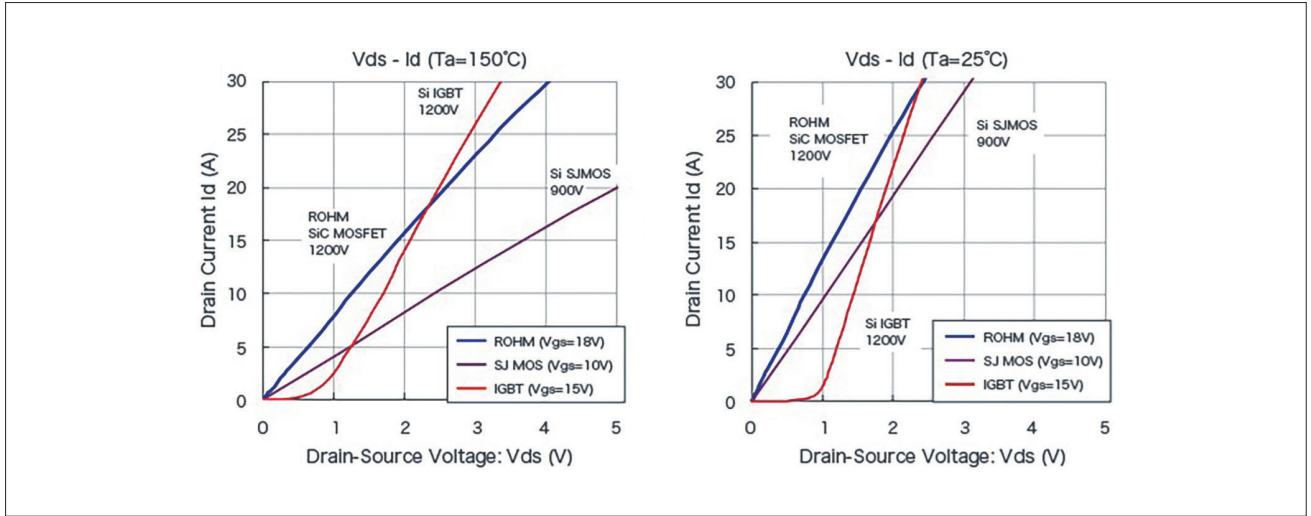
SiC-MOSFET는 IGBT와 같은 turn-on 전압이 없으므로 소전류에서 대전류까지 넓은 전류 영역에서 낮은 도통 손실을 달성할 수 있다. 또한, Si-MOSFET는 150°C에서 ON 저항이 실온의 2배 이상으로 상승하지만, SiC-MOSFET는 상승률이 비교적 낮으므로 열 설계가 용이하여 고온에서도 저 ON 저항을 실현할 수 있다.

구동 게이트 전압과 ON 저항

SiC-MOSFET는 드리프트층 저항이 Si-MOSFET보다 낮은 반면, 현재의 기술 레벨에서는 MOS 채널 부분의 이동도가 낮으므로 채널부의 저항이 Si 디바이스에 비해 높다. 따라서, 높은 게이트 전압일수록 낮은 ON 저항을 얻을 수 있다($V_{gs}=20V$ 이상에서 서서히 포화). 일반적인 IGBT 및 Si-MOSFET에서 사용되는 구동전압 $V_{gs}=10\sim15V$ 에서는 본래의 저 ON 저항 성능을 발휘할 수 없으므로, 충분한 저 ON 저항을 얻기 위해 $V_{gs}=18V$ 전후에서의 구동을 권장한다.

SiC 파워 모듈

대전류를 취급하는 파워 모듈에는 Si IGBT와 FRD를 조



합한 IGBT 모듈이 널리 사용되고 있다. 로옴은 세계에 앞서 SiC-MOSFET와 SiC-SBD를 탑재한 파워 모듈의 판매를 개시하였다. SiC 모듈을 사용함으로써 IGBT의 tail 전류와 FRD의 리커버리 전류에서 기인하여 발생하는 큰 스위칭 손실을 대폭 삭감할 수 있으므로,

- ① 스위칭 손실의 저감에 의한 전원 효율 개선 및 냉각기의 간소화

(예 : 히트싱크의 소형화, 냉수/강제공냉의 자연공냉화)

- ② 동작 주파수의 고주파화에 의한 주변부품의 소형화 (예 : 리액터 및 콘덴서 등의 소형화)

등의 효과를 얻을 수 있다. 산업기기의 전원 및 태양광 발전의 파워 컨디셔너 등에 응용이 확대되고 있다.

SiC 파워 모듈 회로 구성

현재 제품화되어 있는 SiC 파워 모듈은 1모듈로 Half-bridge 회로를 구성할 수 있는 2 in 1 타입이다. SiC MOSFET + SiC SBD 타입과 SiC MOSFET만으로 구성된 타입을 구비하고 있으므로, 용도에 따라 선택 가능하다. **SNU**