

SiC ショットキーバリアダイオード

概要

ワイドバンドギャップ半導体である炭化ケイ素 (SiC) とシリコン (Si) の物性的な相違をパワー半導体としての側面から簡単に説明します。また、SiC ショットキーバリアダイオード (SBD) の高耐圧化、SBD の問題点であるリーク電流とサージ電流の改善策 (JBS 構造/MPS 構造) についても言及します。

目次

概要	1
目次	2
1. SiC パワーデバイス.....	4
2. SiC ショットキーバリアダイオード (SBD : Schottky Barrier Diode)	5
2.1. SiC による高耐圧の実現.....	6
2.2. 低リーク電流を実現する JBS (Junction Barrier Schottky) 構造.....	7
2.3. 高サージ電流を実現する改良型 JBS 構造	7
2.4. SiC SBD の温度特性	9
製品取り扱い上のお願い.....	10

図目次

図 1-1 二重拡散型 MOSFET 構造図.....	4
図 2-1 SiC vs Si Turn Off 比較.....	5
図 2-2 SBD 耐圧と空乏層の関係.....	6
図 2-3 通常構造 SBD と最大電界イメージ.....	7
図 2-4 JBS 構造 SBD と最大電界イメージ.....	7
図 2-5 一般的な SBD 電流イメージ.....	7
図 2-6 一般的な SBD I_F - V_F 特性.....	7
図 2-7 改良型 JBS 構造 SBD.....	8
図 2-8 伝導度変調イメージ.....	8
図 2-9 I_F - V_F 特性.....	8
図 2-10 SiC SBD 温度特性例.....	9
図 2-11 Si SBD 温度特性例.....	9

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
表 2-1 高耐圧ダイオードの特性比較.....	5

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) と伝導体 (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 μ_e	cm ² /Vs	1400	1000/1200	450/100	1000	900	8500	2200
正孔移動度 μ_h		600	120	100	50	150	400	1600
絶縁破壊電界強度 E_c	V/cm	3.0×10^5	2.8×10^6	3.0×10^6	1.5×10^6	3.3×10^6	4.0×10^5	1.0×10^7
熱伝導度 λ	W/cmK	1.5	4.9	4.9	4.9	2.0	0.5	20
飽和速度 V_{sat}	cm/s	1.0×10^7	2.2×10^7	1.9×10^7	2.7×10^7	2.7×10^7	2.0×10^7	2.7×10^7
誘電率 ϵ		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-ソース間の逆バイアス印加時に、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。

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

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 μ 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 μ 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%

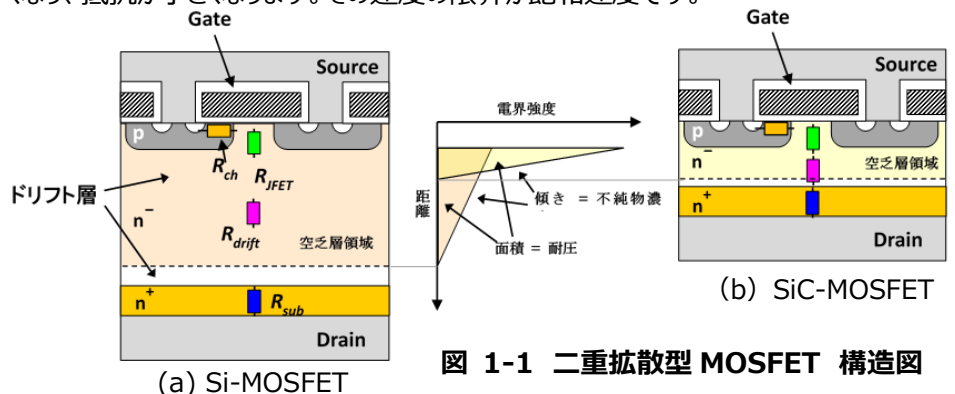


図 1-1 二重拡散型 MOSFET 構造図

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 ショットキーバリアダイオード (SBD : Schottky Barrier Diode)

高耐圧のダイオードは電源回路の力率改善回路 (PFC 回路) の昇圧ダイオードやインバータ回路のフリーホイールダイオードなどに使用されます。この部分では、高い交流電力が印加され、オン/オフが繰り返されています。高耐圧ダイオードの特性項目と特徴を表 2-1 に示します。

表 2-1 高耐圧ダイオードの特性比較

電気的特性項目 シンボル (改善方向)	実回路に対する影響	Si 材料		SiC 材料	
		FRD *	SBD	SBD	SBD (改良型JBS)
耐圧 V_R (大)	スイッチング時の電圧サージ	★★★★	★	★★★★★	★★★★★
リーク電流 I_R (小)	熱暴走	★★	★	★★★	★★★★★
順電圧 V_F (小)	効率に大きく影響	★★★	★★★★★	★★★	★★★
逆回復時間 t_{rr} (小)	効率に大きく影響	★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
サージ電流 I_{FSM} (大)	オン時の突入電流	★★★★★	★	★	★★★

★ : 数が多いほど優れていることを示す

* : Fast Recovery Diode

最近の電源回路では、高効率化・低ノイズ化・小型化が求められています。小型化のために高周波数化を進めており、スイッチングロスに占める割合が大きくなってきています。このため、この要因である逆回復電荷量 (Q_{rr}) の影響を受けにくいソフトスイッチングなどの回路的な施策が色々と取られています。

よく知られているように、 Q_{rr} は pn 接合ダイオードのオンからオフへの切り替え時の残存少数キャリアが原因です。このため pn 接合でなく半導体と金属の接合により生ずるショットキー障壁を利用した SBD が、少数キャリアを持たずこの用途に理想的ですが、耐圧の高い素子を構成することができませんでした。

Q_{rr} 以外の問題点として、SBD はリーク電流が pn 接合ダイオードに対して高く熱暴走する危険がある、サージ電流耐量が低く電源回路のオンのサージ電流 (突入電流) に対して余裕がないという問題もあります。

ワイドバンドギャップ半導体である SiC を使用することで、耐圧に対する問題は回避できるようになりました。また、リーク電流・サージ電流に対しても、新規構造を採用することにより解決しています。このことに対して、この資料で説明します。

図 2-1 に、同一回路で同一耐圧を持つ Si-FRD と SiC SBD のオンからオフへの移行過程の波形を示します。

SiC SBD では少数キャリアによる Q_{rr} は原理的にありません。

ただし、金属-半導体間のジャンクション容量や、のちに述べる JBS/MPS 構造部分の pn 接合による微小な電流はありますが、定格電流内では SiC SBD の Q_{rr} は非常に少ないことがわかります。

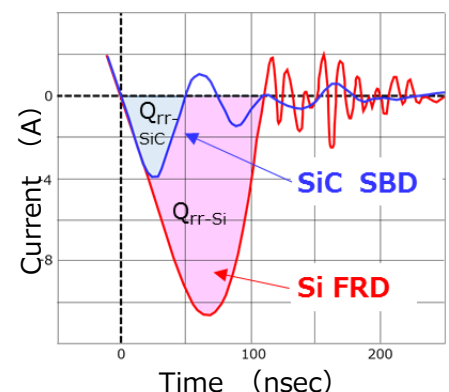


図 2-1 SiC vs Si Turn Off 比較

2.1. SiC による高耐圧の実現

一般的な構造の SBD に逆バイアスを印加すると、図 2-2 (a) のように半導体側に空乏層が伸びます。絶縁破壊電界強度と空乏層幅で囲まれた三角形の面積が耐圧になります。空乏層の幅は不純物濃度に反比例します。図 2-2

(b) に示すように不純物濃度を高くすると、Si 部分の抵抗値は減少し、順方向電圧 (V_F) は低く改善されますが、耐圧 (三角形の面積) は減少します。

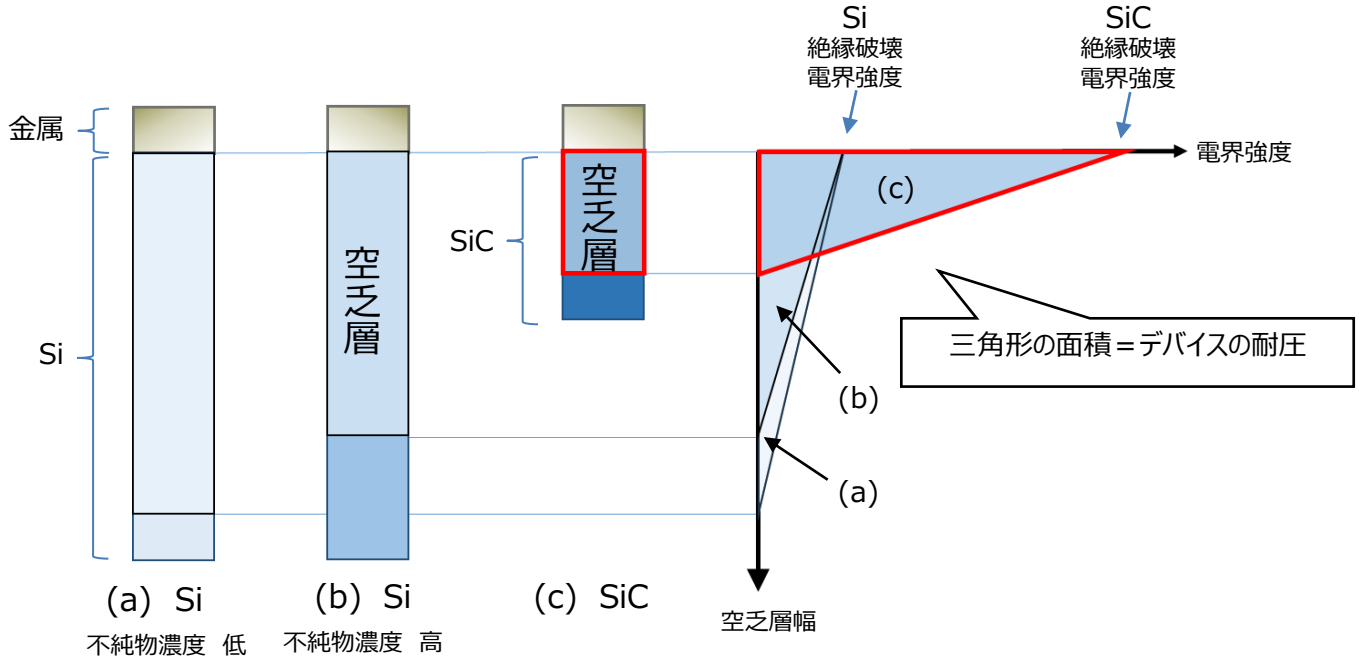


図 2-2 SBD 耐圧と空乏層の関係

SiC の場合、絶縁破壊強度が Si の 10 倍近くあります。図 2-2 (c) のように空乏層の厚みを薄くするために、不純物濃度を上げて耐圧 (三角形の面積) を上げることが可能となります。

また、高濃度化により空乏層が伸びなくなるので、チップの厚みを Si に比べて薄くできます。半導体 (Si または SiC) の厚みは順方向時、直列抵抗と考えることができますので厚みを薄くすることにより順方向電圧を改善できます。

2.2. 低リーク電流を実現する JBS (Junction Barrier Schottky) 構造

SBD は半導体と金属を接合し、その仕事関数の違いからダイオードを実現しています。この接合面では、分子構造が不連続/表面の凹凸/結晶欠陥などが生じることがあります。この欠陥などの多い境界面に高い電界が印加されると、リーク電流 (I_r) と呼ばれる電流が流れます。

一般的な構造のショットキーバリアダイオード (SBD) は、図 2-3 に示すように半導体側に空乏層が広がり、電荷 (または電子) による電界は金属と半導体の境界面が最も高くなります。

これに対し、JBS 構造の SBD では図 2-4 に示すように、半導体表面より部分的に埋め込まれた p 層と n^- 層の間に空乏層が広がります。逆バイアスの電圧が高くなると p 層の空乏層同士がパンチスルーし最大電界の位置は p 層直下に移動することになります。このことにより、欠陥などの存在確率の高い表面の電界レベルが下がり、リーク電流を抑えることが可能となります。

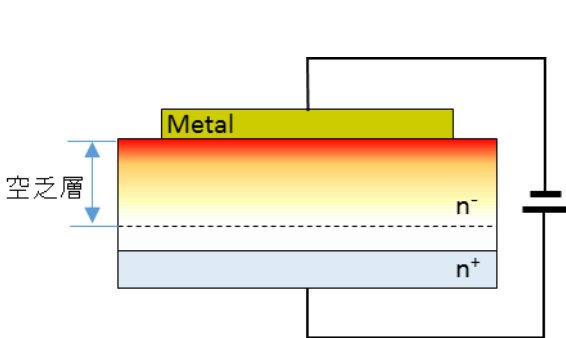


図 2-3 通常構造 SBD と最大電界イメージ

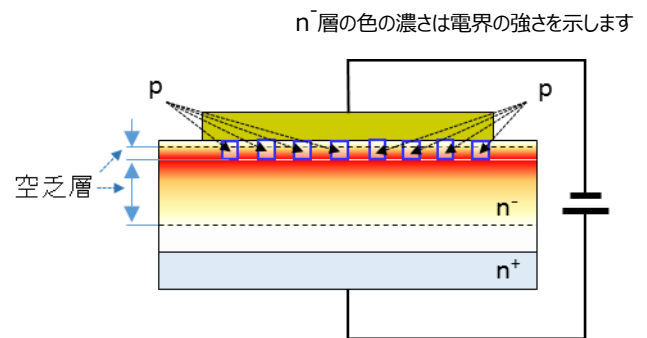


図 2-4 JBS 構造 SBD と最大電界イメージ

2.3. 高サージ電流を実現する改良型 JBS 構造

一般的なショットキーバリアダイオード (SBD) に順方向の電圧を印加した場合、図 2-5 のように「金属 → ショットキー障壁 → n^- 層 → n^+ 層」と電流が流れます。この時、 n^- 層は不純物濃度が低いことから、比較的大きな抵抗成分を持ちます。このため、SBD の $I_F - V_F$ 特性は図 2-6 のようになります。

本製品は PFC などの回路での使用を意図しています。PFC 部では電源のオン/オフ時や負荷変動時に瞬間的に大きな電流が流れることがあり、大電流動作を保証する必要があります。図 2-6 のような特性では、デバイスが想定以上に発熱する可能性があります。

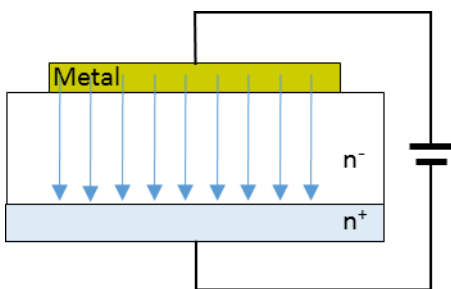


図 2-5 一般的な SBD 電流イメージ

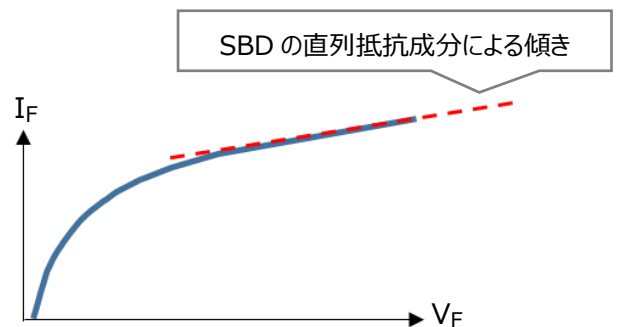


図 2-6 一般的な SBD $I_F - V_F$ 特性

今回、当社では MPS (Merged PiN Schottky) 構造の概念を取り込んだ改良型 JBS 構造の製品を開発しました。

MPS 構造は図 2-7 に示すように、SBD を構成する n^- 層の一部に p^+ 層を埋め込んだ構造となります (当社では図 2-7 の斜線部のように JBS 構造の p 層の一部を巨大化し不純物濃度を高めた構成になっています)。この p^+ 層と元々の SBD の n^- 層による pn 接合ダイオードは、高電流 (高サージ電流) が必要となるタイミングでオンします。これより電流輸送能力が高まり、大電流時の順方向電圧の上昇を抑制し高サージ耐量が向上します。MPS 構造はアノード電極下の p^+ 層 - n^- 層 - n^+ 層の構成を特長とします。通常、 n^- 層は高抵抗だが、この構成の場合、順バイアス時に p^+ 層と n^- 層からホール (正孔) と電子が流れ込み、電気的中性を保ちながら高い濃度で両者が存在するようになります (図 2-8)。特に、大電流で n^- 層は高濃度にドーピングされたように、働き非常に低抵抗になります (伝導度変調)。その結果、図 2-9 に示すように、高電流で V_F の低い特性を実現しています。

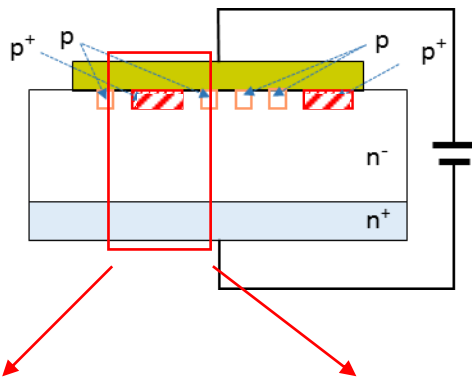


図 2-7 改良型 JBS 構造 SBD

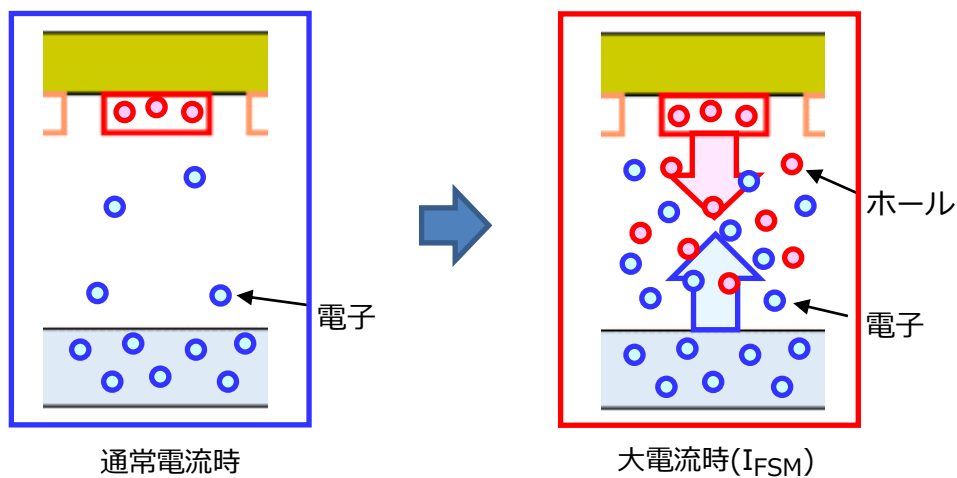


図 2-8 伝導度変調イメージ

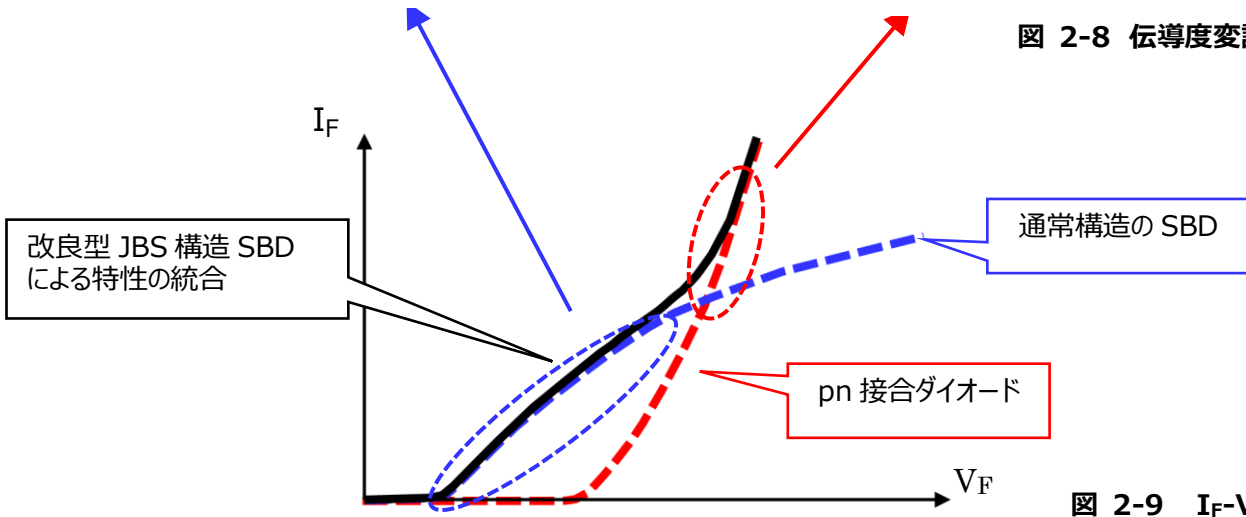


図 2-9 I_F - V_F 特性

2.4. SiC SBD の温度特性

SiC SBD の順方向電圧の温度毎の I_F - V_F 特性例を図 2-10 に示します。

I_F が小さい領域では通常の Si (図 2-11) と同様に、高温になるに従い (同じ電流で) 順方向電圧 (V_F) が下がっていますが、大きい領域では (同じ順方向電圧で) 順電流 (I_F) が下がっています。

この変化は半導体の抵抗成分が熱により変化することから生じます。

抵抗成分の変化要因としては、下記 2 点があげられます。

- ① ドナー電子の伝導帯への励起 (抵抗値減少)
- ② 格子振動による電子の拡散 (抵抗値増加)

SiC などのワイドバンドギャップ半導体は、結合力が強く格子振動の影響が Si に比較して大きくなります。また、バンドギャップが大きいことからドナーが Si に比較して励起しにくくなります。このようなことから、低電流では①の影響が大きく、高電流になるに従って、②の影響を受け図のような特性を示すと考えられます。ただし、この高電流で温度係数が反転する現象は Si ダイオードでも定格電流 (平均順電流/直流順電流) を超えた高い電流レベルで生じます。

このため、ダイオードの並列接続を行った場合、Si ダイオードでは①により発熱による正帰還がかかり電流のアンバランスがおこる可能性があります。SiC SBD の高電流部分では②により負帰還となるので、この領域を使用し通電電流に注意して設計することにより、比較的容易に並列接続を構成できます。

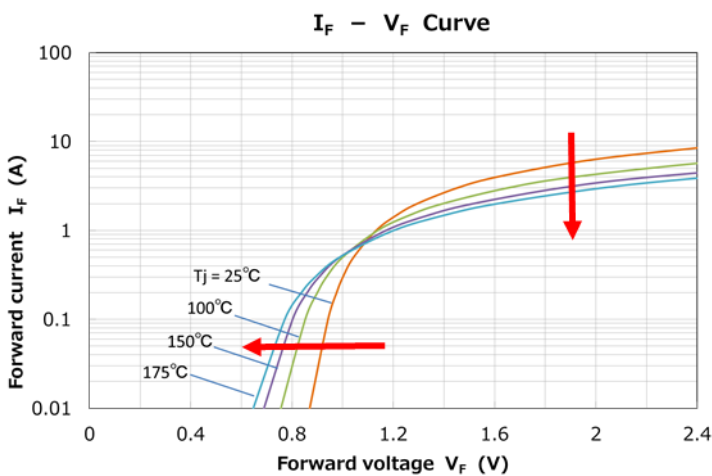


図 2-10 SiC SBD 温度特性例

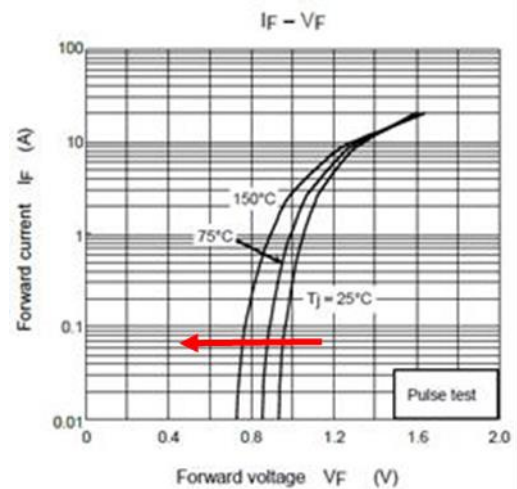


図 2-11 Si SBD 温度特性例

製品取り扱い上のお願ひ

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（ヘルスケア除く）、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。