

SiC パワーデバイスの特性評価 (第2報)

牧野 友昭^{*} 長井 聡^{**}

Performance Evaluations of SiC Power Device(2nd Report)

Tomoaki MAKINO^{*} and Satoshi NAGAI^{**}

In recent years, next generation SiC(Silicon Carbide) power devices became to be in practical use. Last year, the authors evaluated the switching losses in basic experimental circuit and proposed the most suitable applications of SiC-SBD(Shottkey Barrier Diode). In this study, the authors evaluated SiC-SBD with IGBTs in practical inverter circuit. From the experimental results, switching losses of this inverter is lowered sufficiently over 100kHz frequency range.

Keywords : SiC-SBD, Switching Loss, IGBT, Power MOSFET, Resonant Inverter

1. はじめに

近年、次世代パワーデバイスの候補の1つとしてSiC(炭化ケイ素)デバイスに注目が集まっている。この中で、SiCショットキバリアダイオード(SiC-SBD)が先に実用化され¹⁾、普及が始まった。本論文では、昨年度²⁾に続きSiC-SBDの特性評価を行い、その最適応用について検証を行っている。

2. SiC-SBDの特性

各種半導体材料の特性³⁾をTable1に示す。SiCはSiに比べバンドギャップが広いため、高耐圧・高速・高温動作が可能となり、機器の小型化・高効率化が期待される。

Table1 Specifications of Semiconductor Materials

	Si	GaAs	SiC(6H)	SiC(4H)
バンドギャップ(eV)	1.12	1.43	2.86	3.02
電子移動度(cm ² /Vs)	1500	8500	460	700
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	0.4	3	3.5
電子飽和速度(×10 ⁷ cm/s)	1	2	2	2.7
熱伝導率(W/cm・°C)	1.51	0.54	4.9	4.9
性能指数	1	2.54	1298	3220

原稿受付 平成18年8月17日

^{*} 平成17年度電気工学科卒業(現在NECフィールドイング(株))

^{**} 電気電子工学科

現在商品化されているスイッチング用パワーダイオードには通常のPN接合Siダイオードの他、Si-SBD、GaAs-SBDなどがある。これらのうち、Si-SBDは耐圧が100V程度しかなく、用途が限られている。GaAs-SBD⁴⁾はSi-SBDより高耐圧品があるものの、PN接合Siダイオードには及ばず大容量品がないため普及していない。

SiC-SBDはこれらのデバイスと比較して、高耐圧・逆方向漏れ電流が少ない・200°C以上の高温で動作可能・温度係数が正なので熱暴走がない・逆回復電荷量が少ない、など多くの特徴を持っている。欠点として、電流サージ耐量が小さい・コストが高いなどがあるが、第2世代の製品が市販され改善されつつある。

3. スwitching損失の測定

測定方法は昨年度と同様であるが、5.のインバータ回路における評価を考慮し、スイッチングデバイスをIGBTに変更し、被測定ダイオードも一部変更した。メーカー・型番は以下の通りである。

・SiC-SBD

Infineon Technologies 製 SDT10S30

・Si-SBD

International Rectifier 製 MBR20100CT

・Si PN接合FRD(Fast Recovery Diode)

International Rectifier 製 60EPU04

Table2に上記ダイオードの主な特性を示す⁵⁾⁻⁷⁾。ここで、

V_{RM} : 逆耐圧

I_F : 最大順電流

t_{rr} : 逆回復時間

Q_{rr} : 逆回復電荷

である。

Fig.1 にスイッチング損失の測定回路を，測定時の電圧・電流波形の概略を Fig.2 に示す．ダイオー

Table2 Specifications of Diodes

	$V_{RM}(V)$	$I_F(A)$	$t_{rr}(ns)$	$Q_{rr}(nC)$
SDT10S30	300	10	-	23
MBR20100	100	10	-	-
60EPU04	400	60	50	375

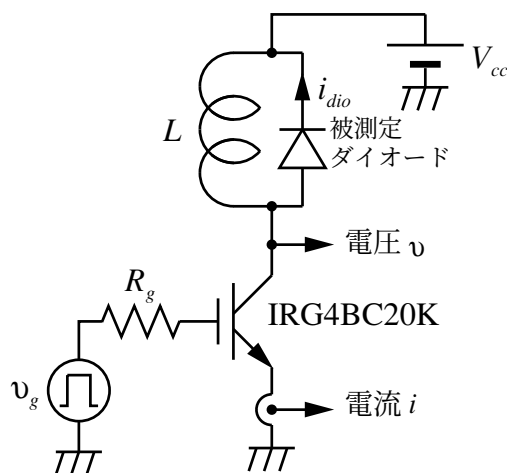


Fig. 1 Measurement Circuit Diagram

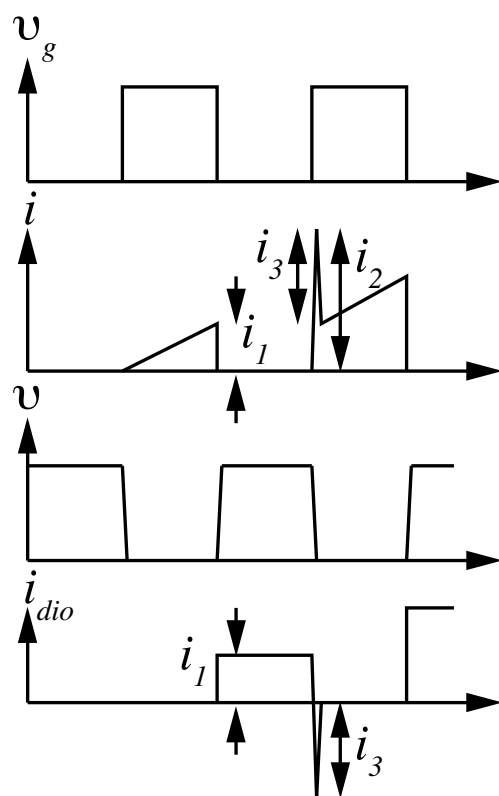


Fig. 2 Voltage and Current Waveforms of Measurement Circuit

ドのリカバリによる電流が i_3 で，この期間は十分短いためインダクタ電流は一定値 i_1 であるとする。 i_2 から i_1 を減算すれば i_3 が求められる。 i_3 と電圧波形 v の積を時間積分すればスイッチング損失が求められる。

4. 各種ダイオードの損失測定結果

Table3 に電源電圧 $V_{CC} = 100V$ の時のスイッチング損失の測定結果を示す。この結果より，SiC-SBD は Si-SBD と比較しても損失が 1/2 以下と非常に少ないことが分かる。よって SiC-SBD を使用することにより Si-FRD 並みの耐圧を持ちながらスイッチング損失を Si-SBD 以下に減少できることが期待できる。

Table3 Measured Switching Losses (J) ($V_{CC}=100V$)

SDT10S30	MBR20100CT	60EPU04
5.916×10^{-7}	1.489×10^{-6}	9.407×10^{-6}

5. インバータ回路による特性評価

第1報で報告した通り SiC ダイオードの最適応用法として，IGBT と組み合わせて電流進み位相で動作させることが考えられる。ここでは，直列共振 SEPP(Single Ended Push Pull) インバータ回路においてパワー MOSFET を使用した場合との比較により有効性を検証する。

Fig. 3 に測定に使用したインバータ回路を示す。

回路定数及び使用したデバイスは下記の通りである。

・回路定数

$R = 12.5\Omega$ (セメント抵抗), $L = 100\mu H$ (ドラムコア使用), $C = 0.0188\mu F$ (フィルムコンデンサ), 共振周波数約 120kHz

・パワー MOSFET

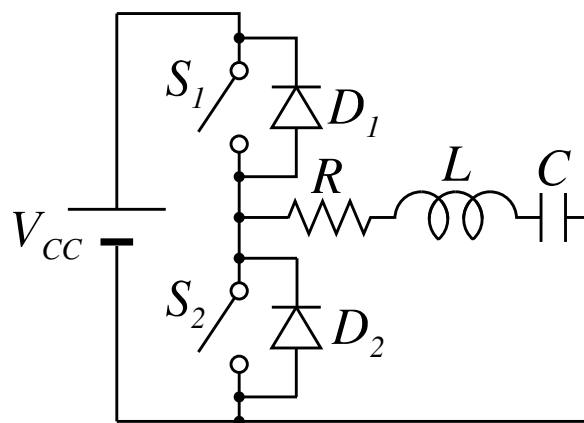


Fig. 3 Series Resonant SEPP Inverter Circuit

東芝製 2Sk2996⁸⁾, 最大定格 600V10A, オン抵抗 0.74Ω

・IGBT

International Rectifier 製 IRG4BC30F⁹⁾, 最大定格 600V31A, $V_{CE(ON)} = 1.99V$

Fig. 4-1, 4-2 にパワー MOSFET を使用したインバータの S_2 , D_2 電圧・電流波形を示す. なお, このインバータでは D_1 , D_2 にパワー MOSFET のボディダイオードを使用した. インバータ周波数は 130kHz で, 直流入力は 100V, 0.89A である. この動作条件では電流遅れ位相となり, 原理的にターンオン損失は発生しないものの, ターンオフ損失はパワー MOSFET の特性に依存する. 次に, Fig. 5-1, 5-2 に SiC ダイオードと IGBT を使用したインバータの S_2 , D_2 電圧・電流波形を示す. インバータ周波数は 110kHz で, 直流入力は 100V, 0.89A である. この動作条件では電流進み位相となり, ターンオフ損失は発生しないものの, ターンオン時にダイオードのリカバリ電流により損失が発生する.

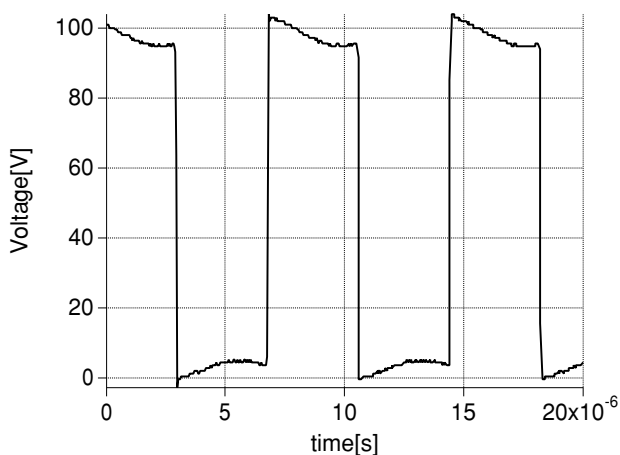


Fig. 4-1 Voltage Waveforms of Power MOSFET Inverter

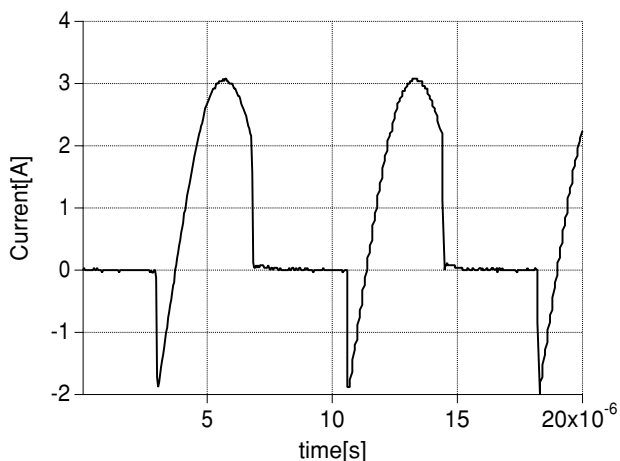


Fig. 4-2 Current Waveforms of Power MOSFET Inverter

Fig. 6 にはパワー MOSFET のターンオフ時の拡大波形を示す. 測定条件は電源電圧 100V, 周波数 130kHz である. この波形の電流がゼロクロスする点までの電圧・電流の積和演算を行い, ターンオフ損失を求める.

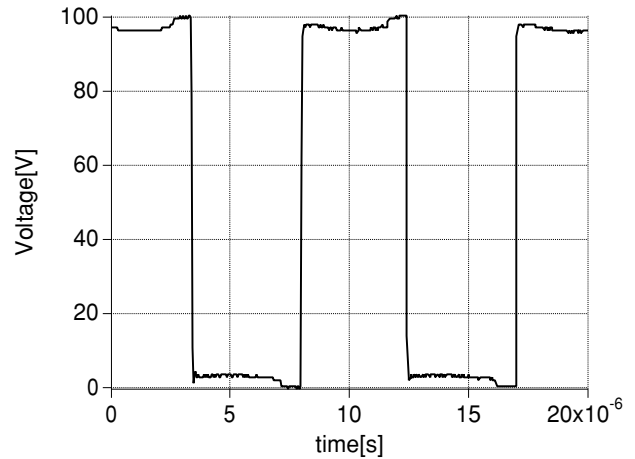


Fig. 5-1 Voltage Waveforms of SiC Diode + IGBT Inverter

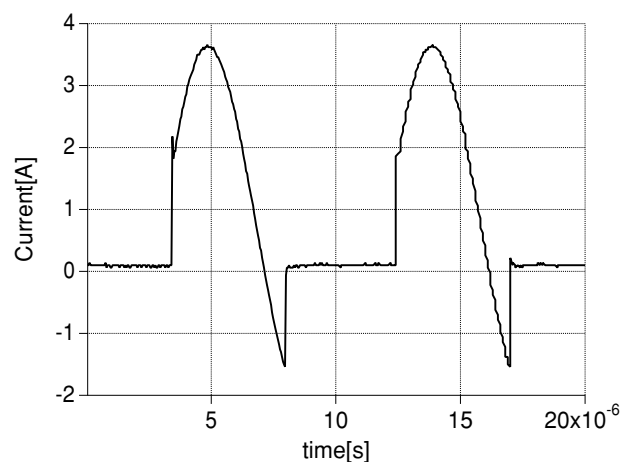


Fig. 5-2 Current Waveforms of SiC Diode + IGBT Inverter

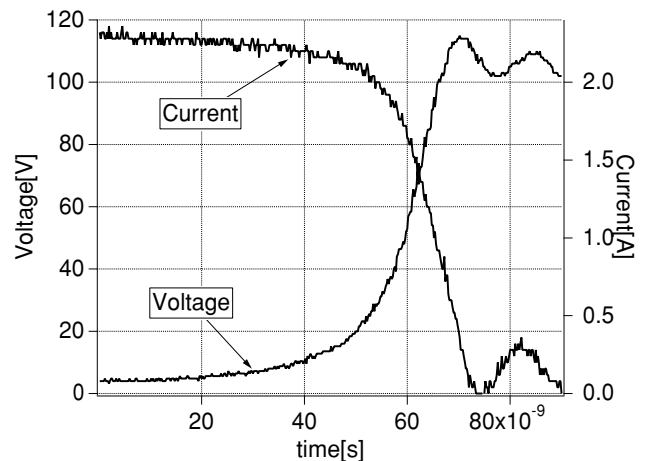


Fig. 6 Turn-off Waveforms of Power MOSFET

Fig. 7 には IGBT のターンオン時の拡大波形を示す。測定条件は電源電圧 100V, 周波数 110kHz である。この波形の電流立ち上がりから電圧がゼロクロスする点までの電圧・電流の積和演算を行いターンオン損失を求める。

Table4 はパワー MOSFET を使用したインバータにおいて周波数 130kHz 一定とし、電源電圧を変化させた場合のターンオフ損失の測定値を示す。この表より、ターンオフ損失の絶対値は十分小さく、電圧の 2 乗に比例して増加することが分かる。

Table5 は SiC ダイオードと IGBT を使用したインバータにおいて周波数 110kHz 一定とし、電源電圧を変化させた場合のターンオン損失の測定値を示す。この表より、ターンオフ損失の絶対値はパワー

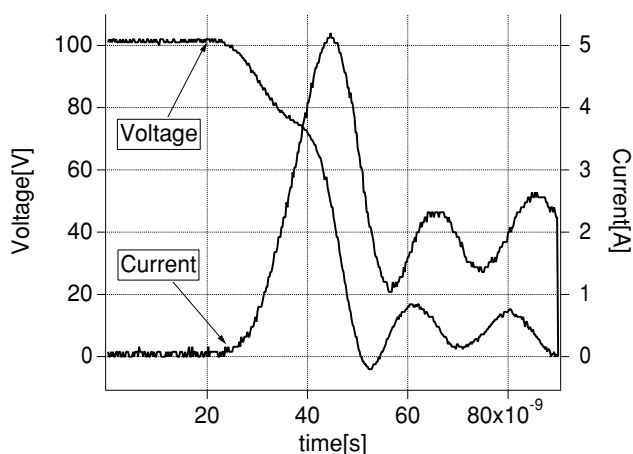


Fig. 7 Turn-on Waveforms of IGBT

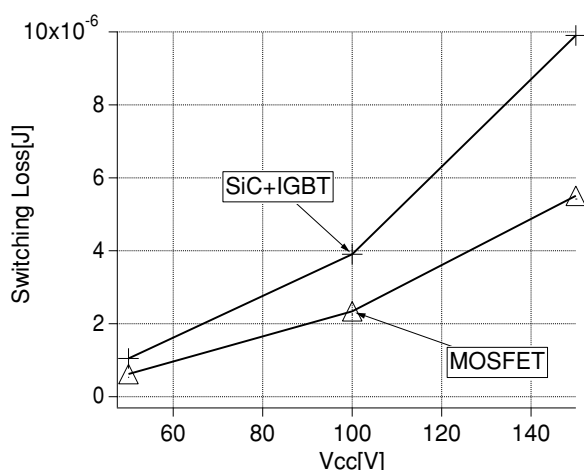


Fig. 8 Measured Switching Loss

Table4 Measured Turn-off Losses of MOSFET

DC Voltage[V]	DC Current[A]	Switching Loss[J]
50	0.45	6.199×10^{-7}
100	0.85	2.341×10^{-6}
150	1.22	5.509×10^{-6}

Table5 Measured Turn-on Losses of SiC+IGBT

DC Voltage[V]	DC Current[A]	Switching Loss[J]
50	0.45	1.050×10^{-6}
100	0.85	3.905×10^{-6}
150	1.33	9.902×10^{-6}

MOSFET には及ばないものの十分小さく、電圧の 2 乗に比例して増加することが分かる。

Fig. 8 は Table4, Table5 のスイッチング損失のデータをグラフにしたものである。

6. 結果の評価

5. の測定結果より、100kHz を超える周波数においても IGBT が低損失で動作可能であることが明らかとなった。これは、電流進み位相で動作させたことにより IGBT のテイル電流による損失発生がほぼ 0 となったことに加え、SiC ダイオードによりリカバリ損失が大幅に削減できたことによる。これらの結果、IGBT の動作可能周波数の大幅な引き上げが可能となり、より低損失・高電力密度の電源システムの実現が期待される。

参 考 文 献

- 1) "thinQ!™ Silicon Carbide Schottky Diodes: An SMPS Circuit Designer's Dream Comes True!", Christian Miesner, Roland Rupp, Holger Kapels, Michael Krach and Ilia Zverev
- 2) 山本祐輝, 長井聡: SiC パワーデバイスの特性評価, 津山工業高等専門学校紀要第 47 号, pp.27-30, 2005
- 3) 財団法人 新機能素子研究開発協会ホームページ, http://www.fed.or.jp/project/sic/pro_sic06.htm
- 4) IXIS 社ホームページ, <http://www.ixys.com/Appasp/pdpgsd01.asp>
- 5) SDT10S30 Datasheet, infenion Technologies
- 6) MBR20100CT Datasheet, International Rectifier
- 7) 60EPU04 Datasheet, International Rectifier
- 8) 2SK2996 データシート, 東芝
- 9) IRG4BC30F データシート, International Rectifier