

## SiC MOSFET と Si IGBT の損失比較

### 概要

本資料は、東芝 SiC MOSFET の TW070J120B と Si IGBT のスイッチング損失、導通損失、ダイオード損失、損失シミュレーションの比較結果を紹介します。

## 目次

概要 .....	1
目次 .....	2
1. SiC パワーデバイス .....	4
2. SiC MOSFET の特徴 .....	5
3. SiC MOSFET と Si IGBT との損失比較 .....	6
3.1 ターンオン、ターンオフスイッチング損失の $R_g$ 依存 <sup>(注1)</sup> .....	6
3.2 ターンオンスイッチング動作波形とターンオンスイッチング損失 <sup>(注2)</sup> .....	7
3.3 ターンオフスイッチング動作波形とターンオフスイッチング損失 <sup>(注3)</sup> .....	8
3.4 オン抵抗特性 .....	9
3.5 ダイオード順電圧特性 .....	9
4. 損失シミュレーション .....	10
製品取り扱い上のお願い .....	11

## 図目次

図 1-1 二重拡散型 MOSFET 構造図.....	4
図 3-1 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオンスイッチング損失の Rg 依存.....	6
図 3-2 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオフスイッチング損失の Rg 依存.....	6
図 3-3 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオンスイッチング波形.....	7
図 3-4 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオンスイッチング損失.....	7
図 3-5 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオフスイッチング波形.....	8
図 3-6 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオフスイッチング損失.....	8
図 3-7 SiC MOSFET $I_D - V_{DS}$ カーブと Si IGBT $I_C - V_{CE}$ カーブ.....	9
図 3-8 SiC MOSFET $I_F - V_F$ カーブと Si IGBT $I_F - V_F$ カーブ.....	9
図 4-1 SiC MOSFET と Si IGBT 損失シミュレーション.....	10

## 表目次

表 1-1 代表的な半導体材料の物性定数.....	4
表 1-2 Si 二重拡散型 MOSFET オン抵抗内訳 (シミュレーション値) .....	4

### 1. SiC パワーデバイス

炭化ケイ素 (SiC) は、シリコン (Si) と炭素 (C) 原子から構成され、各原子の周りを異なる 4 個の原子が正四面体で配置された構造をしており、その四面体が最も密になる配置をとった最密充填構造の化合物半導体材料です。積層方向の正四面体の重なり方の周期的な違いから多数の結晶多形 (ポリタイプ) が存在し、それぞれの物性値が異なります。SiC は Si と比較して価電子帯 (価電子により満たされた領域) と伝導帯 (電子が存在できるが空の領域) の間の電子が存在しない禁制帯のエネルギー幅 (バンドギャップ) が大きい材料です。バンドギャップが大きいということは原子間の化学結合が強固であるということであり、そのため、絶縁破壊電界強度が高くなります。Si と比較すると約 10 倍程度の絶縁破壊電界強度を持っています。また、結合が強固なため格子振動しやすくエネルギーが伝わりやすいので、熱伝導も良好な半導体材料になります。SiC の結晶構造には六方晶の 4H-SiC、6H-SiC および立方晶の 3C-SiC などがあります。以下の表 1-1 に Si および他半導体材料との物性定数の比較を示します。SiC の結晶多型のうち電子移動度・絶縁破壊電界強度・飽和速度などの物性定数のバランスの良い 4H-SiC が半導体材料としてよく使われています。

表 1-1 代表的な半導体材料の物性定数

項目	単位	Si	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	GaN	GaAs	ダイヤモンド
バンドギャップ	eV	1.12	3.26	3.02	2.23	3.39	1.43	5.47
電子移動度 $\mu_e$	cm <sup>2</sup> /Vs	1400	1000/1200	450/100	1000	900	8500	2200
正孔移動度 $\mu_h$		600	120	100	50	150	400	1600
絶縁破壊電界強度 $E_c$	V/cm	$3.0 \times 10^5$	$2.8 \times 10^6$	$3.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^6$	$3.3 \times 10^6$	$4.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^7$
熱伝導度 $\lambda$	W/cmK	1.5	4.9	4.9	4.9	2.0	0.5	20
飽和速度 $V_{sat}$	cm/s	$1.0 \times 10^7$	$2.2 \times 10^7$	$1.9 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$
誘電率 $\epsilon$		11.8	9.7/10.2	9.7/10.2	9.7	9.0	12.8	5.5

表 1-2 に示すように、高耐圧パワーデバイスの単位面積当たりのオン抵抗のほとんどは、ドリフト層の抵抗で占められています。オン抵抗を低減するためには、このドリフト層の不純物濃度を上げるか、ドリフト層を薄く (距離を短く) する必要があります。しかしながら、不純物濃度と耐圧は反比例の関係にあり、絶縁破壊強度が低い Si では所望の耐圧を維持しつつ、これ以上不純物濃度を上げることができません。また、ドレイン-ソース間に電圧を印加した時、逆バイアス状態のボディダイオードの空乏層が伸びることによりパンチスルーする可能性があることからドリフト層の薄化も困難でした。表 1-1 に示していますが、4H-SiC の絶縁破壊電界強度は Si の 10 倍近くあります。これにより、従来の性能をブレイクスルーした製品が出てきています。例えば、MOSFET の耐圧は、下式のように簡略化して表すことができます。

$$\text{耐圧} = \text{絶縁破壊電界強度} \times \text{空乏層の厚さ} / 2 \quad (\text{三角形の電界分布を想定})$$

従って、同じ耐圧であれば Si に比べ絶縁破壊電界強度が高い SiC は、ドリフト層の濃度を高くし厚さを薄くできます。移動度  $\mu$  は電子やホールが電界で加速された場合の速度 (速度 = 移動度  $\mu \times$  電界  $E$ ) の上がりやすさを示したもので、移動度  $\mu$  が大きいほど電流が流れやすくなり、抵抗が小さくなります。その速度の限界が飽和速度です。

表 1-2 Si 二重拡散型 MOSFET オン抵抗内訳 (シミュレーション値)

耐圧系	600V	1000V
$R_{ch}$	1%	0.3%
$R_{JFET}$	18%	14%
$R_{drift}$	81%	86%
$R_{sub}$	0.1%	0.03%
TTL	100%	100%

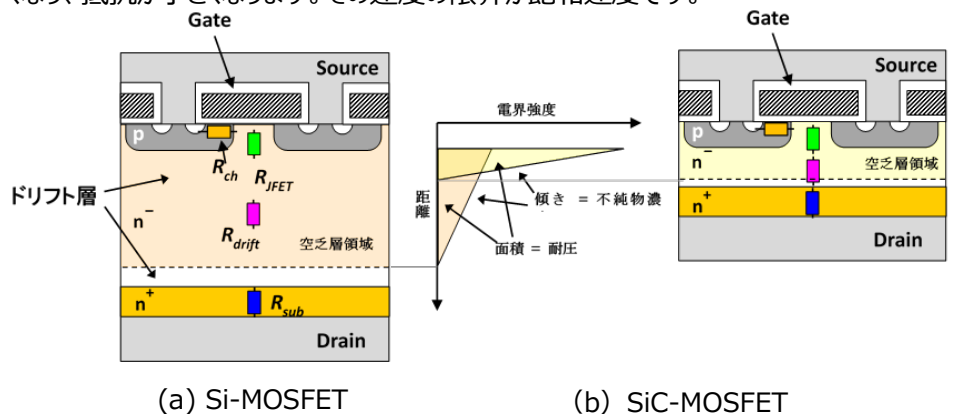


図 1-1 二重拡散型 MOSFET 構造図

また、SiCは熱伝導度も優れているためパワーデバイス用途にとっては最適なデバイスと言えます。

このように、SiCをパワーデバイスに適応した場合、図 1-1 (b) に示すように高い不純物濃度で薄いドリフト層が実現でき、画期的な低オン抵抗の高耐圧パワーデバイスを実現できます。

## 2. SiC MOSFET の特徴

SiCの絶縁破壊強度はSiの約10倍であるため高耐圧で通電時の電圧降下の低いパワーデバイスを実現することができ、同耐圧の場合は、Siと比較し単位面積当たりのオン抵抗を下げるすることができます。また、一般的にSi MOSFETは1000V程度までしか製品化されていないのに対して、SiC MOSFETは、高耐圧でもオン抵抗を抑えることができるため3300V程度まで製品化されています。Siで1000V以上の高耐圧トランジスタは、バイポーラデバイスであるIGBTが一般的に使用されています。IGBTは、少数キャリアである正孔をドリフト層に注入することによって電子と正孔の2種類のキャリアでバイポーラ動作を発生しドリフト層内の抵抗を下げるすることができます。しかしながらバイポーラ動作のデメリットとしては、少数キャリアである正孔の蓄積によってターオフ時にテール電流が発生しターンオフ損失が大きくなることがあります。

一方でSiCは、高耐圧品でも電子のみで動作するユニポーラデバイスのMOSFETを実現することができ、テール電流が発生しないためバイポーラデバイスに対してターンオフ損失が小さくなります。そのため、SiC MOSFETは、Si IGBTでは困難であった高周波領域での動作が可能であり、受動部品の小型化にも貢献するなど大きなメリットがあり注目を集めています。

この報告では、SiC MOSFETとSi IGBTのスイッチング損失、導通損失、ダイオード損失の比較を実施し、損失シミュレーションの実施例を紹介します。

### 3. SiC MOSFET と Si IGBT との損失比較

#### 3.1 ターンオン、ターンオフスイッチング損失の $R_g$ 依存 (注1)

ターンオン、ターンオフスイッチング損失ともに、SiC MOSFET (TW070J120B) は、Si IGBT (A社製: High Speed Switching type) と比較し、スイッチング損失 :  $E_{off}$ ,  $E_{on}$  を低減することができます。

(注1) IGBT 試験条件:

$V_{CC}=800\text{ V}$ ,  $I_C=10\text{ A}$ ,  $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{GE}=20\text{ V} / -5\text{ V}$ , 誘電負荷 :  $L = 1\text{ mH}$ ,  
IGBT のエミッター・コレクター間ダイオードを誘導負荷と並列にフリーホイーリングダイオード(FWD)として使用。

SiC MOSFET 試験条件:

$V_{DD}=800\text{ V}$ ,  $I_D=10\text{ A}$ ,  $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{GS}=20\text{ V} / -5\text{ V}$ , 誘電負荷 :  $L = 1\text{ mH}$ ,  
TW070J120B のソース・ドレイン間ダイオードを誘導負荷と並列に FWD として使用。

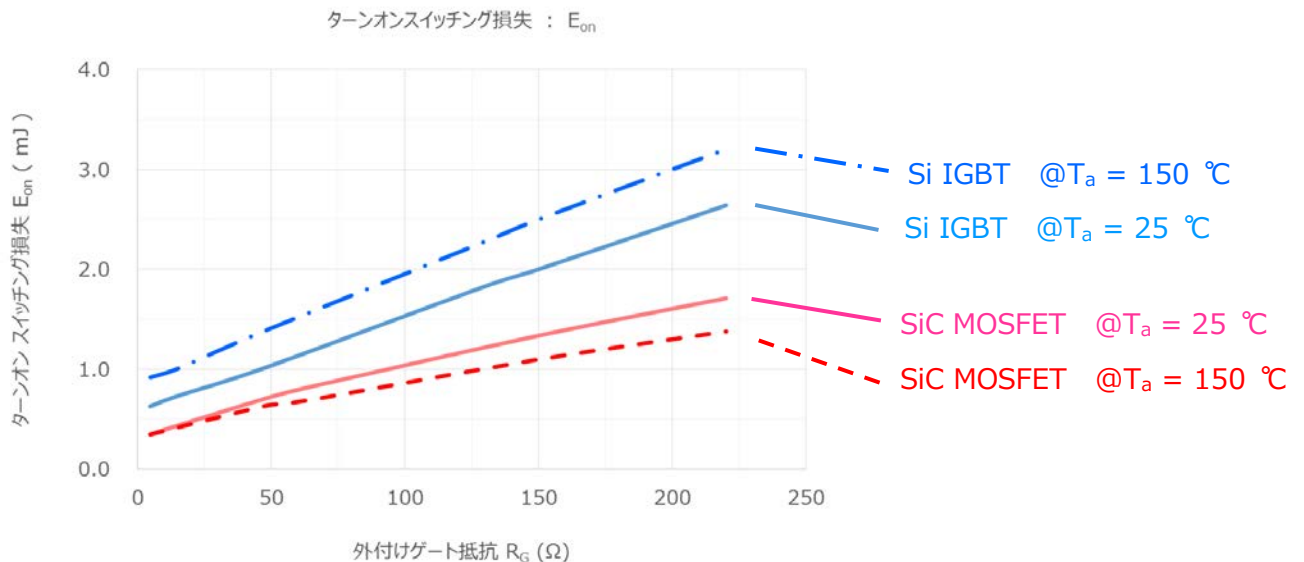


図 3-1 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオンスイッチング損失の  $R_g$  依存

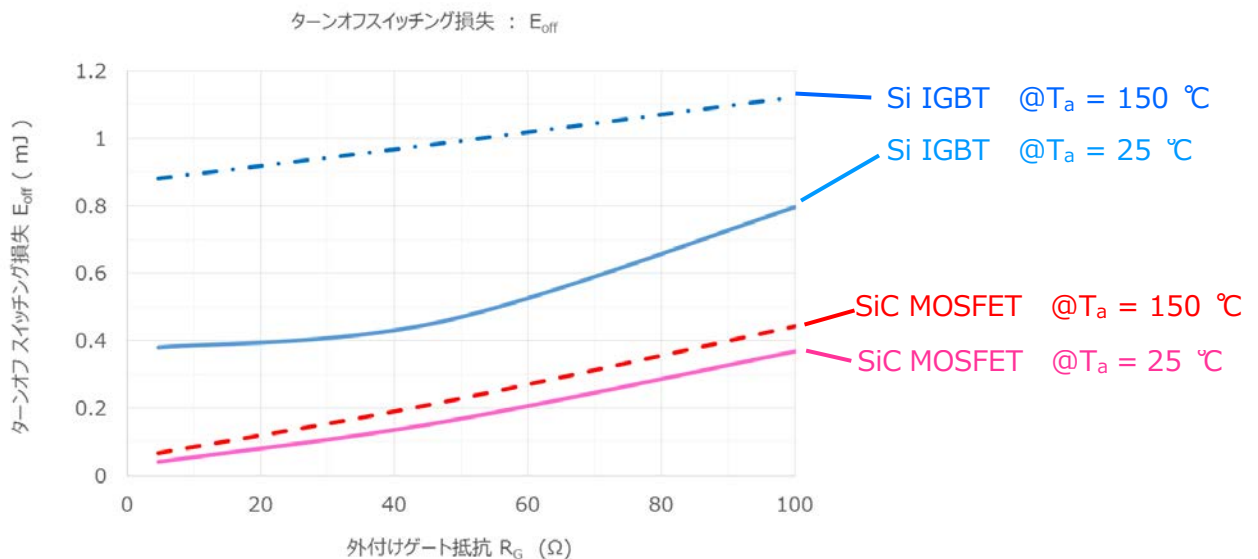


図 3-2 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオフスイッチング損失の  $R_g$  依存

### 3.2 ターンオンスイッチング動作波形とターンオンスイッチング損失 (注2)

(注2) IGBT 試験条件 : 外付けゲート抵抗  $R_G = 150 \Omega$ 、その他は、(注1)と同じ試験条件。

SiC MOSFET 試験条件 : 外付けゲート抵抗  $R_G = 47 \Omega$ 、その他は、(注1)と同じ試験条件。

ターンオン時の  $I_D$ ,  $I_C$  の傾き  $dI_D(I_C)/dt$  を合わせるため、試験条件を以上とする。

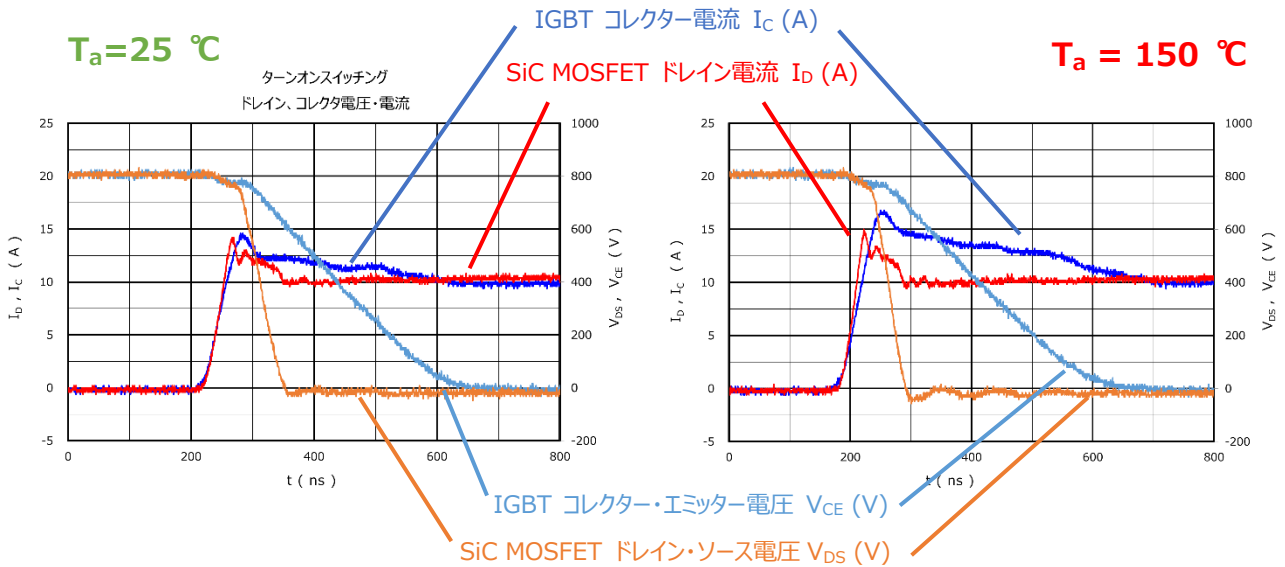


図 3-3 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオンスイッチング波形

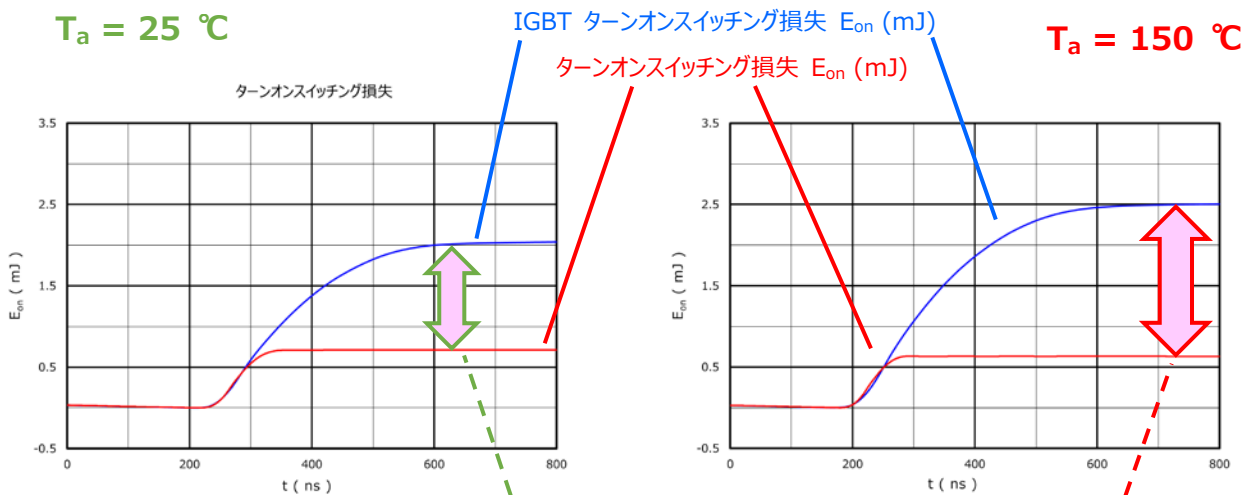


図 3-4 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオンスイッチング損失

ターンオンスイッチング損失 $E_{on}$	$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_a = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
IGBT の $E_{on}$ (mJ)	2.0	2.5
SiC MOSFET の $E_{on}$ (mJ)	0.7	0.6
IGBT から SiC MOSFET へ切り替えた場合の $E_{on}$ 低減率	65%の低減	76%の低減

### 3.3 ターンオフスイッチング動作波形とターンオフスイッチング損失 (注3)

(注3) IGBT, SiC MOSFET 試験条件:

外付けゲート抵抗  $R_G=47 \Omega$ 、その他は、(注1)と同じ試験条件。

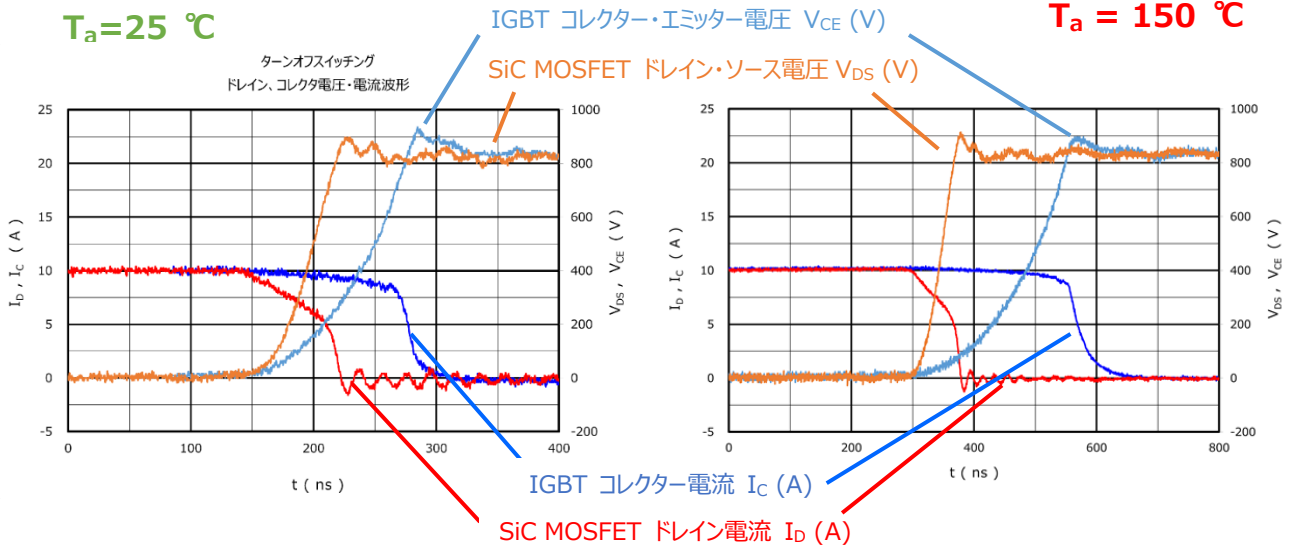


図 3-5 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオフスイッチング波形

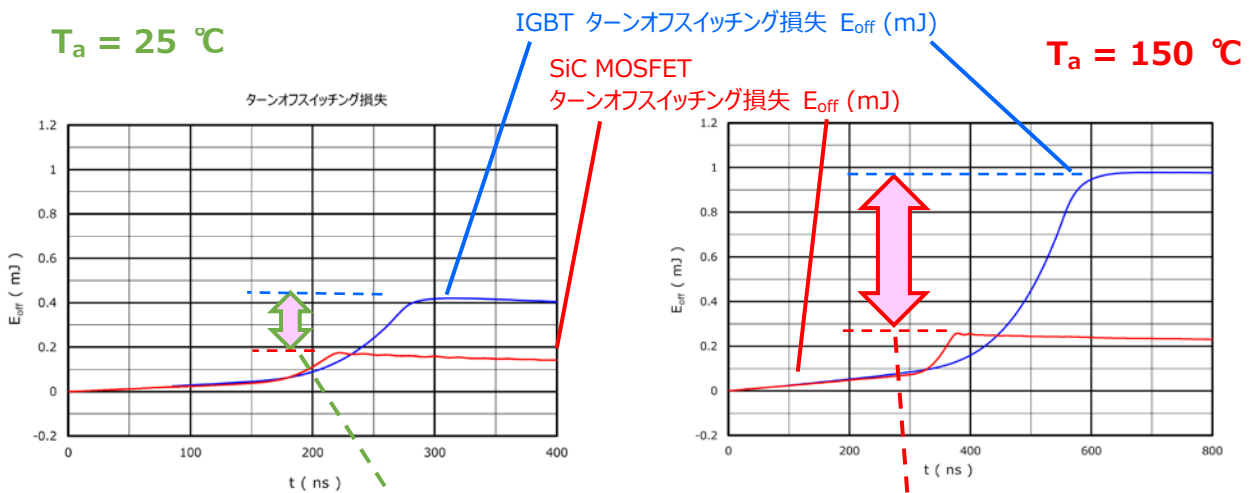


図 3-6 SiC MOSFET と Si IGBT ターンオフスイッチング波形

ターンオフスイッチング損失 $E_{off}$	$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_a = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
IGBT の $E_{off}$ ( mJ )	0.46	0.98
SiC MOSFET の $E_{off}$ ( mJ )	0.16	0.22
IGBT から SiC MOSFET へ 切り替えた場合の $E_{off}$ 低減率	65%の低減	77%の低減



### 3.4 オン抵抗特性

SiC MOSFET (TW070J120B) は、Si IGBT (A社製: High Speed Switching type) と比較し、 $T_a = 150\text{ }^\circ\text{C}$ 、通電電流  $I_D$  ( $I_C$ ) = 25A を下回る領域で、オン電圧特性  $V_{DS(on)}$  ( $V_{CE(sat)}$ ) を低減できます。

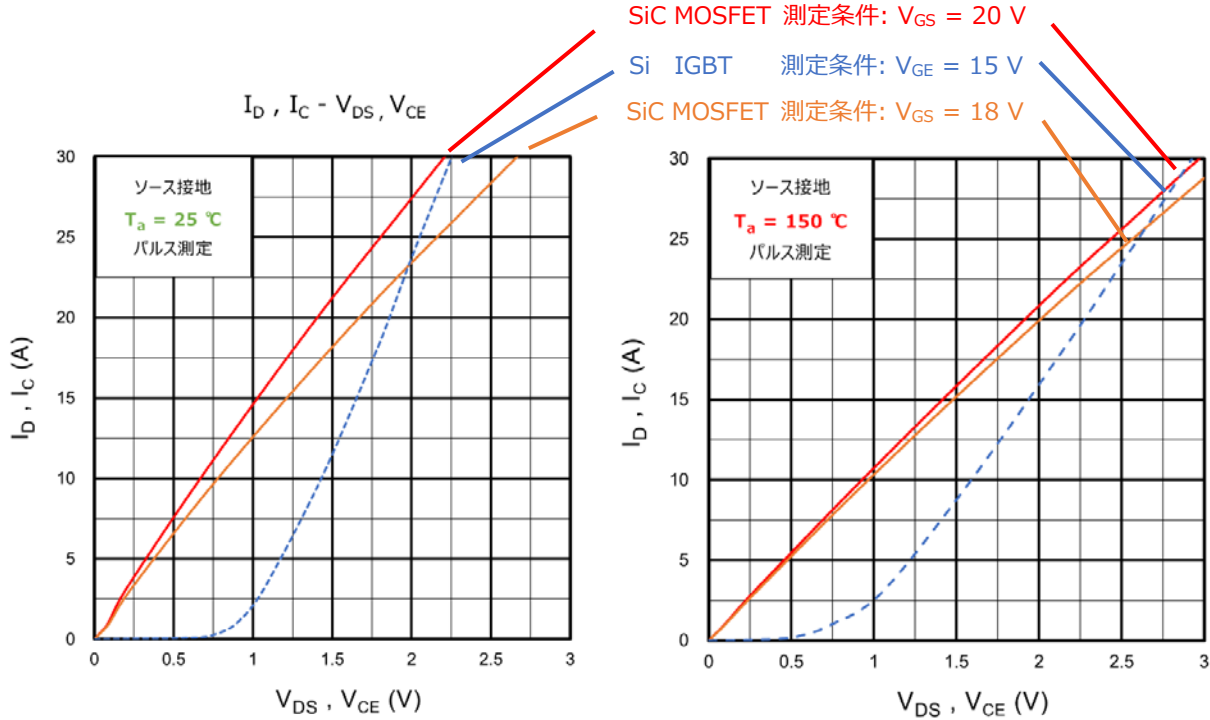


図 3-7 SiC MOSFET  $I_D - V_{DS}$ カーブと Si IGBT  $I_C - V_{CE}$ カーブ

### 3.5 ダイオード順電圧特性

SiC MOSFET (TW070J120B) は、Si IGBT (A社製: High Speed Switching type) と比較し、ダイオード順電圧  $V_F$  が、 $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_F = 0.8\text{ A}$  以上では低くなっており、 $T_a = 150\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_F = 3\text{ A}$  以上では同程度になっています。

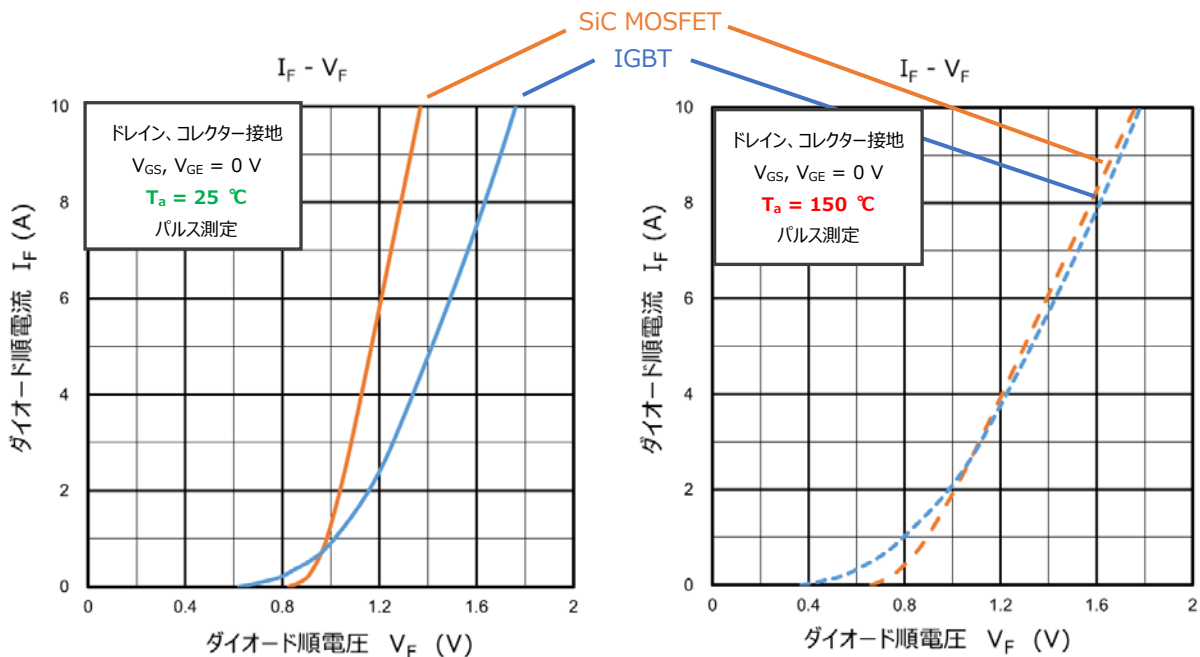


図 3-8 SiC MOSFET  $I_F - V_F$ カーブと Si IGBT  $I_F - V_F$ カーブ

### 4. 損失シミュレーション

弊社では、SiC MOSFET (TW070J120B)と Si IGBT のスイッチング特性、オン抵抗特性、ダイオード順電圧特性から、 $V_{cc} = 400\text{ V}$ ,  $I_o = 7.0\text{ Arms}$ ,  $P.F. = 1$ , 三相変調,  $T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$ の条件で損失シミュレーションを実施しました。

SiC MOSFET (TW070J120B) は、Si IGBT と比較し、約 28 W 損失を低減することができ、機器の高効率化に貢献します。



図 4-1 SiC MOSFET と Si IGBT 損失シミュレーション

## 製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。  
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスクエア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようにご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。