

SiC 다이오드를 이용한 전력변환회로

이 유 신, 오 덕 진, 김 희 준

한양대학교 전자전기제어계측 공학과, 한양대학교 전기공학과, 한양대학교 전자 컴퓨터공학부

Power Conversion Circuits using SiC Schottky Barrier Diode

Lee Yoo Shin, Oh Duk Jin, Kim Hee Jun

Dept. of E.E.C Eng., Dept. Electrical Eng., School of Electrical & Computer Science Eng. Har

Abstract - In this report, we firstly have investigated the electrical characteristics of silicon carbide (SiC) schottky barrier diode and compared the characteristics to those of conventional Si diode through simulation and experiment. Secondly we have investigated the influence of two kinds of diodes to the power conversion circuit of the systems. From the investigation results it is verified that SiC schottky barrier diode is more superior to Si diode in thermal and reverse recovery characteristics, which are the important factors in the size reduction and higher reliability of the systems. Finally though the experiment applied to PFC(Power Factor Correction) circuits, we precisely verified excellency to thermal characteristic of SiC schottky barrier diode any other diode.

자체의 특성을 잃지 않는다. 따라서 고온, 고전력 반도체 소자의 재료로 적당한 동시에 전력변환기의 소형화에 적당한 재료로 사료되며 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1]-[2]}. SiC가 갖고 있는 몇 가지 장점에 대해 알아보면 다음과 같다. 첫째, 강한 공유결합으로 Thermal stability가 우수하여 고온에서도 그 특성을 잃지 않고 안정된 동작이 가능하며, 둘째, Wide Bandgap (2.5 eV ~ 3.25 eV) 반도체로서 기존의 Si 반도체에 비해 Bandgap이 크므로 누설전류가 작아 다이오드의 역회복 특성이 우수한 반도체이다. 셋째, Breakdown field가 높아 breakdown field에 반비례하는 다이오드의 기생 저항 성분인 R_T 는 보통 Si를 사용한 반도체 보다 수 십배 이상 작다. 마지막으로 일반적으로 쇼트키 다이오드는 일반 다이오드와 비교해서 Minority Charge Storage의 영향이 무시할 수 있을 정도로 작아 turn-off 동작이 빠르고, 전이 구간동안 역전류가 작은 특성을 가지고 있다. SiC의 첨가 화합물에 대한 전기적 특성을 표 1에 나타내었다^[3]. 표 1에서와 같이 Bandgap은 SiC 화합물이 보통 반도체인 Si, GaAs보다 높으며 이로 인해 에너지 장벽이 높아 역회복을 결정하는 누설전류의 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 또한 반도체의 R_T 를 결정하는 Breakdown field 또한 SiC 화합물이 높으며, 전자의 이동도(Electron Mobility) 또한 Bandgap이 1.1 eV, 1.42 eV인 Si, GaAs보다 높다. 그리고 반도체 소자의 스위칭 속도를 결정하는 요소인 전자의 확산속도(Electron Drift Velocity)는 SiC 화합물이 더 빠른 속도를 나타내며, Thermal stability를 나타내는 Thermal Conductivity 또한 SiC 화합물이 더 우수한 특성을 나타낸다. 광대역 반도체 소자인 SiC는 Break Down Voltage가 1000V 이상인 점과 온도특성이 125°C 이상에서도 다른 소자들에 비해서 양호한 편임을 가장 큰 특징으로 삼고 있으며, 이처럼 Wide Bandgap 반도체로서 전기적 특성 및 온도 특성이 우수한 SiC Schottky Barrier Diode (SBD) 다이오드의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

1. 서 론

전력변환회로의 가장 대표적인 반도체 소자중 하나인 전력용 다이오드의 경우 그 반도체 재료는 거의 Si로 되어있다. Si의 재료로 제작된 전력용 다이오드에 있어서 온도 특성을 보면 접합온도가 100°C부터 특성저하가 일어나기 시작하여 150°C 부근에서는 거의 그 특성을 상실하고 있음을 알 수 있다. 따라서 대부분의 경우 이러한 특성저하를 방지하기 위하여 방열판을 사용하고 있으며 소형경량화를 위하여 방열판을 사용하지 않는 경우 전력변환회로의 신뢰성은 급격히 떨어지게 되며 나아가서는 기기 전체의 신뢰성에까지도 악영향을 미치게 된다. 이러한 반도체 소자의 온도특성과 관련하여 최근 Si와 같은 재료와는 달리 온도 특성이 매우 뛰어나고, 높은 Breakdown field를 갖는 SiC, diamond와 같은 반도체 재료에 대한 연구와 이러한 재료를 이용한 소자 개발이 활발히 진행되고 있다. Wide bandgap 소자인 SiC의 가장 큰 특징이라 할 수 있는 것은 항복전압이 1000V 이상이라는 점과 온도 특성이 125°C 이상에서도 다른 소자들에 비해 월등히 우수하다는 점이다. 따라서 본 논문에서는 이와같은 SiC 다이오드를 이용하여 다른 종류의 다이오드와 비교 Simulation을 실시하였으며 비교적 큰 역저지 전압이 요구되는 Power Factor Collection (PFC) 회로에 적용하여 제작 분석함으로써 온도변화에 따른 소자의 역회복특성의 우수성을 확인 하고자 하였으며 전력변환회로의 적용에 있어서 그 타당성을 입증 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 SiC 다이오드의 일반적 특성

SiC는 기본적으로 2.2eV의 Wide Bandgap 반도체로서 전기적 특성이 우수하며, Si와 C가 4족 원소로서 SiC는 강한 공유결합을 하고 있으므로 높은 온도에서도 그

표 1 SiC의 전기적 특성비교

	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC
Bandgap (eV)	1.1	1.42	3.0	3.2
Breakdown Field (MV/cm)	0.6	0.6	3.2	3
Electron Mobility (cm ² /V-s)	1100	600	370	800
Thermal Conductivity (W/m-K)	1.5	0.5	4.5	4.5
Hole Mobility (cm ² /V-s)	420	320	90	115
Electron Drift Velocity(cm/sec)	10'	10'	2*10'	2*10'

2.2 역회복 특성을 위한 시뮬레이션 및 실험 비교
다이오드의 역회복 특성은 다이오드의 turn-off시 다이오드에 축적되었던 전하에 의해 나타나는 실제 특성으로

써 다이오드의 전력변환회로의 응용에 있어서 분석이 요구되는 가장 기본적이고 중요한 특성중의 하나이다. 이러한 역회복 특성을 분석하기 위하여 그림 1의 회로를 구성하여 시뮬레이션을 통하여 각 다이오드별 그 특징을 비교 분석하였다.^[4]

2.2.1 시뮬레이션

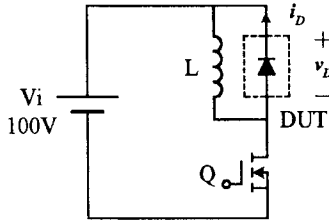


그림 1. 전력용 다이오드 역회복 특성 시뮬레이션 회로도

표 2. 적용된 다이오드

DUT	종류	제품명
	Ultra Fast Recovery Diode	UF4007
	Schottky Barrier Diode	10CTQ150
	SiC Schottky Barrier Diode	모의제작

각 반도체의 시뮬레이션 파라미터를 나타낸 표 3을 근거로 하여^[5] 시뮬레이션 하였으며 그림 1에서 인덕턴스는 $200\mu\text{H}$, 스위치 소자로는 IRF740($V_{DS}(\text{MAX}) = 400\text{V}$, $I_{DS}(\text{MAX}) = 10\text{A}$)를 사용하였고 스위칭 주파수는 250kHz 를 선택하였다. 또한 환류 다이오드인 DUT로는 Ultra Fast Recovery Diode (UFRD)와 Schottky Barrier Diode(SBD), SiC Schottky Barrier Diode (SBD)를 적용하여 각각의 경우에 대한 역회복 특성과 온도에 따른 역회복 특성을 시뮬레이션하여 그 결과를 그림 2에서부터 그림 7에 걸쳐 나타내었으며, 역회복 손실을 구하여 표 4에 나타내어 비교 분석 하였다.

표 2. 다이오드 시뮬레이션 파라미터

Name	Parameter	UFRD	SBD	SiC
IS [A]	Reverse saturation Current	$7.1\text{e-}11$	$5.9\text{e-}14$	$1.0\text{e-}11$
RS [Ω]	Ohmic(Parasitic) Resistance	0.13	0.013	0.0025
N	Emission Coefficient of IS	2	1.2	1.2
TT [sec]	Transit Time	$5.0\text{e-}8$	$2.0\text{e-}10$	$5.0\text{e-}12$
CJO [F]	Zero-bias Junction Capacitance	$2.65\text{e-}11$	$8.4\text{e-}10$	$2.0\text{e-}12$
VJ [V]	Junction(Contact) Potential	1.51	0.597	0.95
M	Junction Capacitancegrading exponent	0.55	0.644	0.5
EG [eV]	Energy gap	1.11	1.11	3.26
BV [V]	Reverse Breakdown Voltage	1000	150	900
IBV [A]	Current at Reverse Breakdown Voltage	0.9	0.003	0.9
FC	Forward-bias Depletion capacitive coefficient	0.5	0.5	0.5

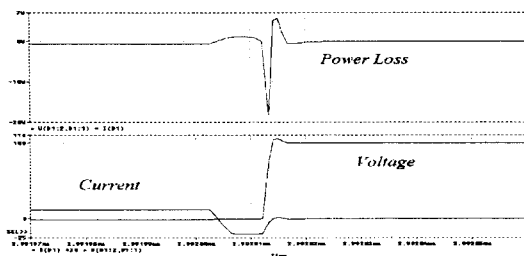


그림 2. 25°C에서 ①UFRD(UF4007)의 역회복 손실(위)과 역회복시의 전압,전류파형(아래)

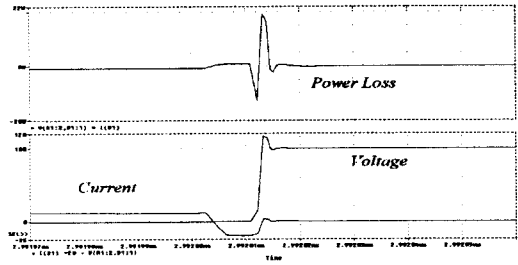


그림 3. 150°C에서 ①UFRD(UF4007)의 역회복 손실(위)과 역회복시의 전류전압 파형(아래)

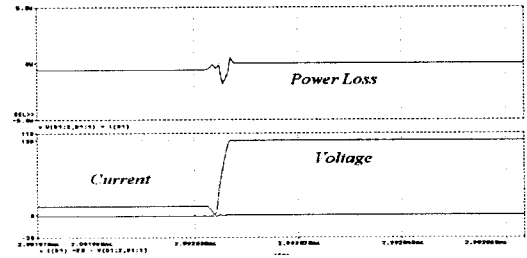


그림 4. 25°C에서 ②SBD(10CTQ150)의 역회복 손실(위)과 역회복시 전압, 전류파형(아래)

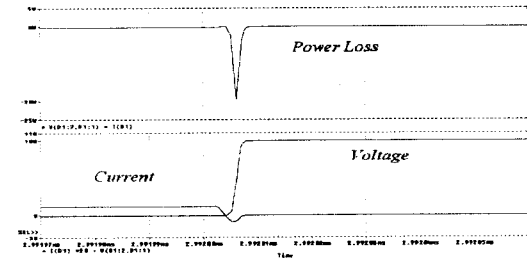


그림 5. 150°C에서 ②SBD(10CTQ150)의 역회복 손실(위)과 역회복시 전압, 전류파형(아래)

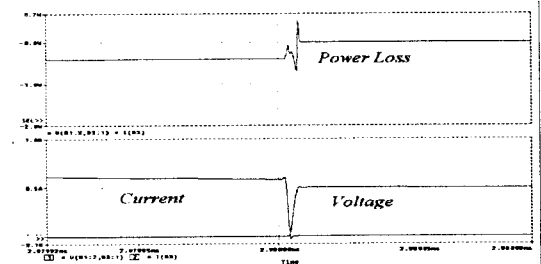


그림 6. 25°C에서 ③SiC SBD의 역회복 손실(위)과 역회복시 전압, 전류파형(아래)

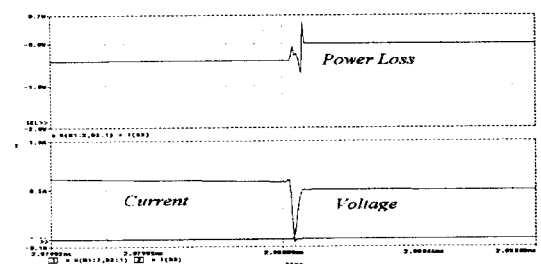


그림 7. 150°C에서 ③SiC SBD의 역회복 손실(위)과 역회복시 전압, 전류파형(아래)

시물레이션 결과를 통하여 다이오드의 turn-off 전이구간 동안 전류의 역회복 시간이 존재하며 이로 인하여 역회복 손실이 존재하는 것을 알 수 있었으며, 온도가 고온으로 증가함에 따라 다이오드의 특성이 저하된다는 것을 알 수 있었다. 또한 전류의 역회복 시간이 작고 온도의 변화에 따라 역회복 손실의 변화가 없는 SiC Schottky Barrier Diode의 역회복 특성이 다른 다이오드에 비해 우수하다는 것을 입증할 수 있었다.

표 4. 전력용 다이오드의 역회복특성에 의한 손실

다이오드 종류	역회복 손실	단위
Ultra Fast Recovery Diode(UF4007)	25°C	8.63
	150°C	49.2
Schottky Barrier Diode(10CTQ150)	25°C	1.85
	150°C	9.9
SiC Schottky Barrier Diode	25°C	0.45
	150°C	0.45

2.2.2 역회복 특성 실험

위의 절에서 수행한 시물레이션 결과를 입증하기 위하여 그림 1의 회로를 구성하여 실험 하였으며 DUT로는 시물레이션에서 이용한 다이오드를 그대로 사용하였다. 이에 대한 실험 결과를 그림 8과 그림 9에 나타내었으며, 이에 따른 역회복 손실을 구하여 표 5에 나타내었다.

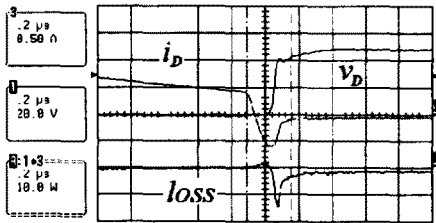


그림 8. UFRD(UF4007)의 전압,전류 파형(위) 및

역회복 손실(아래)

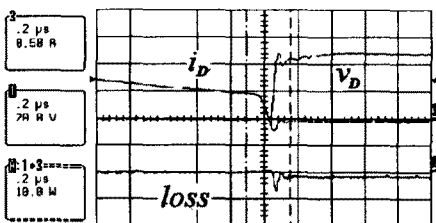


그림 9. SBD(10CTQ150)의 전압,전류 파형(위) 및 역회복 손실(아래)

그림 8과 그림 9는 실험을 통한 Ultra Fast Recovery Diode(UF4007)과 Schottky Barrier Diode(10CTQ150)의 turn-off 전이구간에서 전압과 전류의 역회복 특성에 의한 역회복 손실파형을 보여주고 있다. 실험결과에 의하면 앞절의 시물레이션에서와 마찬가지로 Schottky Barrier Diode의 경우가 역회복 특성뿐 아니라 역회복 손실면에서도 우수하다는 것을 입증할 수 있었다. 따라서 다음 절에서 기술될 Power Factor Correction (PFC) 회로에 적용되어지는 SiC Schottky Barrier Diode의 역회복 특성에 대해서 예상 되어질 수 있다.

표 5. 실험을 통한 다이오드의 전력손실 비교

다이오드 종류	전력손실	단위
Ultra Fast Recovery Diode (UF4007)	225	mW
Schottky Barrier Diode (10CTQ150)	75	mW

2.3 PFC(Power Factor Correction)회로의 적용

본 논문에서 이용될 SiC를 이용한 전력변환 회로구성은 불연속전류모드 역률 개선회로의 설계 예를 제시하는 것으로 한다. 주된 실험으로 온도변화에 따른 소자특성을 추출하였으며 이 결과를 기준에 실제로 이용되고 있는 Si계의 다이오드인 Fast Recovery Diode, Ultra Fast Recovery Diode의 특성과 비교함으로써 SiC 다이오드의 전력변환용용에의 타당성을 입증하고자 한다. PFC회로의 기본 동작은 Feedforward 제어에 의해 입력 전류의 파형을 입력전압의 파형에 추종하게끔 제어함으로써 입력 전류 파형을 정현파 형태로 해주어 역률을 개선하게끔 하는 것으로 PFC회로로는 인덕터 필터가 입력측에 있는 BOOST 컨버터가 주로 이용된다. BOOST 컨버터에 의한 PFC회로는 제어방식에 따라서 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 입력전류를 불연속 전류모드로 제어하는 방식으로 입력전류나 전압을 검출할 필요 없이 일정한 시비율로 스위치를 스위칭하면 입력전류의 피크값이 입력전압을 추종하게 되어 입력전류의 평균값이 그대로 정현파가 되기 때문에 제어가 매우 간단한 장점을 갖는다. 그러나 전류리플이 크고 필터링을 하더라도 전류 파형에 왜곡이 생겨서 완전한 정현파가 되지 못하는 단점을 갖는다. 이 방식을 100W급 이하의 소용량에 주로 응용되고 있다. 다른 하나는 입력전류를 연속 전류모드로 제어하는 방법으로서 입력전류가 정현파가 되도록 스위치의 시비율을 시간에 따라서 가변 제어하는 방식이다. 입력전류 및 전압을 검출하여 입력전류가 입력전압을 추종하는 제어루프를 두어야 하고 출력전압 Regulation을 위한 전압제어 루프를 두어야 하는 등 제어가 다소 복잡하나 UC3854와 같은 전용제어 칩이 개발되어 제어회로를 구성하는데 큰 어려움은 없으며, 주로 100W 이상의 용량에 응용된다. 본 실험에서는 TOP-Switch를 이용한 60W급의 불연속 전류모드로 실험을 하였으며 그림 10은 불연속 전류모드에 해당하는 간략화 된 회로도를 나타내며 표 6은 설계사양을 나타낸다.

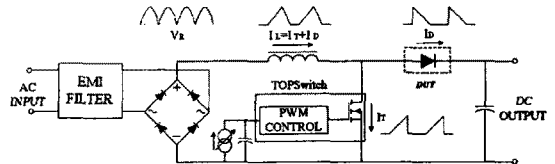


그림 10. 전류 불연속 모드에 의한 역률개선 회로

표 6. 설계사양

입력전압(V_i)	220 Vac
출력전압(V_o)	400 Vdc
출력전류(I_o)	0.25 A
동작 주파수(f_s)	100 KHz
출력전력(P_o)	60 W

그림 11과 그림 12는 60W급인 역률 개선회로를 제작하여 측정된 실험 측정파형을 나타내고 있으며 결과 파형에서도 알 수 있듯이 입력전류가 입력전압의 파형에 잘 추종이 되고있음을 알 수 있다.

3. 결 론

이상에서와 같이 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 SiC Schottky Barrier Diode의 온도에 대응한 특성을 다른 다이오드와 비교하여 분석함으로써 전력변환회로에 그 적용성에 대한 가능성을 예측 하였다. 또한 비교적 큰 역저지 전압과 온도특성이 요구되는 역률개선회로: Power Factor Correction(PFC) 회로를 직접 제작, 적으로써 다른 다이오드와는 달리 상온에 해당하는 25°C에서는 물론 125°C에 해당하는 온도에서도 그 특성을 잃지 않는 온도변화에 따른 소자의 뛰어난 우수성을 확인 하였으며 전력변환회로의 적용에 대한 그 타당성을 입증 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ravi K Chilukuri and B. Jayant Baliga, "High Voltage Ni/4H SiC Schottky Rectifiers", ISPSD '99. Proceedings., The 11th International Symposium on , 1999, 161 -164
- [2] Akira Itoh, Tsunenobu Kimoto, "High Performance of High-Voltage 4H-SiC Schottky Barrier Diode ", IEEE Electron Device Letters, vol. 16, No. 6, 1995
- [3] Philip G. Neudeck, "Progress in Silicon Carbide Semiconductor Electronics Technology", Journal of Electronic Materials, vol. 24, No.4, 1995
- [4] 김희준 저, "스위치 모드 파워 서플라이" 성안당
- [5] MOTORORA "Rectifier application handbook", third Edition

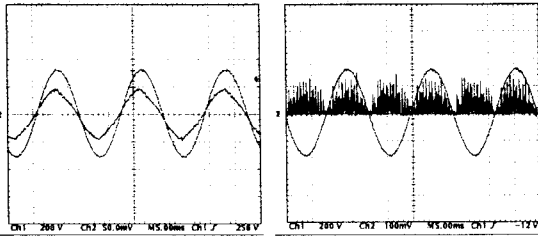


그림 11. 입력전압 및 인덕터 전류 $V_1(200V/Div)$, $I_1(0.25A/Div)$ 그림 12. 입력전압 및 입력전류 $V_1(200V/Div)$, $I_1(0.25A/Div)$

비교특성 실험을 하기위한 다이오드로는 본 회로 정격에 만족한 FES8JT(FRD)와 UF5406(UFRD)그리고 Infineon사의 SBD06S60(SiC SBD)를 각각 사용하여 온도변화에 따른 소자의 역회복 특성을 파악함으로써 SiC 다이오드의 전력변환회로에 적용성에 있어서 그 타당성을 입증하고자 한다.

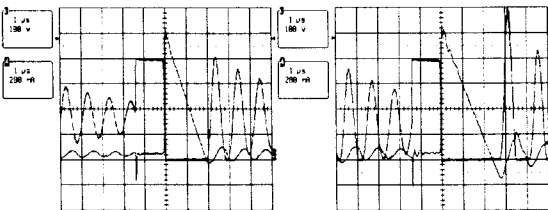


그림 13. 25°C(좌) 125°C(우)에서의 60W급 PFC에 적용한 FRD의 역회복 특성

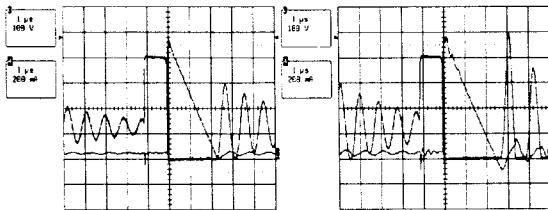


그림 14. 25°C(좌) 125°C(우)에서의 60W급 PFC에 적용한 UFRD의 역회복 특성

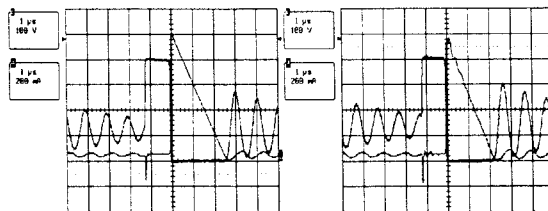


그림 15. 25°C(좌) 125°C(우)에서의 60W급 PFC에 적용한 SiC-SBD의 역회복 특성

위에 보이는 그림 13과 그림 14 그리고 그림 15는 측정된 소자의 외부온도가 각각 25°C, 125°C에서 실험한 Fast Recovery Diode와 Ultra Fast Recovery Diode 그리고 SiC Schottky Barrier Diode의 전압과 전류파형을 각각 나타낸다. 다이오드의 전압이 역방향으로 바뀌면서 나타나는 역회복의 특성이 그림 15에서는 예상과 같이 Turn-off시 일반온도와 125°C의 온도에서도 거의 같은 형태의 파형을 나타내어 다른 다이오드와는 차별화된 SiC-Schottky Barrier Diode의 매우 뛰어난 온도특성을 입증하였다.