ダイオードの基礎
（整流ダイオード）

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、整流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. pn 接合ダイオード 7
2.1.1. pn 接合とは 7
2.1.2. 無バイアス状態の pn 接合 7
2.1.3. 順バイアス状態の pn 接合 8
2.1.4. 逆バイアス状態の pn 接合 9
2.1.5. pn 接合ダイオードの特性 10
2.1.6. pin ダイオード 12
3. 最大定格 14
3.1. 最大定格の意義 14
3.2. ダイオード共通 14
3.2.1. 接合温度 T_j 14
3.2.2. 許容損失 P_D, P 15
3.2.3. 保存温度 T_{stg} 16
3.2.4. 絶縁耐圧 $V_{ISO(RMS)}$, V_{dis} 16
3.2.5. 締め付けトルク TOR 16
3.3. スイッチングダイオード, 整流ダイオード, 共通 17
3.3.1. 電圧定格 17
3.3.2. 電流定格 18
4. 電気的特性 21
4.1. スイッチングダイオード、整流ダイオード 共通 21
4.1.1. 順電圧、ピーク順電圧 V_F,V_{FM} 21
4.1.2. 逆電流 I_R、繰り返しピーク逆電流 I_{RRM} 22
4.1.3. 端子間容量 C_t、接合容量 C_j 22
4.1.4. 総電荷量 (Total capacitive charge) Q_{cj} 22
4.1.5. 順回復時間 t_{fr} 22

4.1.6. 逆回復時間 t_{rr} 23
製品取り扱い上のお願い 27

図目次

図 1.1　ダイオードの種類による分類 6
図 2.1　真性半導体の フェルミ準位 7
図 2.2　p 形半導体の フェルミ準位 7
図 2.3　n 形半導体の フェルミ準位 7
図 2.4　p 形半導体と n 形半導体の 7
図 2.5　p 形半導体と n 形半導体の 7
図 2.6　pn 接合のバンド図 8
図 2.7　pn 接合が無バイアス状態時のバンド図 8
図 2.8　pn 接合に順バイアスを印加したときのバンド図 9
図 2.9　pn 接合に逆バイアスを印加したときのバンド図 9
図 2.10　pn 接合ダイオードの電流 - 電圧特性イメージ図 11
図 2.11　pn 接合ダイオードの逆電流 - 周囲温度特性例 12
図 2.12　pin 形ダイオードの構造イメージ図 12
図 2.13　pin ダイオードによる高耐圧化 13
図 2.14　伝導度変調時の n^-層の不純物濃度の変化（イメージ図） 13
図 3.1　電圧定格の定義 18
図 3.2　定常動作電流定格の定義 19
図 3.3　瞬時パルス電流定格の定義 20
図 4.1　Si SBD と SiC SBD の順電流-順電圧特性例 21
図 4.2　順回復時間 t_{fr} 測定回路例 23
図 4.3　順回復時間 t_{fr} 波形例 23
図 4.4　逆回復時間 t_{rr} 測定回路例 23
図 4.5　逆回復時間 t_{rr} 波形例 24
図 4.6　逆回復動作 24
図 4.7 HED t_{rr} 波形例 25
図 4.8 S-FRD t_{rr} 波形例 25
図 4.9 汎用ダイオード t_{rr} 波形例 25
図 4.10　SBD リカバリー波形例 25
図 4.11　HED リカバリー波形例 25

表目次

表 3-1　スルーホール素子の最大締め付けトルク 17

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。

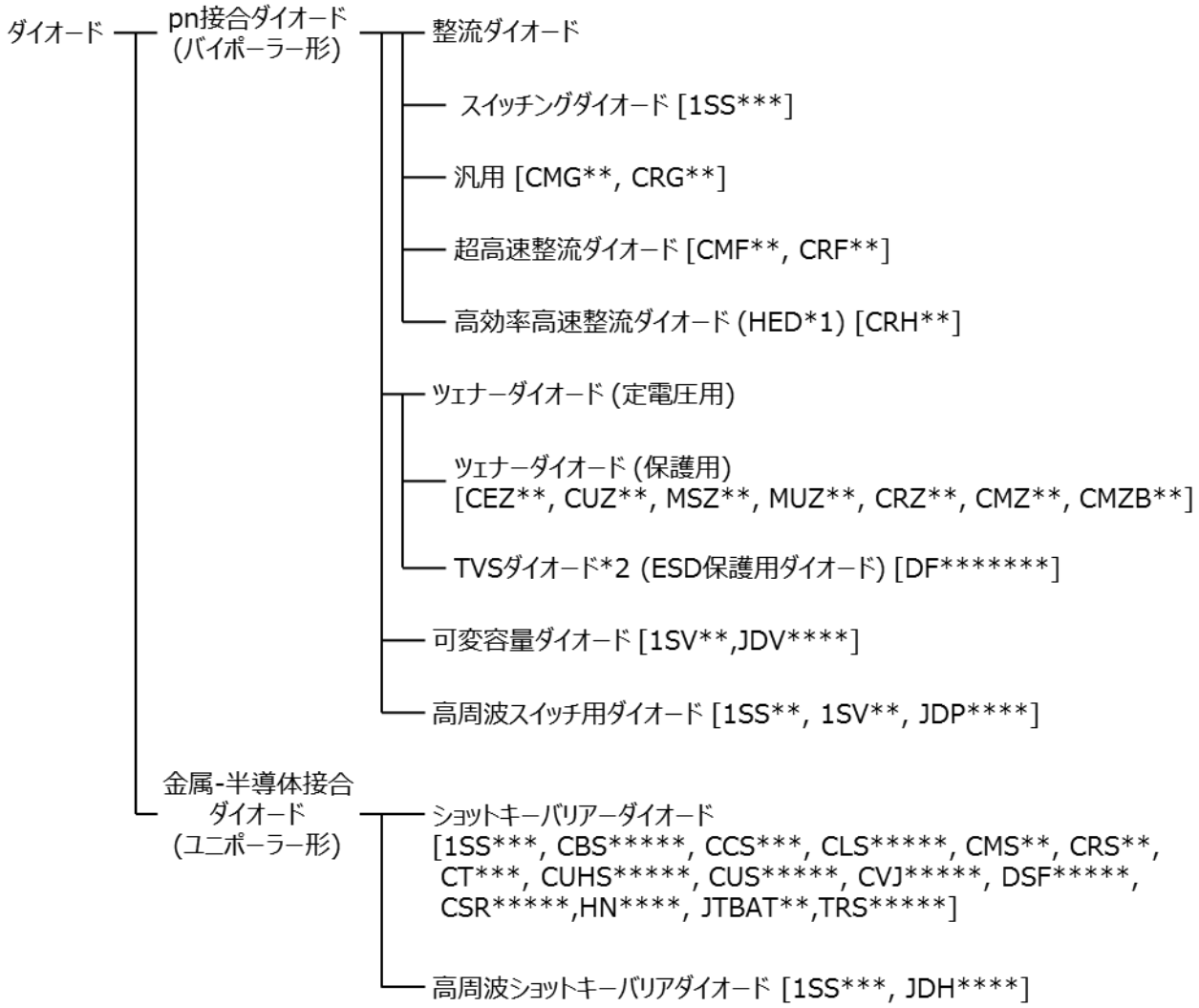


図 1.1　ダイオードの種類による分類

2. 各種ダイオードの概要

2.1. pn 接合ダイオード

2.1.1. pn 接合とは

pn 接合とは結晶格子配列が保たれた状態で p 形半導体と n 形半導体が接触していることです。 p 形半導体と n 形半導体のフェルミ準位は高さが異なります。 フェルミ準位は p 形領域では価電子帯の最も高いエネルギー上端の近くに、n 形領域では伝導帯の最も低いエネルギーの下端の近くに存在しています。

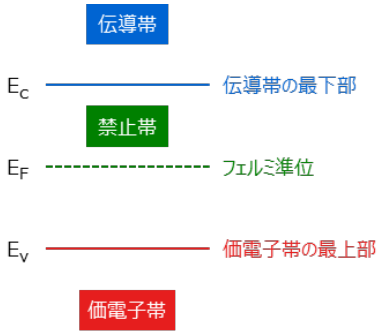


図 2.1 真性半導体のフェルミ準位

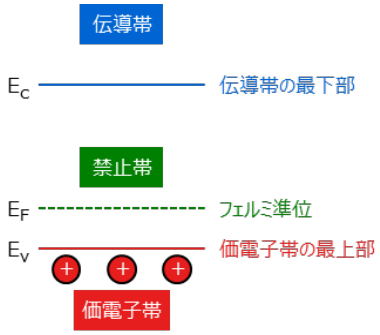


図 2.2 p 形半導体のフェルミ準位

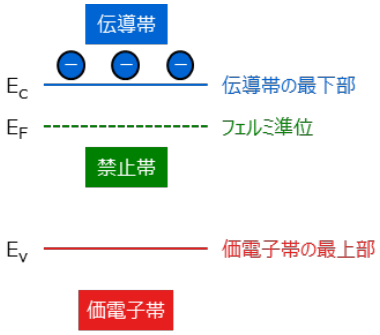


図 2.3 n 形半導体のフェルミ準位

2.1.2. 無バイアス状態の pn 接合

pn 接合の近傍では、n 形半導体の電子は p 形半導体へ拡散して p 形半導体の正孔（ホール）と再結合します。 反対に p 形半導体の正孔は、n 形半導体へ拡散して、n 形半導体の電子と再結合します。 n 形半導体、p 形半導体に拡散したキャリアが正孔と電子と再結合することにより、図 2.5 のようにキャリアが存在しない空乏層と呼ばれる領域が発生します。

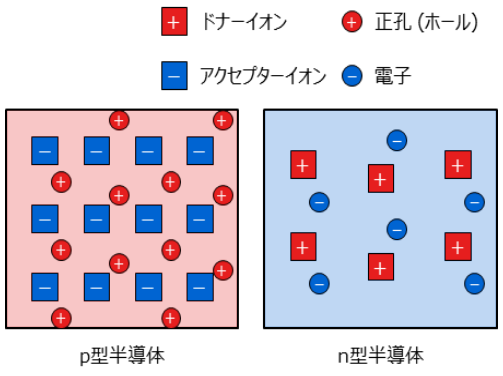


図 2.4 p 形半導体と n 形半導体の接合前の状態

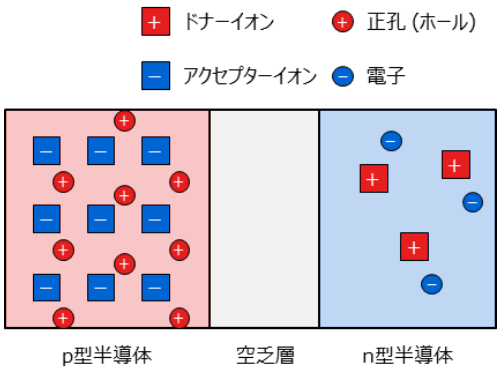


図 2.5 p 形半導体と n 形半導体の接合後の状態

キャリアの拡散により、図 2.6 のように p 形半導体のフェルミ準位は上昇、n 形半導体のフェルミ準位は低下して、pn 接合後には新しいフェルミ準位に移行します。 このとき、伝導帯の準位の低下は両領域における仕事関数の差に等しく、そして両領域の間に $q \cdot V_D$ という拡散電位が現われます。

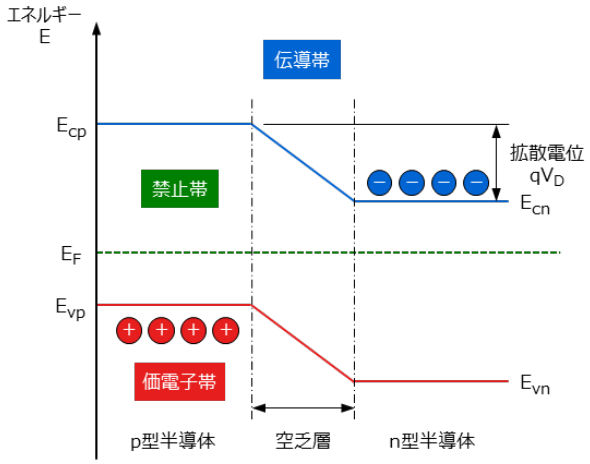


図 2.6　pn 接合のバンド図

図 2.7 は、pn 接合にバイアスが印加されていない状態での、p 形半導体と n 形半導体に存在する電子密度と正孔密度を示しています。 E_{cp} より高いエネルギーを持つ n 形半導体内の電子は、p 形半導体の領域に移動することができます。 また、同様に、p 形半導体内の Evn よりも低いエネルギーを持つ正孔は、n 形半導体の領域に移動することができます。 このとき、n 形半導体内の電子密度 n_n と p 形半導体内の電子密度 n_p は、ほぼ等しく $n_n \approx n_p$ の関係があることから電子の移動は止まり平衡状態が保たれます。 p 形半導体内の正孔密度 p_n と n 形半導体内の正孔密度 p_p も同様の関係が成り立ちます。

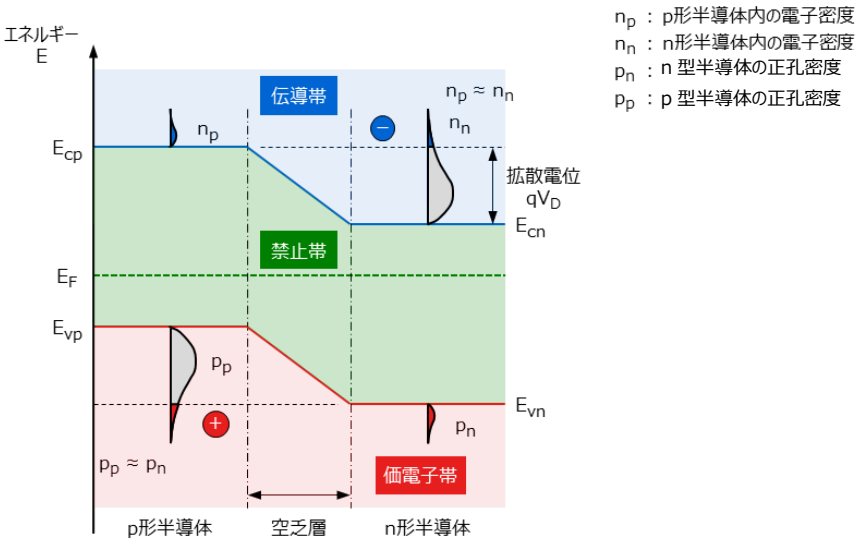


図 2.7　pn 接合が無バイアス状態時のバンド図

2.1.3. 順バイアス状態の pn 接合

pn 接合に順方向バイアス（p 形半導体に”+”、n 形半導体に”－”）の $q \cdot V_B$ を印加すると、無バイアス時の拡散電位

$q \cdot V_D$ から、$q(V_D-V_B)$ に拡散電位が減少します。 これにより、Ecp より高いエネルギーを持つ n 形半導体内の電子密度は p 形半導体内の電子密度より多くなり、n 形半導体から p 形半導体へ多量の電子が移動することができ、同時に p 形半導体内の多くの正孔も n 形半導体内に移動して拡散することにより電流を流すことができます。

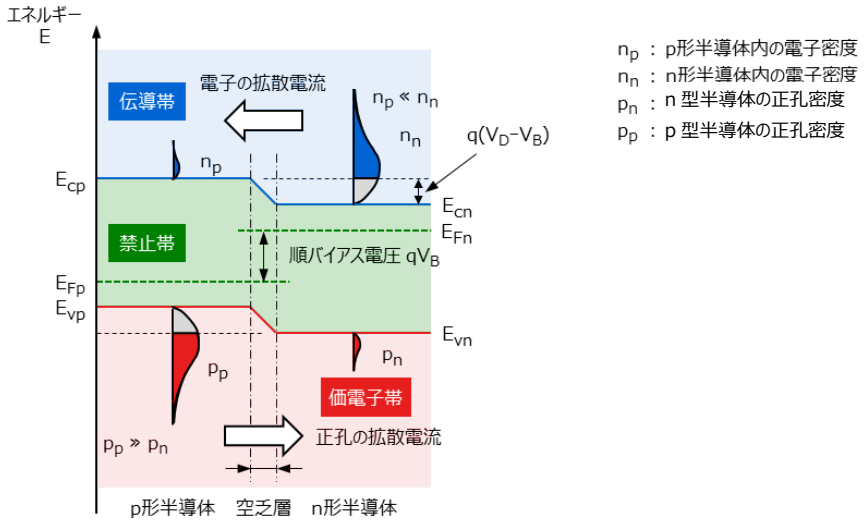


図 2.8　pn 接合に順バイアスを印加したときのバンド図

2.1.4. 逆バイアス状態の pn 接合

pn 接合に逆バイアス（p 形半導体に”－”、n 形半導体に”+”）の qV_R を印加すると、無バイアス時の拡散電位 $q \cdot V_D$ から、$q(V_D+V_R)$ に拡散電位が増加します。 これにより、Ecp より高いエネルギーを持つ n 形半導体内の電子密度は、ほぼ無くなります。 p 形半導体でも同様にほぼ移動できる正孔が無くなり、キャリアの移動ができなくなることから電流が流れない状態になります。

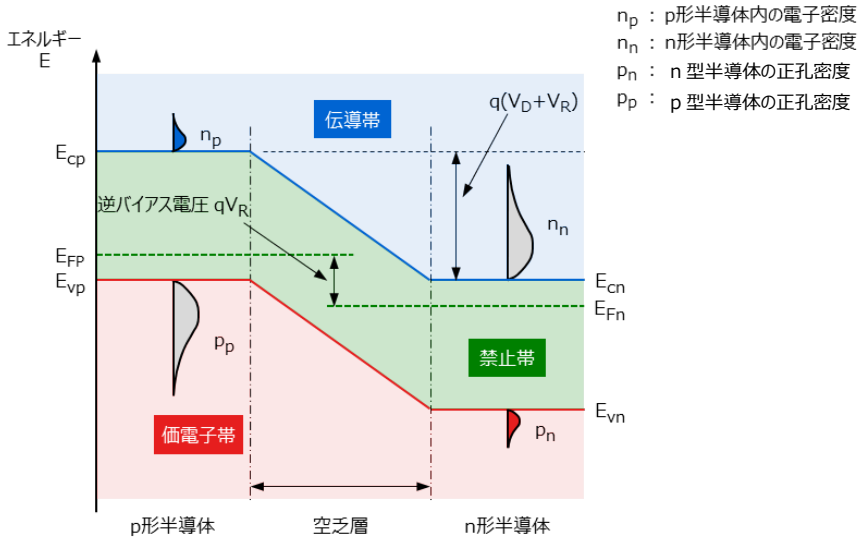


図 2.9　pn 接合に逆バイアスを印加したときのバンド図

2.1.5. pn 接合ダイオードの特性

pn 接合で構成されたダイオードの順電流 I_F と順電圧 V_F の関係は、式 2-1 で表されます。この式は、小電流領域に適用され、大電流領域ではダイオードの内部抵抗による電圧降下が発生するために適用することができません。

$$I_F = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_F}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}1)$$

I_F	:	順電流	(A)
I_S	:	飽和電流	(A)
q	:	電子の電荷 (1.602×10^{-19})	(C)
V_F	:	順電圧	(V)
K	:	ボルツマン定数 (1.381×10^{-23})	($J \cdot K^{-1}$)
T	:	接合温度（絶対温度）	(K)

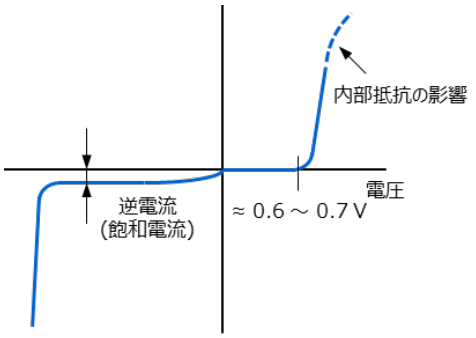


図 2.10　pn 接合ダイオードの電流 - 電圧特性イメージ図

pn 接合ダイオードの電流―電圧特性のイメージ図 2.10 に示します。 Si ダイオードでは、0.6～0.7V の順方向バイアスを印加すると順電流が立ち上がり始めます。

なお、Si ダイオードでの順電圧 V_F の温度特性は、約-2 mV/ °C と負の温度係数を持っています。 しかし、大電流領域では内部抵抗による電圧降下分の温度係数が正となるための温度係数の値は小さくなります。

ダイオードの逆方向に電圧を印加したとき、流れる電流を逆電流 I_R[*3] または飽和電流 I_S と呼びます。 I_R の近似式は、式 2-2 で表されます。

*3： 漏れ電流、リーク電流と呼ぶこともあります。

$$I_R = I_{R0} \cdot e^{k(T-T_0)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}2)$$

I_R	:	温度 T における逆電流	(A)
I_{R0}	:	規準温度 T_0 における逆電流	(A)
k	:	半導体材料で決定する定数（Si の場合、約 0.1/ °C）	
T	:	温度	(°C)
T_0	:	基準温度	(°C)

I_R の温度特性例を図 2.11 に示します。 この例では、ΔT_a=75°C の温度上昇で、I_R は約 2 桁上昇することがわかります。

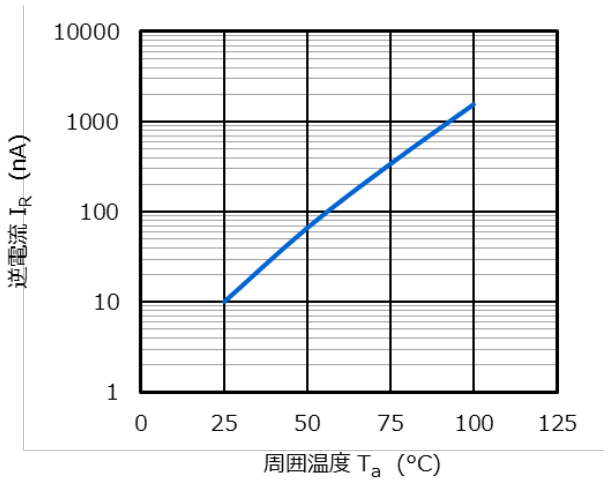


図 2.11　pn 接合ダイオードの逆電流 - 周囲温度特性例

2.1.6. pin ダイオード

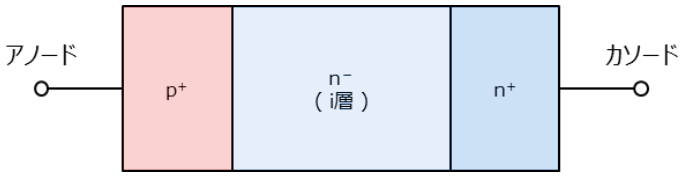


図 2.12　pin 形ダイオードの構造イメージ図

pn 接合を用いた通常の Si ダイオードは、図 2.12 のように p^+層と n^+層の間に厚く、不純物濃度の薄い n^{-*4} 層を挟んだ構造となっています。 n^-層は、真性半導体に近い不純物濃度から i (intrinsic) 層と呼ばれ、p-i-n の構造から pin ダイオードと呼ばれます。 pin ダイオードは、下記のような特長を持ちます。

*4：n^-層は、i 層以外にも高抵抗層、ドリフト層とも呼ばれることもあります。

1) 高耐圧化が可能

pn 接合に逆バイアス電圧を印加すると空乏層が広がります。 pn 接合部分で最も電界が強まり最大電界強度を超えるとアバランシェ降伏、または、ツェナー降伏が発生します。 pn 接合の耐圧は、図 2.13 に示す三角形の面積で決まります。 このため、n^-層の不純物濃度を低下させて電界強度の傾斜を緩やかにし、かつ、n^-層の厚さを厚く (長く) することで高耐圧化が可能となります。

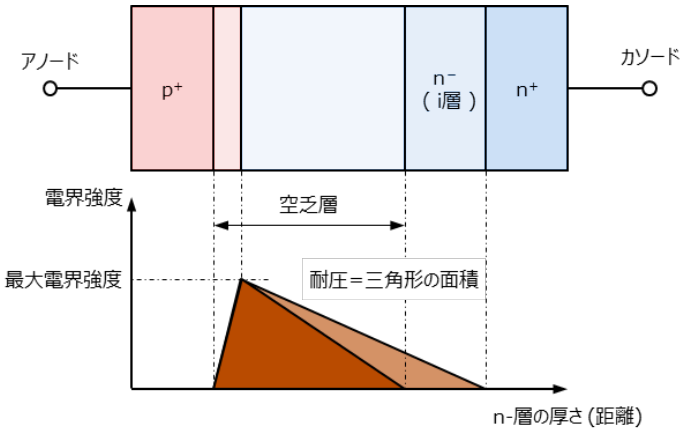


図 2.13　pin ダイオードによる高耐圧化

2) 導通時の抵抗が小さい

この p^+層と n^-層の pn 接合ダイオードが導通すると、P^+層から n^-層に正孔が注入されます。 反対に、n^+層から n^-層に電子が注入され、n^-層には不純物濃度以上にキャリアが増加します。 この増加したキャリアにより n^-層は低抵抗となり、導通時の抵抗が小さくなります。 n^-層のキャリアが増加して導通抵抗が低下する現象を伝導度変調と呼びます。

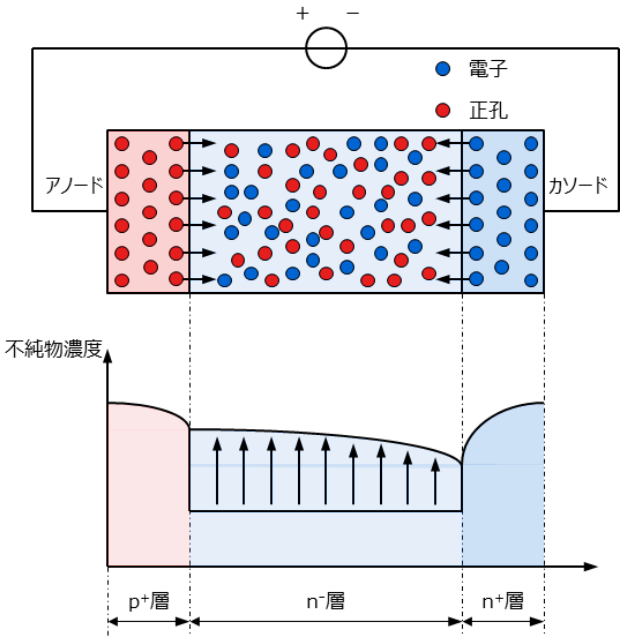


図 2.14　伝導度変調時の n^-層の不純物濃度の変化（イメージ図）

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

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

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}

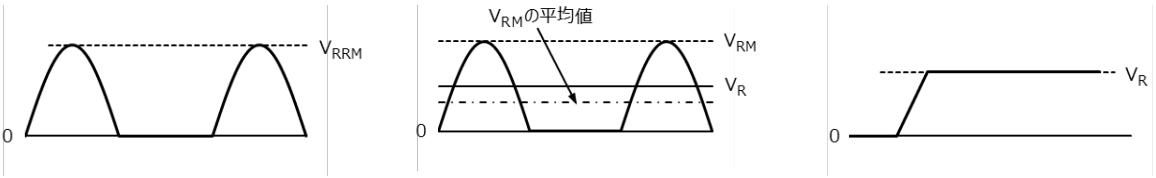
平均電圧が V_R を超えない範囲内において、逆方向に印加できる交流電圧の最大値です。

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

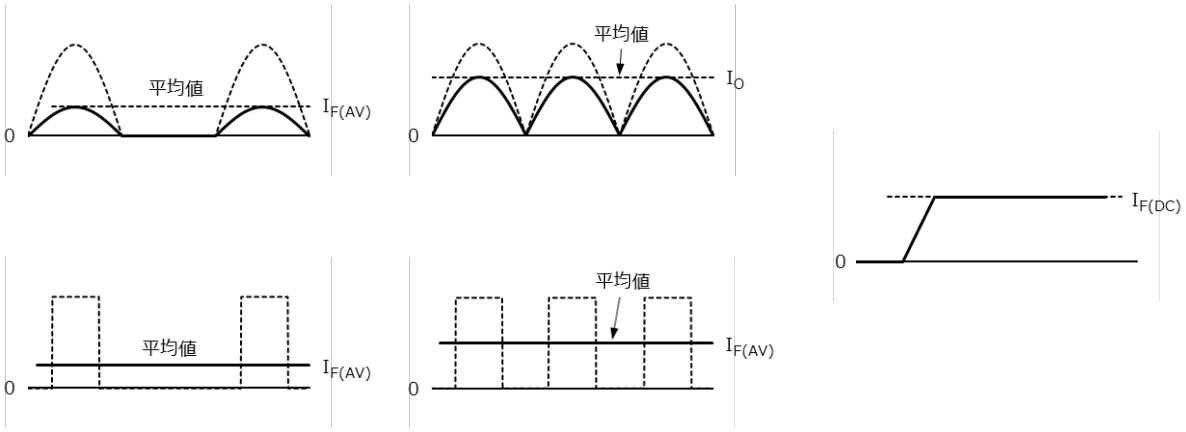
指定された温度で、商用周波数（50 Hz、または、60 Hz）の正弦全波（導通角 360 °）で順方向に流すことのできる最大平均電流値、または、指定された条件のもとでの順方向矩形波の平均電流値です。

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）

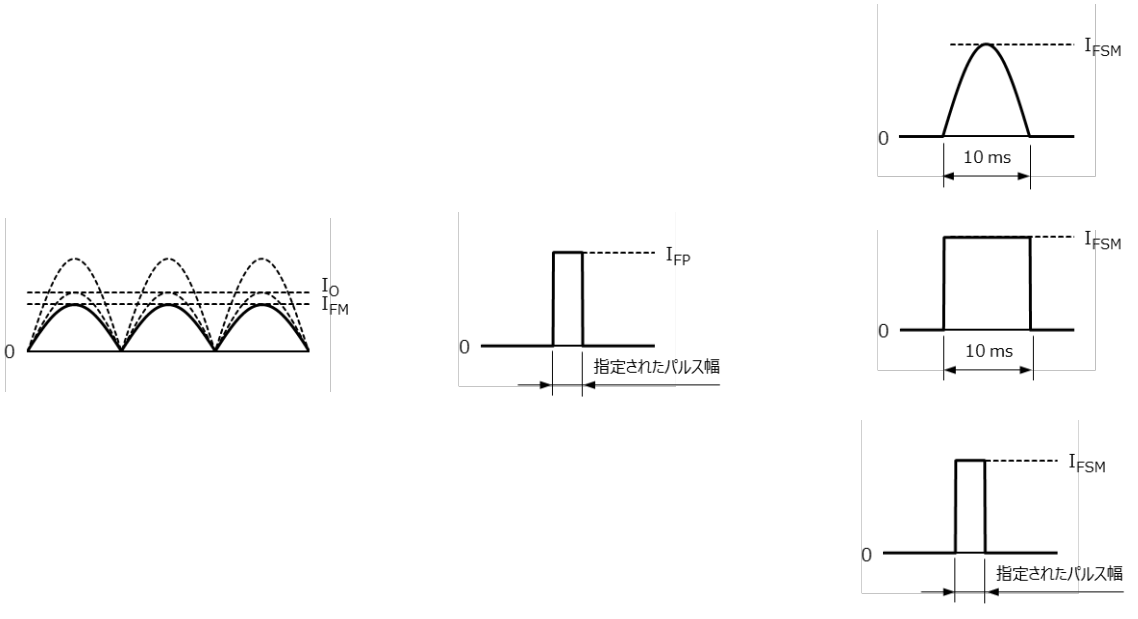
(4) 電流 2 乗時間積 I^2t

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}

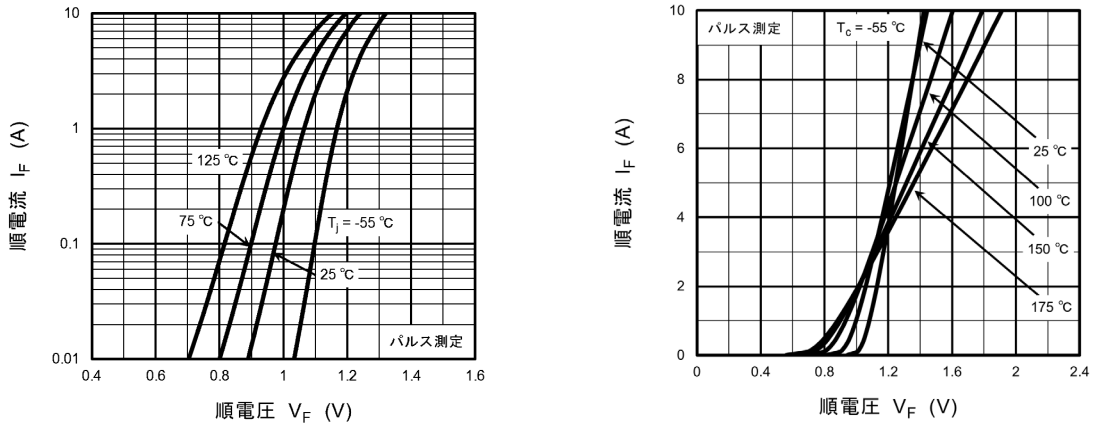
図 3.3　瞬時パルス電流定格の定義

4. 電気的特性

4.1. スイッチングダイオード、整流ダイオード 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。

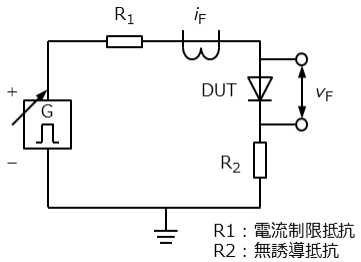


図 4.2　順回復時間 t_{fr} 測定回路例

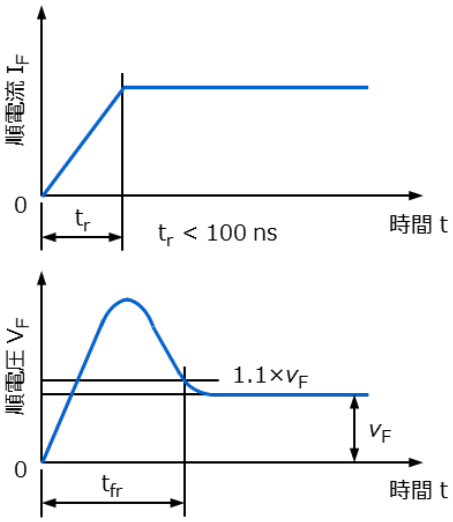
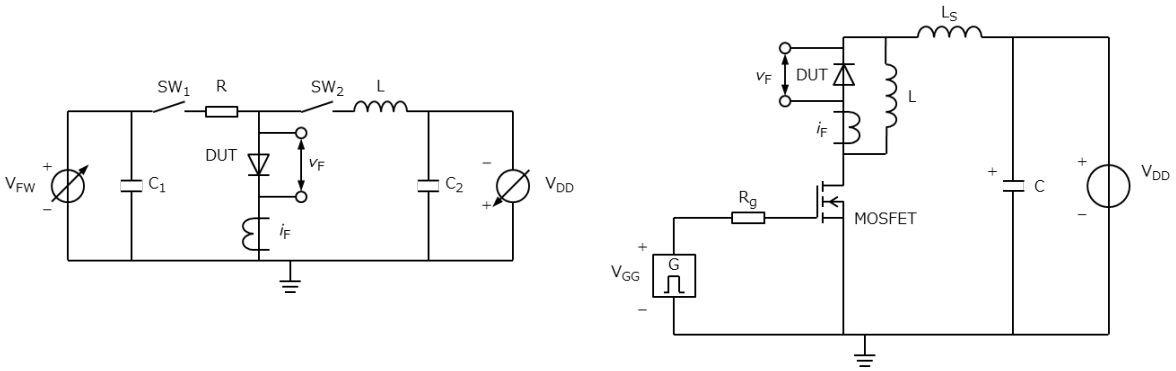


図 4.3　順回復時間 t_{fr} 波形例

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

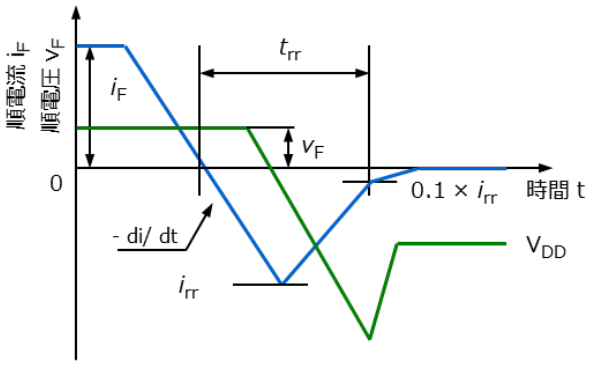


図 4.5　逆回復時間 t_{rr} 波形例

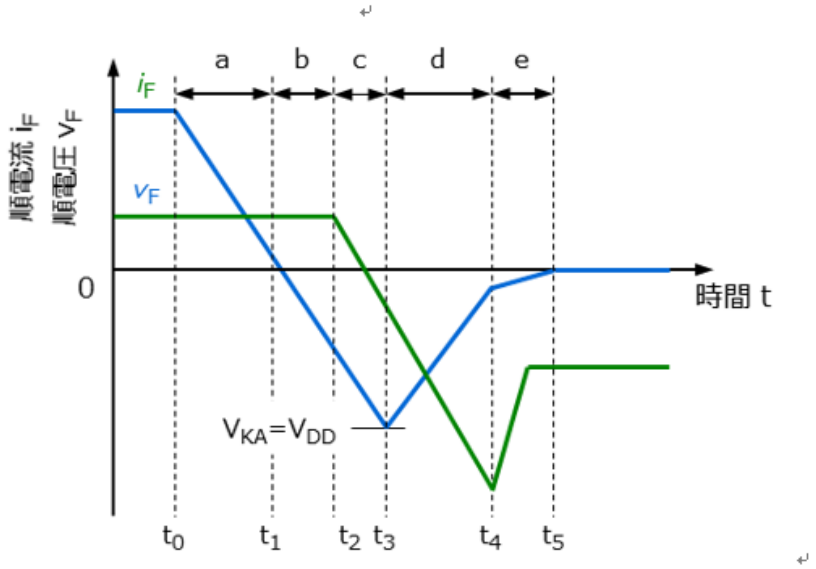


図 4.6　逆回復動作

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→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→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→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

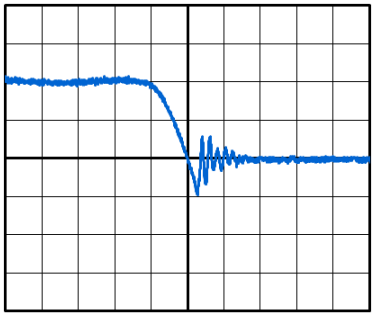


図 4.7 HED t_{rr} 波形例

縦軸 ： 電流 0.5 A/ div
横軸 ： 時間 50 ns/ div

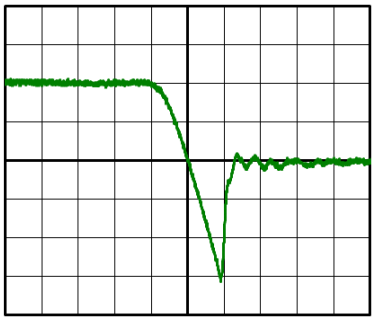


図 4.8 S-FRD t_{rr} 波形例

縦軸 ： 電流 2 A/ div
横軸 ： 時間 100 ns/ div

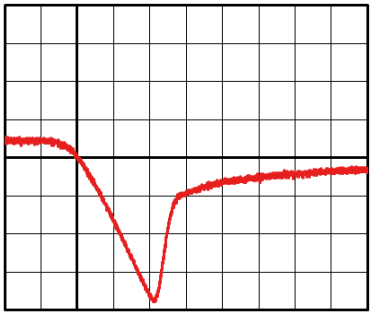


図 4.9 汎用ダイオード t_{rr} 波形例

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

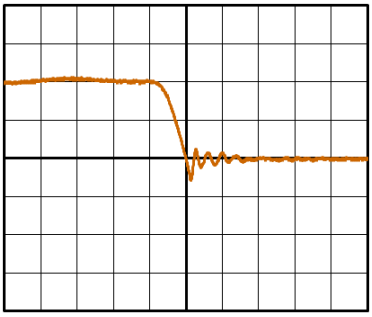


図 4.10 SBD リカバリー波形例

縦軸 ： 電流 0.5 A/ div
横軸 ： 時間 50 ns/ div

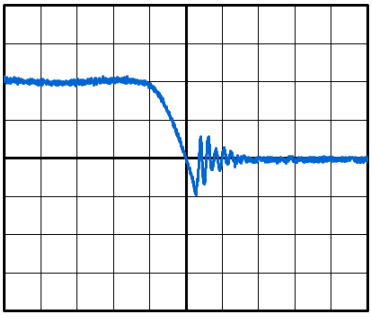


図 4.11 HED リカバリー波形例

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。