ダイオードの基礎
（ショットキーバリアダイオード）

概要

ダイオードは、あらゆる機器の整流、逆流防止および回路保護など、さまざまな用途に使用されます。 また、ダイオードの種類でも、Si (シリコン) の pn 接合ダイオードに加え、ショットキーバリアダイオード (SBD) 、TVS (ESD 保護ダイオード) 、ツェナーダイオードなどがあり、さらに最新の化合物半導体である SiC SBD もラインアップされています。

本資料では、ショットキーバリアダイオードの概要と絶対最大定格、電気的特性について説明をしています。

目次

概要 1
目次 2
1. ダイオードの種類 6
1.1. ダイオードの用途や特性による分類 6
2. 各種ダイオードの概要 7
2.1. ショットキーバリアダイオード 7
2.1.1. ショットキー接合 7
2.1.2. JBS 構造 10
2.2. SiC ショットキーバリアダイオード 12
2.2.1. SiC とは 12
2.2.2. 改良形 JBS 構造 SBD 13
3. 最大定格 15
3.1. 最大定格の意義 15
3.2. ダイオード共通 15
3.2.1. 接合温度 T_j 15
3.2.2. 許容損失 P_D, P 16
3.2.3. 保存温度 T_{stg} 17
3.2.4. 絶縁耐圧 $V_{ISO(RMS)}$, V_{dis} 17
3.2.5. 締め付けトルク TOR 17
3.3. スイッチングダイオード, 整流ダイオード, 共通 18
3.3.1. 電圧定格 18
3.3.2. 電流定格 19
4. 電気的特性 22
4.1. ショットキーバリアダイオード（SBD）共通 22
4.1.1. 順電圧、ピーク順電圧 V_F,V_{FM} 22
4.1.2. 逆電流 I_R、繰り返しピーク逆電流 I_{RRM} 23
4.1.3. 端子間容量 C_t、接合容量 C_j 23
4.1.4. 総電荷量（Total capacitive charge）Q_{cj} 23
4.1.5. 順回復時間 t_{fr} 23
4.1.6. 逆回復時間 t_{rr} 24

製品取り扱い上のお願い 28

図目次

図 1.1　ダイオードの種類による分類 6
図 2.1　ショットキーバリアダイオードの構造例 7
図 2.2　金属のバンド図 7
図 2.3　n 形半導体のバンド図 7
図 2.4　ショットキー接合が無バイアス状態のバンド図 8
図 2.5　ショットキー接合に順バイアスを印加したときのバンド図 9
図 2.6　ショットキー接合に逆バイアスを印加したときのバンド図 10
図 2.7　JBS 構造イメージ図 11
図 2.8 ショットキー接合に逆バイアスを印加 11
図 2.9 ショットキー接合に印加した逆バイアス 11
図 2.10　通常の SBD と JBS 構造の SBD の逆電流特性イメージ図 11
図 2.11　Si のバンドギャップ 12
図 2.12　SiC のバンドギャップ 12
図 2.13　Si SBD と SiC SBD の電界の広がりイメージ図 13
図 2.14　全波整流時のコンデンサへの充電電流波形例 13
図 2.15　改良形 JBS 構造 SBD 断面イメージ図 14
図 2.16　通常の SBD、pn 接合ダイオードおよび改良形 JBS 構造 SBD の 14
図 3.1　電圧定格の定義 19
図 3.2　定常動作電流定格の定義 20
図 3.3　瞬時パルス電流定格の定義 21
図 4.1　Si SBD と SiC SBD の順電流-順電圧特性例 22
図 4.2　順回復時間 t_{fr} 測定回路例 24
図 4.3　順回復時間 t_{fr} 波形例 24
図 4.4　逆回復時間 t_{rr} 測定回路例 24
図 4.5　逆回復時間 t_{rr} 波形例 25
図 4.6　逆回復動作 25
図 4.7 HED t_{rr} 波形例 26
図 4.8 S-FRD t_{rr} 波形例 26
図 4.9 汎用ダイオード t_{rr} 波形例 26
図 4.10　SBD リカバリー波形例 26

図 4.11　HED リカバリー波形例 26

表目次

表 2-1　代表的な半導体材料の物性値 12

1. ダイオードの種類

1.1. ダイオードの用途や特性による分類

ダイオードは種々の用途に応じて製品が開発されており、大きく 2 つに分類されます。 1 つは p 形半導体と n 形半導体を接合した pn 接合ダイオードで、もう 1 つは n 形半導体、または、p 形半導体と金属を接合した金属-半導体ダイオード（ショットキーバリアダイオード:SBD）です。 これらのダイオードは用途や特性によって図 1.1 のように大別することができます。

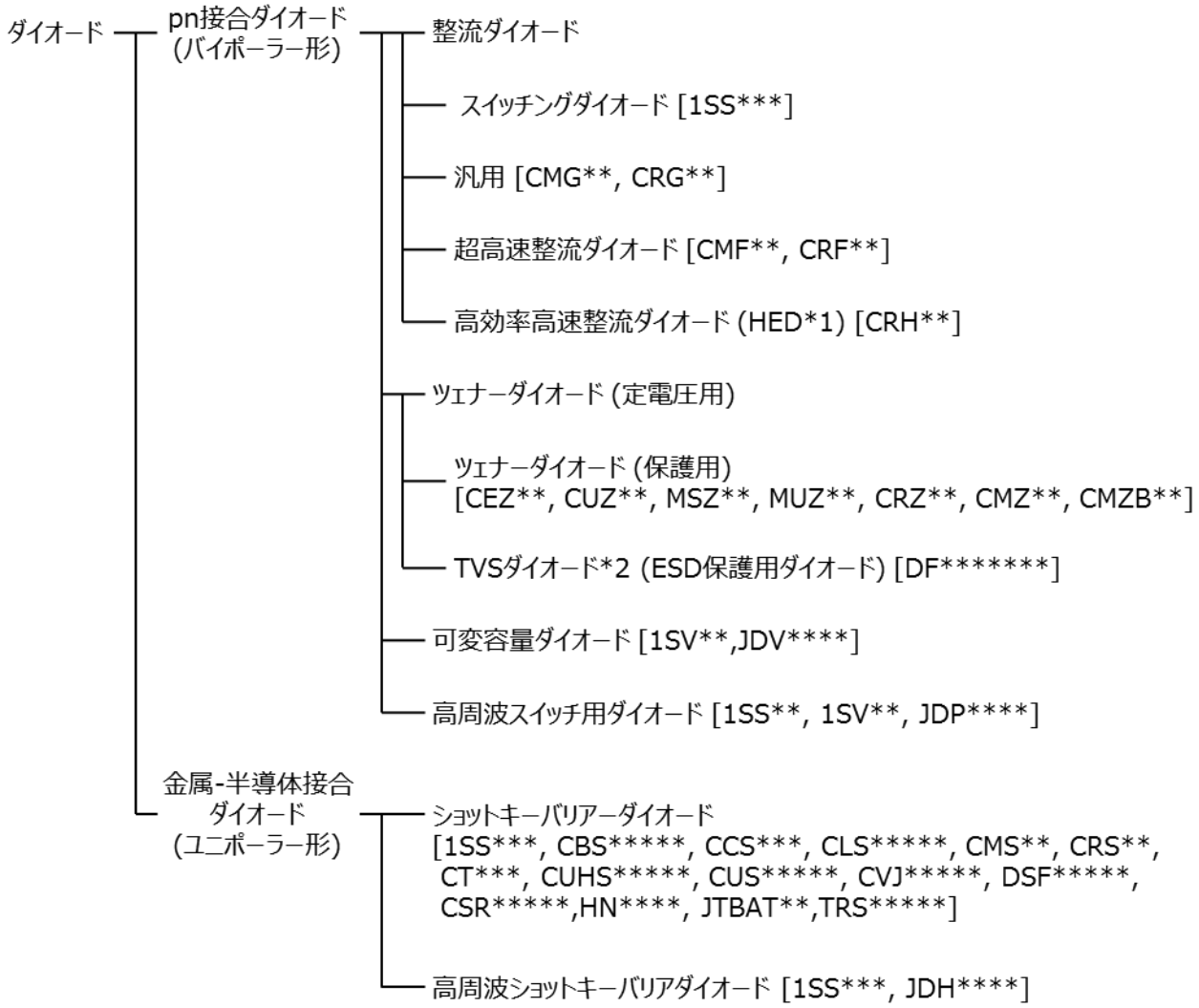


図 1.1　ダイオードの種類による分類

2. 各種ダイオードの概要

2.1. ショットキーバリアダイオード

2.1.1. ショットキー接合

図 2.1 にショットキーバリアダイオードの構造図を示します。 金属と半導体の接触による整流性を利用したダイオードで、ショットキーが提唱したことから、ショットキーバリアダイオード（以下、SBD）と呼ばれます。 蒸着した金属と n 形半導体との間にショットキー接合が構成されるのが特徴です。

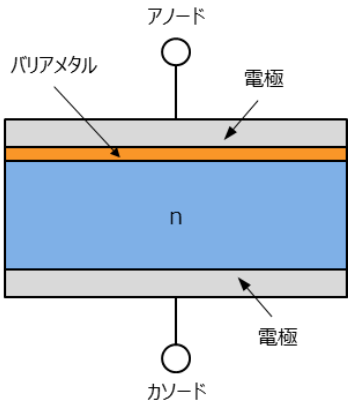


図 2.1　ショットキーバリアダイオードの構造例

図 2.2 に示すように金属には、価電子帯と伝導帯の間にフェルミ準位が存在し、禁制帯は存在しません(バンドギャップが存在しない)。 このため、金属は価電子帯には多量の正孔が、伝導帯には多量の電子が存在することになります。

また、n 形半導体を例にバンド図を図 2.3 に示します。 n 形半導体では、価電子帯と伝導帯の間に電子の存在できない禁制帯が存在し、その禁制帯中にフェルミ準位が存在します。

このとき、n 形半導体のフェルミ準位より低いフェルミ準位と持つ金属を接合するとショットキー接合が形成され、整流特性を示します。 反対に n 形半導体のフェルミ準位より高いフェルミ準位を持つ金属を接合するとオーミック接合となり、抵抗の特性を示します。

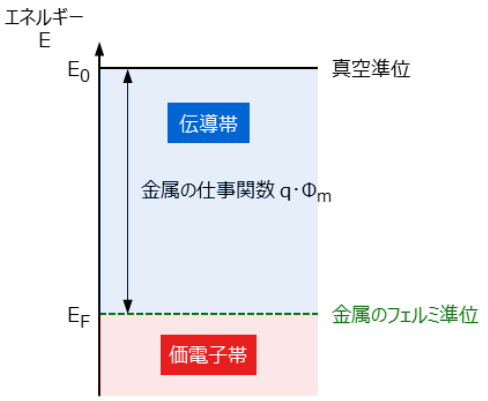


図 2.2　金属のバンド図

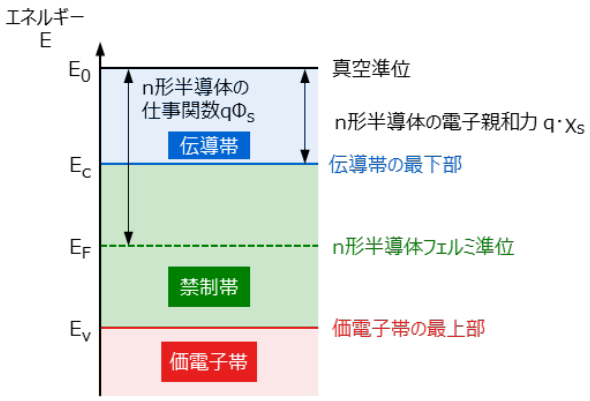


図 2.3　n 形半導体のバンド図

金属と n 形半導体を接合すると、n 形半導体から金属へ一部の電子が流れ込み、フェルミ準位が一定になります。 これと同時に n 形半導体の伝導帯の底部 Ec と価電子帯の上部 Ev もエネルギー順位が移動して、図 2.4 のようなバンド図になります。 このとき、金属と n 形半導体の間には、$q \cdot \Phi_{bi}=q(\Phi_m-\Phi_s)$ となる拡散エネルギーが発生し、n 形半導体側には +イオンによる空乏層が形成されます。 なお、金属側には多量の電子が存在するため、n 形半導体から電子が移動しても空乏層は、ほとんど形成されません。 ショットキー接合が無バイアスの状態では、電子が空乏層の拡散エネルギー $q(\Phi_m-\Phi_s)$ を超えることができないため電流は流れません。

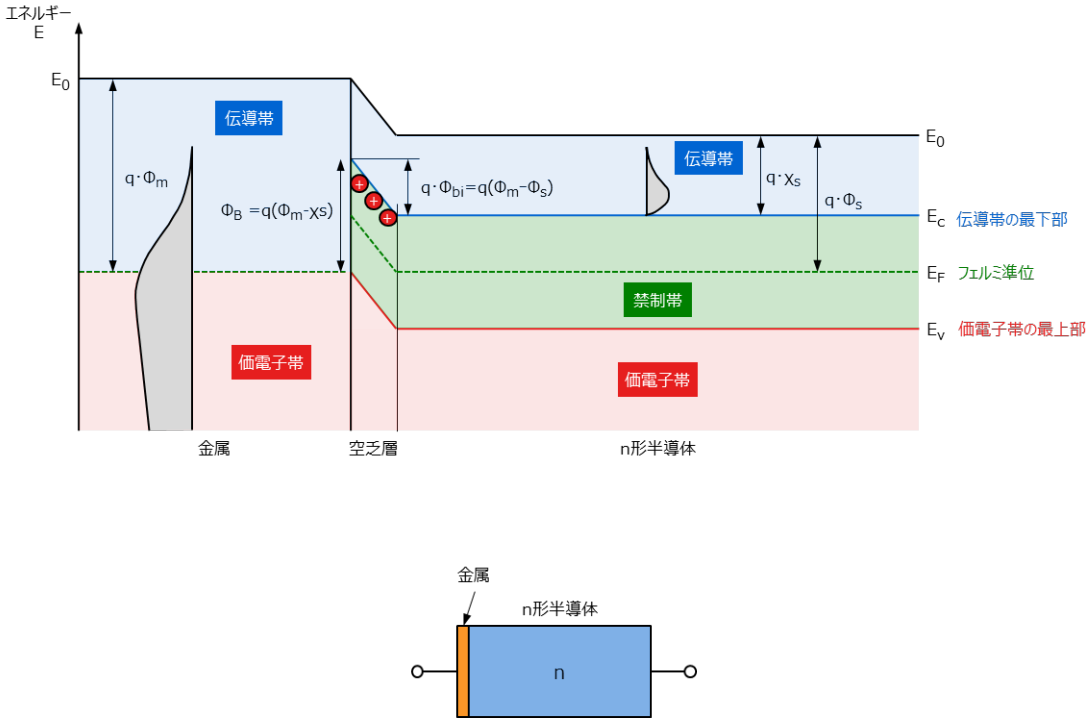


図 2.4　ショットキー接合が無バイアス状態のバンド図

ショットキー接合に順方向バイアス V_B が印加されると、n 形半導体のエネルギー順位が底上げされて、拡散エネルギー $q(\Phi_m-\Phi_s-V_B)$ を超える電子の量が増加します。 この拡散エネルギーを超えた電子は金属側に流れ込み電流が流れます。

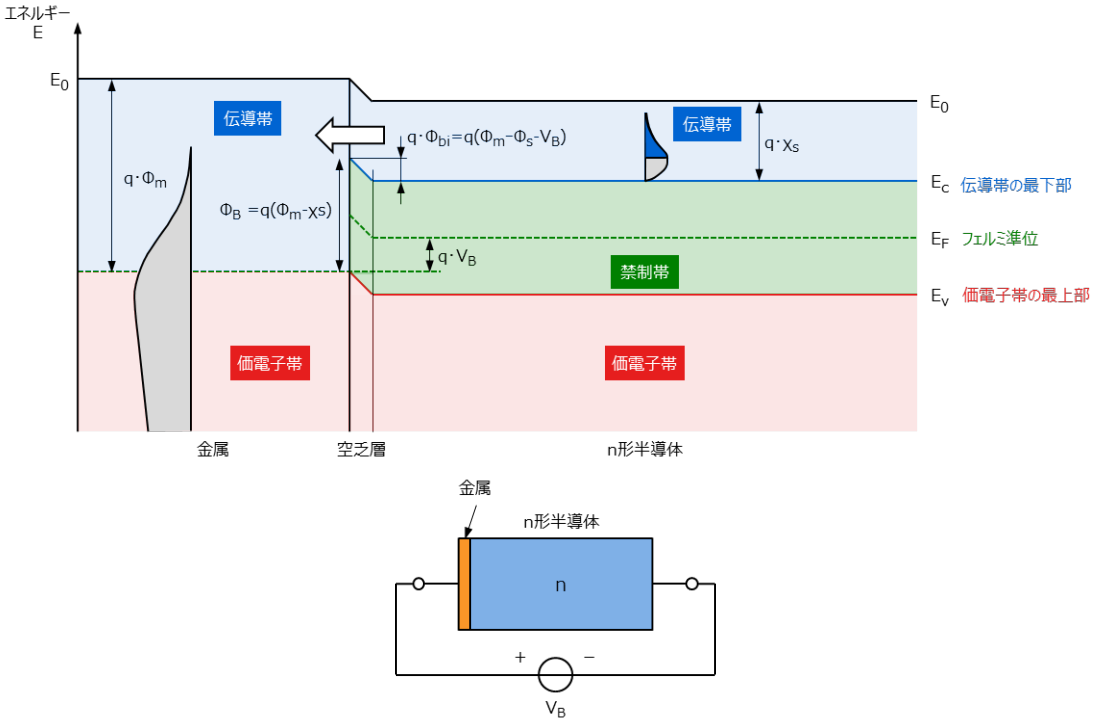


図 2.5　ショットキー接合に順バイアスを印加したときのバンド図

ショットキー接合に逆バイアス電圧 V_R が印加されると、n 形半導体のエネルギー順位は下がります。 このため、拡散エネルギーq(Φm-Φs+VR) を超えられる電子は、ほとんどなくなり電流は流れなくなります。

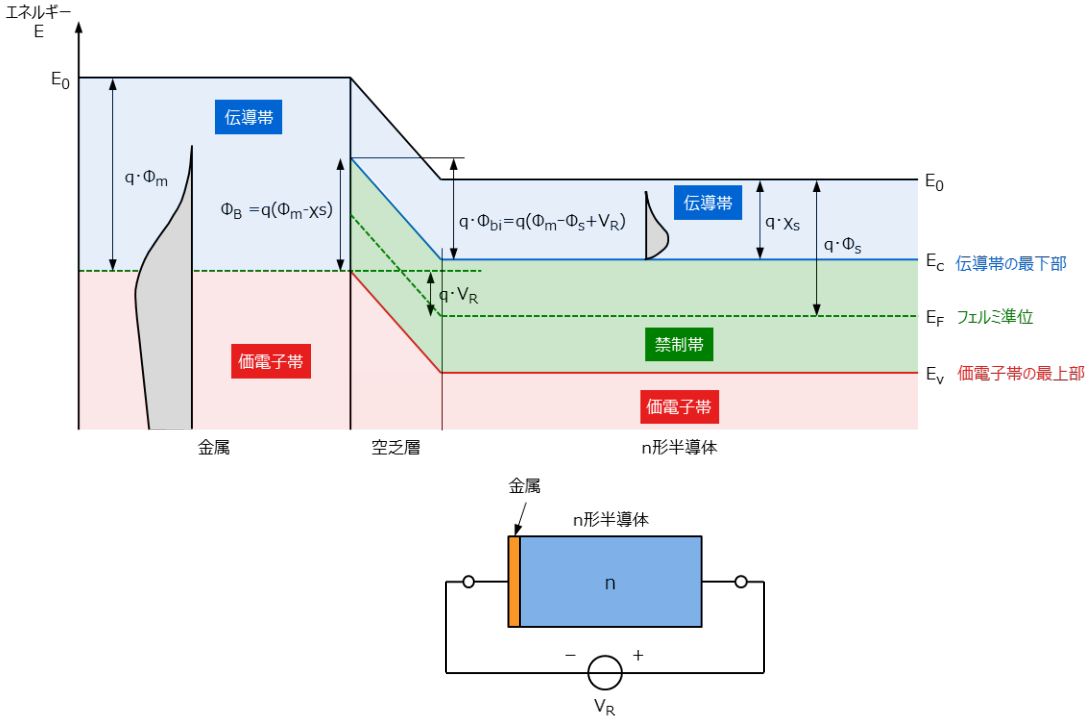


図 2.6　ショットキー接合に逆バイアスを印加したときのバンド図

ショットキー接合を構成する代表的な金属（バリアメタル）として、モリブデン（Mo)、チタン（Ti）およびバナジウム（V）などがあります。 SBD の電流が立ち上がる電圧は Si ダイオードに対して小さいことが大きな特長です。

なお、拡散電位の小さいバナジウム（V）やチタン（Ti）を使った SBD では、金属と n 形半導体の障壁が低いことから、拡散電位の大きい金属であるモリブデン（Mo）などに比較して、逆電流が大きい傾向があります。 逆電流の大きい SBD では、逆電圧×逆電流による損失が発生し、接合温度が上昇します。 逆電流は正の温度係数を持っており、接合温度の上昇とともに逆電流が増加し、逆電流増加→接合温度上昇→逆電流増加の正帰還が掛かり、最終的に熱暴走して、素子の特性劣化や破壊を招く恐れがあります。 SBD を使用する際には、印加される逆バイアス電圧や周囲温度などの使用条件を考慮して、十分に問題がないことを確認してください。

2.1.2. JBS 構造

SBD は、順電圧 V_F が小さい反面、逆電流が大きい特徴を持っています。 この大きい逆電流は、正の温度係数を持っており、印加される逆電圧や周囲温度などの使用条件によっては、逆電流増加→接合温度上昇→逆電流増加→接合温度上昇の正帰還が掛かり、最終的に熱暴走状態となり素子の劣化や破壊を招く恐れがあります。 このため、当社の SBD では、逆電流を小さくすることができる JBS (Junction Barrier Schottky) 構造を採用した製品をラインアップしています。

JBS 構造の断面は、図 2.7 のように n 層の表面に部分的に p 層が拡散された構造となっています。 SBD に逆電圧が印加されると n 層と拡散された p 層で空乏層が広がり始めます。 さらに逆バイアス電圧を増加させると、隣り合う空乏層同士が繋がることによって逆電流を抑制することができます。

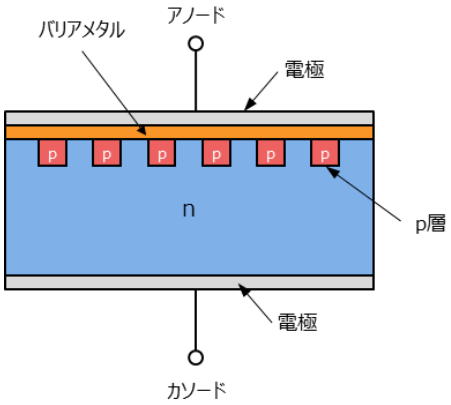


図 2.7　JBS 構造イメージ図

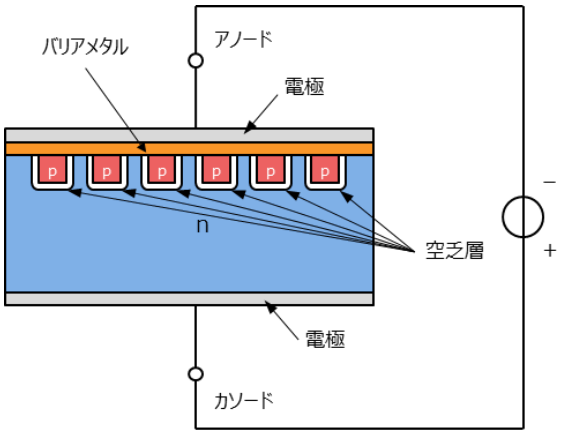


図 2.8 ショットキー接合に逆バイアスを印加し始めたときの空乏層イメージ図

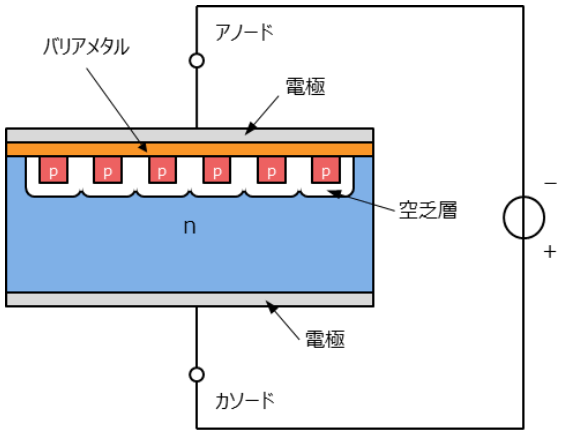


図 2.9 ショットキー接合に印加した逆バイアスを増加したときの空乏層イメージ図

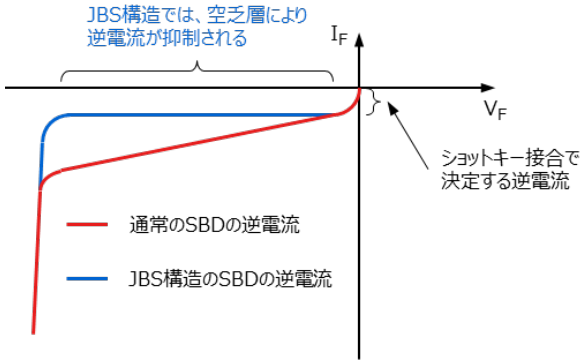


図 2.10　通常の SBD と JBS 構造の SBD の逆電流特性イメージ図

2.2. SiC ショットキーバリアダイオード

2.2.1. SiC とは

SiC (炭化ケイ素)は、Si (シリコン) と C (炭素) の原子から構成され、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います。 SiC は、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と伝導帯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:E_g）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結合が強固であり、絶縁破壊電界強度が高くなります。 SiC は、Si と比較して約 10 倍程度の絶縁破壊電界強度を持っています。 また、結合が強固なことから格子が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。 表 2.1 に Si および他の半導体材料との物性定数の比較を示します。 SiC の結晶多形のうち電子移動度・絶縁破壊電界強度・飽和速度など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 2-1　代表的な半導体材料の物性値

項目	記号	単位	Si	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	GaN	GaAs	ダイヤモンド
バンドギャップ	E_g	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/ cm·K	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
比誘電率	ε_r	-	11.8	9.7/ 10.2	9.7/ 10.2	9.7	9.0	12.8	5.5

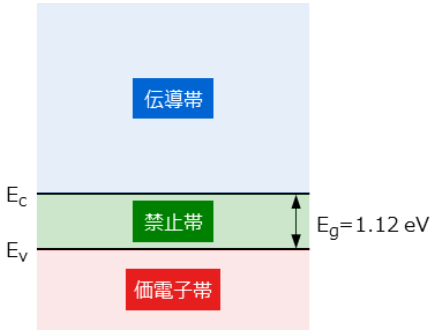


図 2.11　Si のバンドギャップ

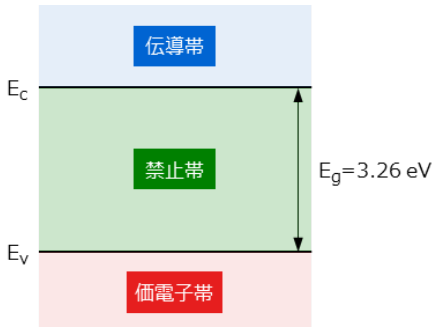


図 2.12　SiC のバンドギャップ

Siの高耐圧のパワーデバイスは、絶縁破壊電荷強度が低いため、高耐圧を実現するために、図2.13のように低濃度のn^-層の厚さ（距離）を確保する必要があります。しかしながら、低濃度のn^-層は抵抗率が大きいためにダイオードが導通したときの抵抗が大きくなります。

しかしながら、SiCでは、絶縁破壊電荷強度がSiの10倍近くあるため、Siと同じ耐圧を得るためのn^-層の濃度を高め、かつ、

厚さも薄くすることが可能となります。

また、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 μ ×電界 E ）に関係します。 μが大きいほど電流が流れやすく抵抗が小さくなり、その速度の限界が飽和速度もSiCはSiに比較して優れていることから、SiCは性能の高い素子を実現することが可能となります。

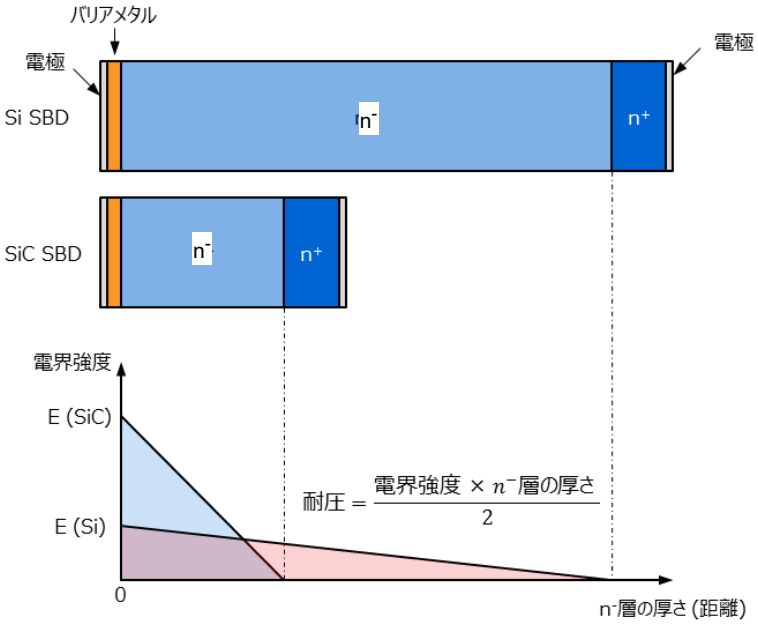


図 2.13　Si SBD と SiC SBD の電界の広がりイメージ図

2.2.2. 改良形 JBS 構造 SBD

SiC をはじめとした整流用途に使用するダイオードは、容量性負荷を充電するときに大きな電流が流れることから、高いパルス順電流能力 I_{FP}、または、I_{FSM} が要求されます。

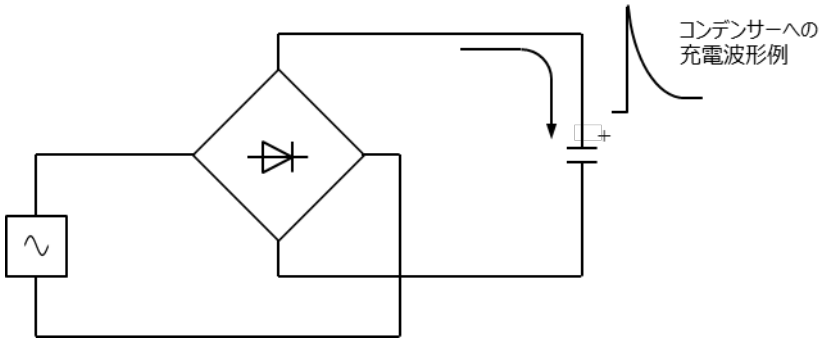


図 2.14　全波整流時のコンデンサへの充電電流波形例

当社の SiC SBD では、この要求に応えるために MPS (Merged PIN Schottky) 構造の概念を取り込んだ改良形 JBS 構造の製品を開発しました。

MPS 構造は図 2.15 に示すように、n^-層の一部に濃度の高い p^+層を拡散した構造になっています（当社では JBS 構造の p 層の一部を P^+化しています)。 SBD に大きな電流が流れると、ショットキー接合に加えて、この p^+層と n^-層の pn 接合ダイオードも導通します。 このとき、p^+層から n^-層に正孔が、n^+層から n^-層に電子が供給され、n^-層のキャリア濃度が高まる伝導度変調を起こします（2.1.6 参照)。 伝導度変調が起こると n^-層は高抵抗から低抵抗に変化し、大きな電流を流すことが可能となり電流サージ耐量を向上させることができます。

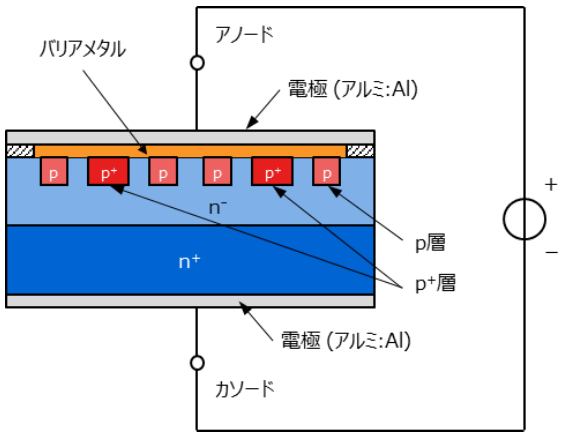


図 2.15　改良形 JBS 構造 SBD 断面イメージ図

図 2.16 に改良形 JBS 構造 SBD の順電流-順電圧特性イメージ図を示します。 改良形 JBS 構造 SBD は、高いパルス電流能力を持ち、かつ、大電流領域においても低い順方向電圧特性を実現することができます。

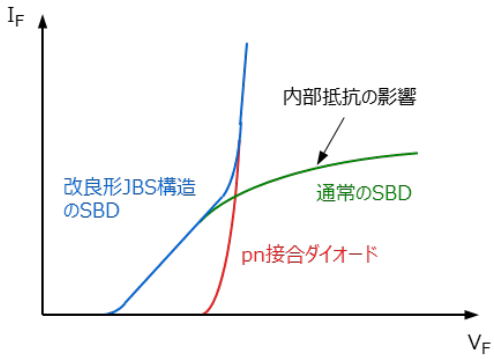


図 2.16　通常の SBD、pn 接合ダイオードおよび改良形 JBS 構造 SBD の順電流-順電圧特性イメージ図

3. 最大定格

3.1. 最大定格の意義

ダイオードに流し得る電流、印加可能な逆電圧、損失などの最大許容値は最大定格値として定められています。

半導体素子による回路を設計する上で最大定格を認識することは、素子を有効に動作させ、また、目標となる稼動時間に十分な信頼を確保する上からも、非常に大切なことです。

半導体製品の特徴の 1 つは、電気的特性が温度に非常に敏感なことです。 この特徴が最大定格を規定する大きな要因となっています。

例えば、素子に一定の逆電圧を印加した状態で、周囲温度が上昇して接合温度が規定の温度を超えた場合、逆電流が増大します。 この逆電流の増大は、素子が消費する逆電力損失を大きくします。 この電力損失によって、接合部の温度をさらに上昇させ、逆電流を増加させるといった悪循環が生じます。 この悪循環は、半導体素子を破壊させてしまう場合もあります。

絶対最大定格は、素子の寿命と信頼性を保証するために瞬時でも超えてはならない最大値です。 最大値は、素子を構成している材料・チップサイズ・外囲器形状・設計・製造条件によって規定されます。 データシートなどで最大定格と記載している場合、絶対最大定格と言う意味で用いています。

絶対最大定格とは、動作中に瞬時といえども定格値を超えてはならないとするものです。また、2 項目以上の規格値が 定められているとき、2 つの規格を同時にダイオードに印加することはできません。

なお、各最大定格は特に記載のない場合、室温（T_a=25℃）で規定しています。

3.2. ダイオード共通

以下で示す定格の表は東芝の例です。

3.2.1. 接合温度 T_j

接合温度 T_j は、素子を構成する材料と信頼度によって規定されていますが、接合温度 T_j は単に動作するというだけでなく、劣化、寿命など信頼性との兼ね合いで考えなければなりません。 一般に素子の劣化は、接合温度が高くなるにつれて加速され、平均寿命 L_m（時間)、接合温度 T_j（K）との間には A、B を素子固有の定数として式 3-1 の関係が認められています。

項目	記号	定格	単位
接合温度	Tj	150	°C

$$\ln L_m \approx A + \frac{B}{T_j} \qquad \text{(3-1)}$$

L_m	:	平均寿命	(時間)
A	:	素子固有の定数	
B	:	素子固有の定数	
T_j	:	接合温度（絶対温度）	(K)

従って、目標の寿命を達成するための素子の接合温度が決定されます。 また、逆電流の温度依存性は式 3-2 で表されます。

$$\ln I_R \approx A \cdot \left(-\frac{q \cdot V}{2 \cdot K \cdot T_j}\right) \quad \cdots\cdots (3\text{-}2)$$

A	:	素子固有の定数	
q	:	電子の電荷（1.602×10^{-19}）	(C)
K	:	ボルツマン定数（1.381×10^{-23}）	($J\cdot K^{-1}$)
T_j	:	接合温度（絶対温度）	(K)
V	:	印加電圧	(V)

式 3-2 から分かるように高温時の逆電流は大きく、逆電流による電力損失も大きくなります。 一般的な Si（シリコン）ダイオードではこの電力損失により、接合温度が上昇 → 逆電流が増加 → 損失が増加 → 接合温度が上昇という循環を生じて熱暴走を引き起こす場合があります。

この熱暴走を抑制するためにも、接合温度や放熱条件などを十分に考慮する必要があります。

3.2.2. 許容損失 P_D, P

規定の放熱条件において、連続的に素子で消費させることのできる許容損失の最大値です。 許容損失は使用条件（素子が実装される基板の種類やサイズ、周囲温度および放熱条件など）によって変わります。 T_C=25 °C 時の許容損失は周囲温度 T_a=25 °C で素子に無限大放熱器を付けた場合に等しい条件の値です。

項目	記号	定格	単位
許容損失	P_D	1	W

面実装素子や放熱器に取り付けができないスルーホール素子（自立素子）が T_a=25 °C 時に定常状態で動作し、接合温度が安定しているときの許容損失は式 3-3 で求めることができます。

$$P_D = \frac{T_j - 25\ °C}{R_{th(j-a)}} \quad \cdots\cdots (3\text{-}3)$$

P_D	:	許容損失	(W)
T_j	:	接合温度	(°C)
$R_{th(j-a)}$	:	接合-雰囲気間熱抵抗	(°C/ W)

また、過渡状態の許容損失 P_{DP} はデータシートに記載された過渡熱インピーダンス特性により式 3-4 で求められます。

$$P_{DP} = \frac{T_j - 25\ °C}{r_{th(j-a)(t)}} \quad \cdots\cdots (3\text{-}4)$$

$r_{th(j-a)(t)}$: パルス幅 t 時の接合-雰囲気間熱インピーダンス (°C/ W)

なお、放熱器に取り付けることができるスルーホール素子の定常状態と過渡状態の許容損失は、それぞれ式 3-5、式 3-6 で算出することができます。

$$P_D = \frac{T_j - 25\ °C}{R_{th(j-c)}} \quad \cdots\cdots (3\text{-}5)$$

P_D	:	許容損失	
T_j	:	接合温度	(°C)
$R_{th(j-c)}$	:	接合-外囲器間熱抵抗	(°C/ W)

$$P_{DP} = \frac{T_j - 25}{r_{th(j-c)(t)}} \quad \cdots\cdots (3\text{-}6)$$

P_D	:	許容損失	(W)
T_j	:	接合温度	(°C)
$r_{th(j-c)(t)}$	:	パルス幅 t 時の接合-外囲器間熱インピーダンス	(°C/ W)

3.2.3. 保存温度 T_{stg}

保存温度 T_{stg} は、素子を動作させない状態で保存することのできる雰囲気温度範囲で、これはチップ以外に素子を構成する材料の特性と信頼度から規定されます。 また、保存の際には端子の酸化などに十分注意して、保存方法に配慮してください。

項目	記号	定格	単位
保存温度	T_{stg}	-55 ～ 150	°C

3.2.4. 絶縁耐圧 $V_{ISO(RMS)}$, V_{dis}

フルモールド外囲器[*1] 製品において、モールド表面部分と電極端子との 絶縁耐圧を示すものです。 交流電圧を規定時間印加して確認を行います。 絶縁耐圧は交流電圧の実効値で表されます。

*1 :外囲器全体がモールド樹脂で覆われた絶縁外囲器

項目	記号	定格	単位
絶縁耐圧	$V_{ISO(RMS)}$[注 1]	2000	V

注 1 :t=1 s

3.2.5. 締め付けトルク TOR

スルーホール素子（自立素子）をワッシャーを通したネジで放熱器に取り付ける際の最大トルク許容値を示します。 放熱器に素子をネジで取り付けるときは、締め付けトルクを管理する必要があります。 締め付けトルクが低すぎるとネジが緩み放熱性が悪化し、高すぎると素子を破損することになります。

項目	記号	定格	単位
締め付けトルク	TOR	0.6	N·m

各スルーホール素子の締め付けトルク定格を表 3.1 に示します。

表 3-1　スルーホール素子の最大締め付けトルク

外囲器	最大締め付けトルク
TO-220-2L	0.6 N·m
TO-220F-2L	0.6 N·m
TO-247	0.8 N·m

3.3. スイッチングダイオード，整流ダイオード，共通

3.3.1. 電圧定格

(1) ピーク繰り返し逆電圧 V_{RRM}

T_a=25 °C、または、規定された温度において、繰り返し印加できる逆電圧の最大許容瞬時値です。 商用周波数の正弦波半波電圧の最大値で表されます。

項目	記号	定格	単位
繰り返しピーク逆電圧	V_{RRM}	400	V

(2) ピーク逆電圧，せん頭逆電圧 V_{RM}

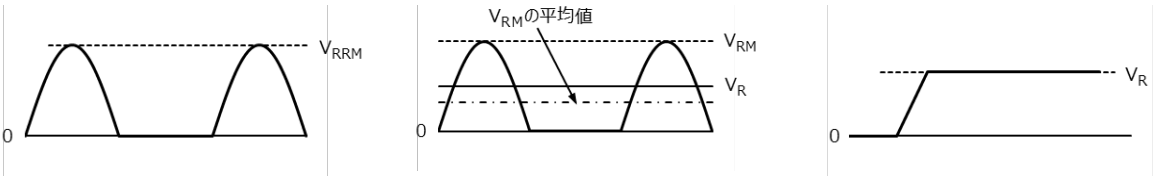
平均電圧が V_R を超えない範囲内において、逆方向に印加できる交流電圧の最大値です。

項目	記号	定格	単位
ピーク逆電圧	V_{RM}	85	V

(3)逆電圧，直流逆電圧 V_R

T_a=25 °C または、規定された温度において、逆方向に印加できる直流電圧の最大値です。

項目	記号	定格	単位
逆電圧	V_R	80	V



ピーク繰り返し逆電圧（V_{RRM}）　ピーク逆電圧（V_{RM}）　直流逆電圧（V_R）

図 3.1　電圧定格の定義

3.3.2. 電流定格

3.3.2.1. 定常動作電流定格

下記に示す定格は、定常動作をしている状態において繰り返し印加が可能ですが、接合温度定格 T_j により制限される電流定格です。

(1) 平均順電流 $I_{F\ (AV)}$

指定された温度で、商用周波数（50 Hz、または、60 Hz）の正弦半波（導通角 180 °）、または、指定された条件で順方向に流すことのできる最大平均電流値、または、指定された条件のもとでの順方向矩形波の平均電流値です。

項目	記号	定格	単位
平均順電流	$I_{F(AV)}$	1	A

(2) 平均整流電流 I_O

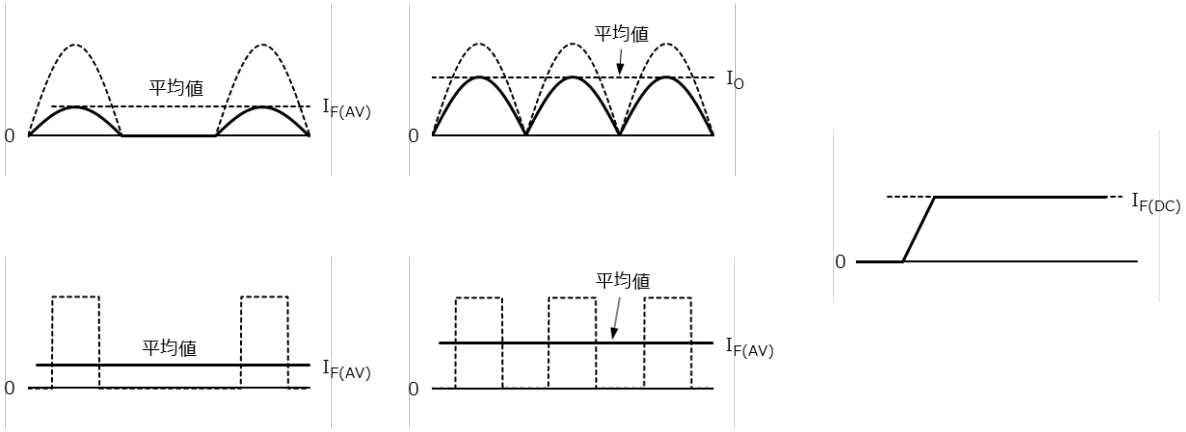
指定された温度で、商用周波数（50 Hz、または、60 Hz）の正弦全波（導通角 360 °）で順方向に流すことのできる最大平均電流値、または、指定された条件のもとでの順方向矩形波の平均電流値です。

項目	記号	定格	単位
平均整流電流	I_O	100	mA

(3) 直流順電流 $I_{F(DC)}$

指定された条件で、順方向に流すことのできる直流電流の最大値です。

項目	記号	定格	単位
直流順電流	$I_{F(DC)}$	12	A



平均順電流 $I_{F(AV)}$　　平均整流電流 I_O　　直流順電流 $I_{F(DC)}$

図 3.2　定常動作電流定格の定義

3.3.2.2. 瞬時パルス電流定格

瞬時のパルス電流定格は、指定された条件で 1 回のみ流すことのできる電流定格であり、繰り返し印加することはできません。 製品寿命中には、ほとんど印加されない電流を想定したものです。

(1) ピーク順電流, せん頭順電流 I_{FM}

指定された温度で、1.3.2.1(2)の平均整流電流 I_O を超えない範囲で流すことのできる交流電流の最大値です。

項目	記号	定格	単位
ピーク順電流	I_{FM}	300	mA

(2) パルス順電流 I_{FP}

指定された条件と指定されたパルス幅にて、順方向に流すことのできる矩形波電流の最大値です。

項目	記号	注記	定格	単位
パルス順電流	I_{FP}	(注 2)	120	A

注 2: t=50μs

(3) 非繰り返しピーク順電流 I_{FSM}

指定された温度で、50 Hz または 60 Hz の商用正弦半波 1 サイクル、10 ms のパルス幅を持つ矩形波、または、指定された条件の電流を順方向に流したときに素子が破壊しない最大電流値です。

項目	記号	注記	定格	単位
非繰り返しピーク順電流	I_{FSM}	(注 3)	97	A

注 3：f=50 Hz（正弦半波 t=10 ms）

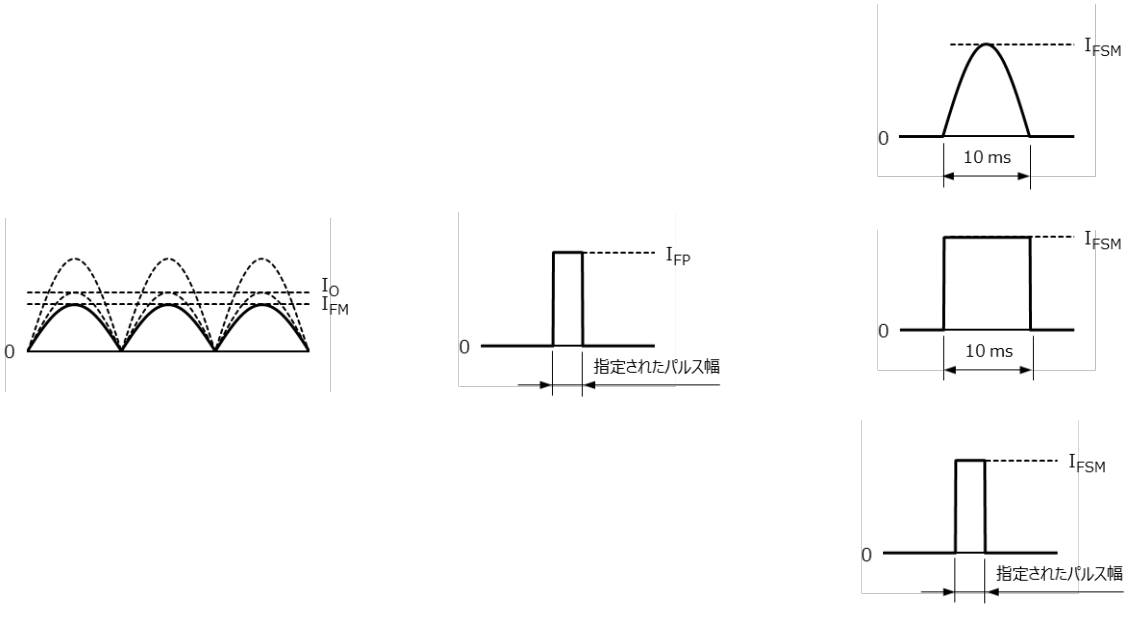
(4) 電流 2 乗時間積 I^2t

10 ms 以下のパルス幅の単発正弦半波で、順方向に流すことのできる非繰り返しの最大電流値です。 式 3-7 より算出することができます。

項目	記号	定格	単位
電流 2 乗時間積	I^2t	18	A

$$I^2t = \left[\frac{I_{FSM\ (50\ Hz)}}{\sqrt{2}} \right]^2 \times 0.01 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}7)$$

I	:	通電期間中の電流実効値	(A)
t	:	通電パルス幅	(s)
I_{FSM}	:	非繰り返しピーク順電流	(A)



ピーク順電流，せん頭順電流 I_{FM}　　パルス順電流 I_{FP}　　非繰り返しピーク順電流 I_{FSM}

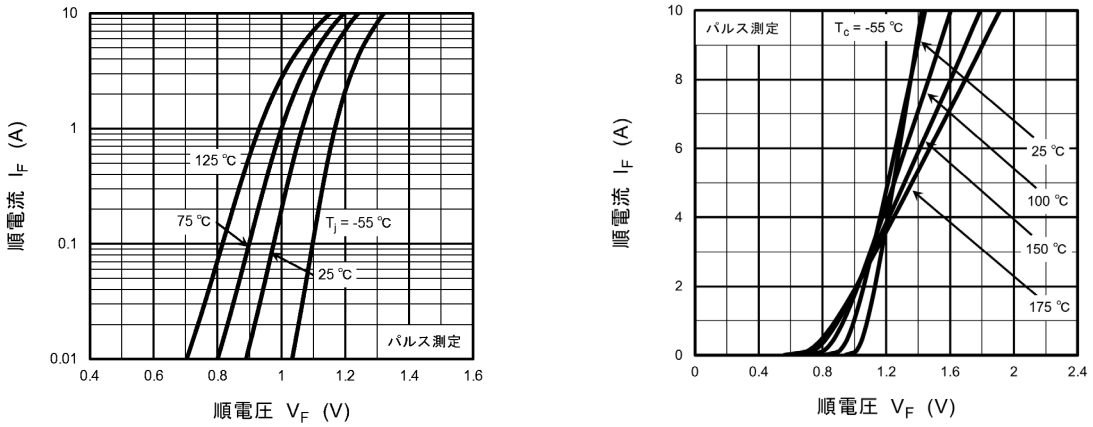
図 3.3　瞬時パルス電流定格の定義

4. 電気的特性

4.1. ショットキーバリアダイオード（SBD）共通

4.1.1. 順電圧、ピーク順電圧 V_F,V_{FM}

指定された温度で、規定の順電流を流したときに生じるアノードとカソード間の電圧降下の値です。 順電圧の温度特性については、通常、Si（シリコン）ダイオードは負の温度係数を持ち、SiC SBD では大電流領域で正の温度係数を持ちます。このため、高温、高電圧の状況下で Si ダイオードを並列接続で使用する場合などには、熱暴走に注意した設計が必要です。



(a) **(b)**

図 4.1 Si SBD と SiC SBD の順電流-順電圧特性例

SiC SBD の順方向の I_F-V_F 特性例を図 4.1 (b) に示します。 小電流領域の順電流 I_F では図 4.1 (a) の Si SBD と同様に順電圧 V_F は負の温度係数を持っていますが、高温時の V_F は正の温度係数を持ちます。 この温度特性の変化は、SiC 内の抵抗成分が温度により変化することにより生じると考えられ、下記の 2 点が要因として挙げられます。

(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、小電流では (1) の影響が大きく、大電流になるに従って、(2) の影響を受け図 4.1 (b) のような特性を示すと考えられます。 大電流で温度係数が反転する現象は Si ダイオードでも平均順電流や直流順電流の定格電流を超えたレベルで生じます。

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) の現象により発熱による正帰還が掛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 の大電流部分では (2) の現象により負帰還となるので、この領域を使用して導通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。

4.1.2. 逆電流 I_R、繰り返しピーク逆電流 I_{RRM}

規定された温度で、規定の逆電圧を印加したときに、アノードとカソード間に逆方向に流れる電流値です。

Si ダイオードの I_{RRM} の温度依存特性は一般に式 4-1 により表され、接合部温度 T_j に対して指数関数的に正の依存温度係数を持ちます。

$$I_{RRM} \simeq I_S \cdot exp\left(-\frac{q \cdot V_R}{2 \cdot K \cdot T_j}\right) \quad \cdots\cdots (4\text{-}1)$$

I_{RRM}	:	Si ダイオードの逆電流	(A)
I_S	:	飽和電流	(A)
q	:	電子の電荷	(C)
V_R	:	印加逆電圧	(V)
K	:	ボルツマン定数 (1.381×10^{-23})	$(J \cdot K^{-1})$
T_j	:	接合温度(絶対温度)	(K)

SBD、FRD (Fast Recovery Diode) などの高速整流ダイオードは、一般の Si 整流ダイオードに比べて I_{RRM} は大きく、使用環境が厳しい場合 (高温、高電圧など)、逆方向損失の増加により熱暴走を起こし、素子の劣化や破壊に至る場合があります。 このため、順方向のみならず、逆方向損失も考慮した放熱設計をしてください。

4.1.3. 端子間容量 C_t、接合容量 C_j

アノードとカソード間に規定された逆電圧を印加したときの端子間静電容量です。

4.1.4. 総電荷量 (Total capacitive charge) Q_{cj}

Q_{cj} は、SiC ショットキーバリアダイオード (SiC SBD) で規定されている規格で、アノードとカソード間の接合容量を充放電する総電荷量です。 Qcj は式 4-2 で求められます。

$$Q_{cj} = \int C_j \cdot V_{AK}\, dv \quad \cdots\cdots (4\text{-}2)$$

C_{cj}	:	総電荷量	(C)
C_j	:	接合容量	(F)
V_{AK}	:	カソード-アノード間逆電圧	(V)

4.1.5. 順回復時間 t_{fr}

図 4.3 のように、順方向電流を流そうとしたときの、ダイオードのターンオン時間です。 立ち上がりの急峻なパルスが印加された場合、瞬時的にキャリアーが蓄積されて導通状態となりえず、ある一定の時間を経過することが必要とされ、この期間、ダイオードは順方向であっても高抵抗の状態にあります。 言い換えれば、t_{fr} は電流が素子前面に広がるまでの時間とも言えます。 なお、t_{fr} は指定された順電流 i_F を印加後、安定した順電圧 v_F の 1.1 倍まで低下する時間で規定されます。

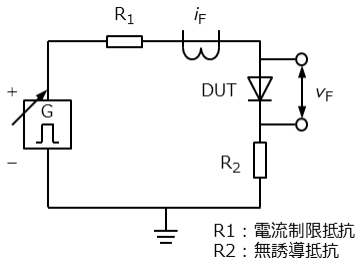


図 4.2　順回復時間 t_{fr} 測定回路例

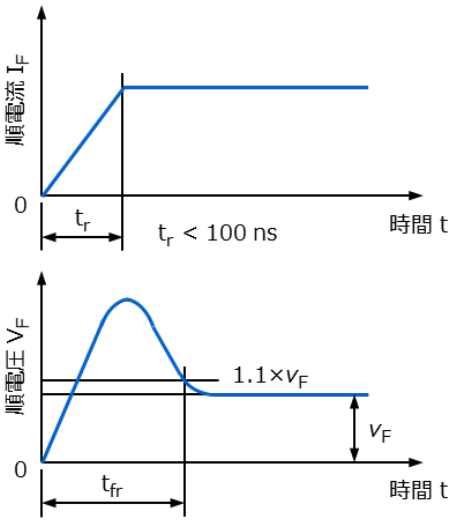
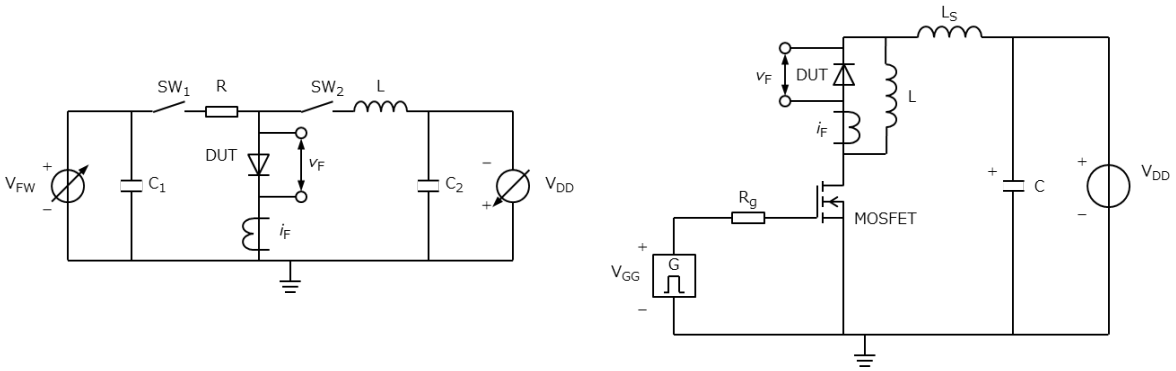


図 4.3　順回復時間 t_{fr} 波形例

4.1.6. 逆回復時間 t_{rr}

指定された条件のもとで、素子の逆方向電流が消滅し、素子が回復するのに要する時間です。 t_{rr} は、の順電流 i_F=0 に減少した時点から、ピーク逆電流 i_{rr} の 10 %にまで回復するまでの時間で規定されます。



(a)　　(b)

図 4.4　逆回復時間 t_{rr} 測定回路例

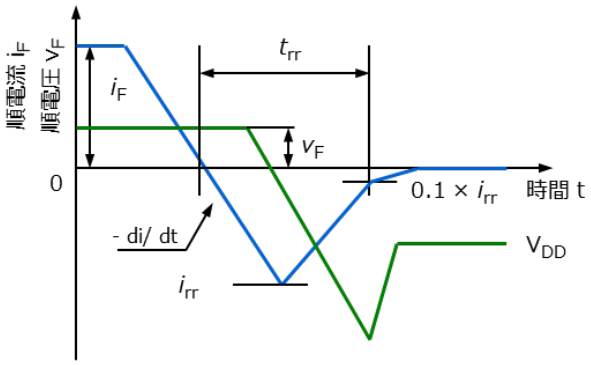


図 4.5　逆回復時間 t_{rr} 波形例

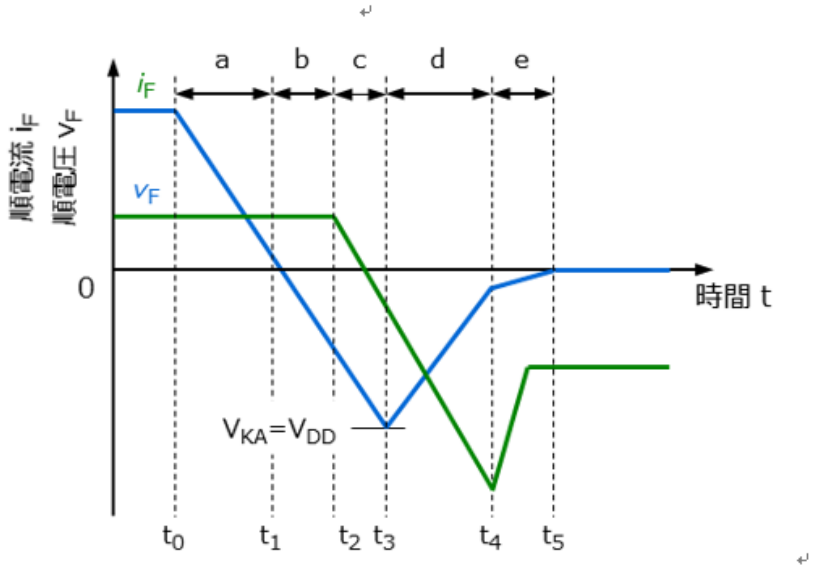


図 4.6　逆回復動作

図 4.4(b)の回路図でダイオードを使用したときの、逆回復動作（図 4.6）を下記します。

期間 a ($t_0 \rightarrow t_1$)

ダイオードがオンからオフに移行します。ダイオード内部の正孔は陰極側へ、電子は陽極側に引き寄せられて直線的に電流が減少します。

期間 b ($t_1 \rightarrow t_2$)

n^-層に蓄積したキャリアーを排出するため、電流は逆方向に流れます。

期間 c ($t_2 \rightarrow t_3$)

ダイオードのカソード・アノード間電圧 V_{KA} が 0（ゼロ）になった後、空乏層が拡がり始め、V_{KA} は増加していきます。 同

時に、蓄積されたキャリアーが排出され続けて、$V_{KA}=V_{DD}$ になると逆電流は最大値となります。 このときの逆電流の最大値を逆回復電流 i_{rr} と呼びます。

期間 d ($t_3 \rightarrow t_4$)

通常、回路には浮遊インダクタンス L_S が存在するためにダイオードのカソード・アノード間には、$V_{surge} = L_S \frac{di}{dt}$ の電圧が V_{DD} に重畳されるため、ダイオードの耐圧を超えないことに注意が必要です。 このときも継続して蓄積キャリアーが排出され逆電流が流れ続けます。

期間 e ($t_4 \rightarrow t_5$)

空乏層が逆バイアス電圧 V_{DD} に比例した厚さまで拡がりきり、このときに、まだ残存しているキャリアーが再結合して消滅するため逆電流は徐々に減少します。

測定条件 ：i_F=1 A, di/ dt=-30 A/ μs, Ta=25°C

縦軸 ： 電流 0.5 A/ div
横軸 ： 時間 50 ns/ div

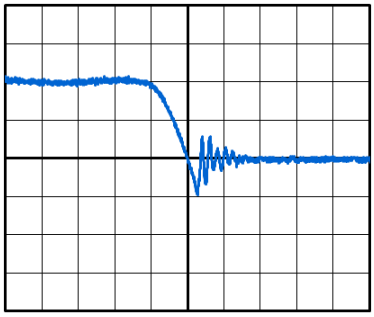


図 4.7 HED t_{rr} 波形例

縦軸 ： 電流 0.5 A/ div
横軸 ： 時間 50 ns/ div

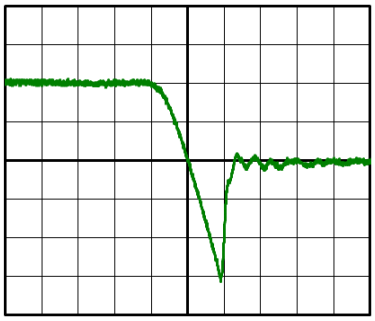


図 4.8 S-FRD t_{rr} 波形例

縦軸 ： 電流 2 A/ div
横軸 ： 時間 100 ns/ div

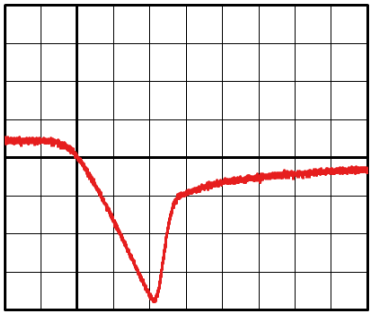


図 4.9 汎用ダイオード t_{rr} 波形例

なお、ショットキーバリアダイオードはユニポーラ素子のために、pn 接合のダイオードのような t_{rr} は発生しませんが、接合容量により t_{rr} と同様なリカバリー波形が観測されます。 しかしながら、このときの電流値と時間は、図 4.10、図 4.11 のように HED[*2](High Efficiency Diode:高効率ダイオード) と比較しても非常に小さい値となります。

*2：LLD (Low Loss Diode) と呼ばれることもあります。

測定条件 ：i_F=1 A, di/ dt=-30 A/ μs, Ta=25°C

縦軸 ： 電流 0.5 A/ div
横軸 ： 時間 50 ns/ div

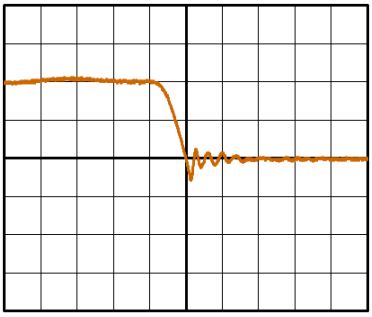


図 4.10 SBD リカバリー波形例

縦軸 ： 電流 0.5 A/ div
横軸 ： 時間 50 ns/ div

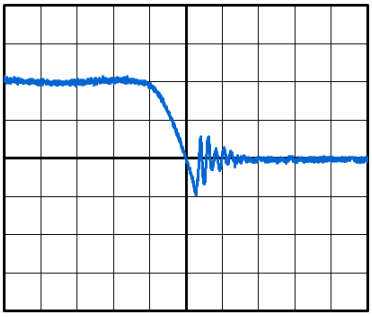


図 4.11 HED リカバリー波形例

スイッチングダイオードのパラメトリックサーチはこちら → Click Here

整流ダイオードのパラメトリックサーチはこちら → Click Here

ショットキーバリアダイオードの製品ページはこちら → Click Here

ショットキーバリアダイオードのパラメトリックサーチはこちら → Click Here

SiC ショットキーバリアダイオードの製品ページはこちら → Click Here

SiC ショットキーバリアダイオードのパラメトリックサーチはこちら → Click Here

TVS ダイオード（ESD 保護用ダイオード）の製品ページはこちら → Click Here

TVS ダイオード（ESD 保護用ダイオード）のパラメトリックサーチはこちら → Click Here

ツェナーダイオードの製品ページはこちら → Click Here

ツェナーダイオードのパラメトリックサーチはこちら → Click Here

SiC ショットキーバリアダイオード（アプリケーションノート）はこちら → Click Here

絶対最大定格と電気的特性:SiC ショットキーバリアダイオード（アプリケーションノート）はこちら → Click Here

昇圧回路用ショットキーバリアダイオードの選定方法（アプリケーションノート）はこちら → Click Here

ESD 保護用ダイオード(TVS ダイオード)の基礎（アプリケーションノート）はこちら → Click Here

過電圧対策に有効なツェナーダイオードと ESD 保護用ダイオード（アプリケーションノート)はこちら → Click Here

ダイオードの FAQ はこちら → Click Here

リファレンスデザインはこちら → Click Here

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エア、ソフトウエ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、お客様のハードウエア・ソフトウエア・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。