

US2H パッケージ搭載の ショットキーバリアダイオード (SBD) 放熱設計

概要

US2H パッケージは、ダイオード用に開発した高放熱パッケージです。本資料では、US2H パッケージに搭載したショットキーバリアダイオード (SBD) での放熱の優位性、損失、放熱設計に関して説明をしています。

目次

概要	0
目次	1
1. はじめに	4
2. US2H と USC のパッケージ概要	4
3. US2H パッケージの放熱性の優位性	5
4. SBD の概要	9
4.1. SBD の構造	9
4.2. 金属と n 形半導体のバンド図	9
4.3. 無バイアス時のバンド図	10
4.4. 逆電圧印加時のバンド図	10
4.5. JBS 構造	11
5. ダイオードの損失	12
6. 放熱設計	15
6.1. 放熱設計	15
製品取り扱い上のお願い	23

目次

図 2.1	US2H と USC のパッケージ寸法図と外観比較.....	4
図 3.1	CUHS15F40 と CUS10F40 の過渡熱インピーダンス比較(参考値).....	6
図 3.2	基板実装時、大きいパワーを印加したときのパッケージ表面温度例に実装して、大きいパワーを印加したときのパッケージ表面温度.....	6
図 3.3	基板実装時、小さいパワーを印加したときのパッケージ表面温度	7
図 3.4	銅箔面積による熱抵抗シミュレーション基板図.....	7
図 3.5	銅箔面積による熱抵抗特性 (ご参考データ).....	7
図 3.6	銅箔面積による温度シミュレーション	8
図 4.1	SBD の構造例	9
図 4.2	金属のバンド図	9
図 4.3	n 形半導体のバンド図	9
図 4.4	ショットキー接合の無バイアス時のバンド図.....	10
図 4.5	ショットキー接合の逆電圧印加時のバンド図	11
図 4.6	JBS 構造イメージ図	11
図 4.7	SBD に逆電圧を印加し始めたときの空乏層のイメージ図	12
図 4.8	SBD に印加した逆電圧を増加したときの空乏層のイメージ図	12
図 4.9	通常の SBD と JBS 構造を採用した SBD の逆電流特性イメージ図.....	12
図 5.1	ダイオードのスイッチング波形例	12
図 5.2	SBD リカバリー波形例.....	14
図 5.3	HED リカバリー波形例	14
図 5.4	SBD を DC-DC コンバーターに使用したときの電圧、電流波形例	15
図 6.1	放熱等価回路.....	16
図 6.2	放熱器面積と熱抵抗特性例	17
図 6.3	過渡熱インピーダンス回路.....	18
図 6.4	パルス状の損失を印加したときの温度変化.....	18
図 6.5	過渡熱インピーダンスの例	19
図 6.6	損失波形の矩形波への近似	19
図 6.7	正弦波、三角波状の損失波形の矩形波への近似方法.....	21

表目次

表 3.1	CUHS15F40 と CUS10F40 の絶対最大定格比較	5
表 3.2	CUHS15F40 と CUS10F40 の電気的特性比較	5

1. はじめに

電子機器は、ますます小型・高機能・低消費電力化が進んでいます。これらの要求を満足するために半導体に対しても小型・低損失・高放熱の要求が高まっています。当社では、電子機器内に搭載する DC-DC コンバーターの整流回路や逆流防止回路用に低損失のショットキーバリアダイオード (以下、SBD) のチップを開発し、小型・高放熱である US2H パッケージに搭載した製品のラインアップを拡充しています。

本資料では、US2H に搭載した CUHS15F40 と、同等パッケージサイズである USC (SOD-323) に搭載した CUS10F40 で放熱性についてシミュレーションを行い、US2H パッケージの高放熱特性に加えて、SBD を使用する際に最も注意すべき、逆電流による損失と放熱設計について解説します。また、SBD の構造、特徴を紹介した上で、ダイオード自身の損失と放熱設計時に考慮すべきポイントを紹介しています。

2. US2H と USC のパッケージ概要

US2H パッケージは、裏面に電極 (Exposed [thermal] pad: E-Pad) を備え、小型・高放熱を実現したパッケージです。一方で USC パッケージは電極形状がガルウィングタイプになっておりより実装しやすく、かつ実装視認性もよいといったメリットがあります。図 2.1 に US2H と USC パッケージの寸法図の比較を示します。

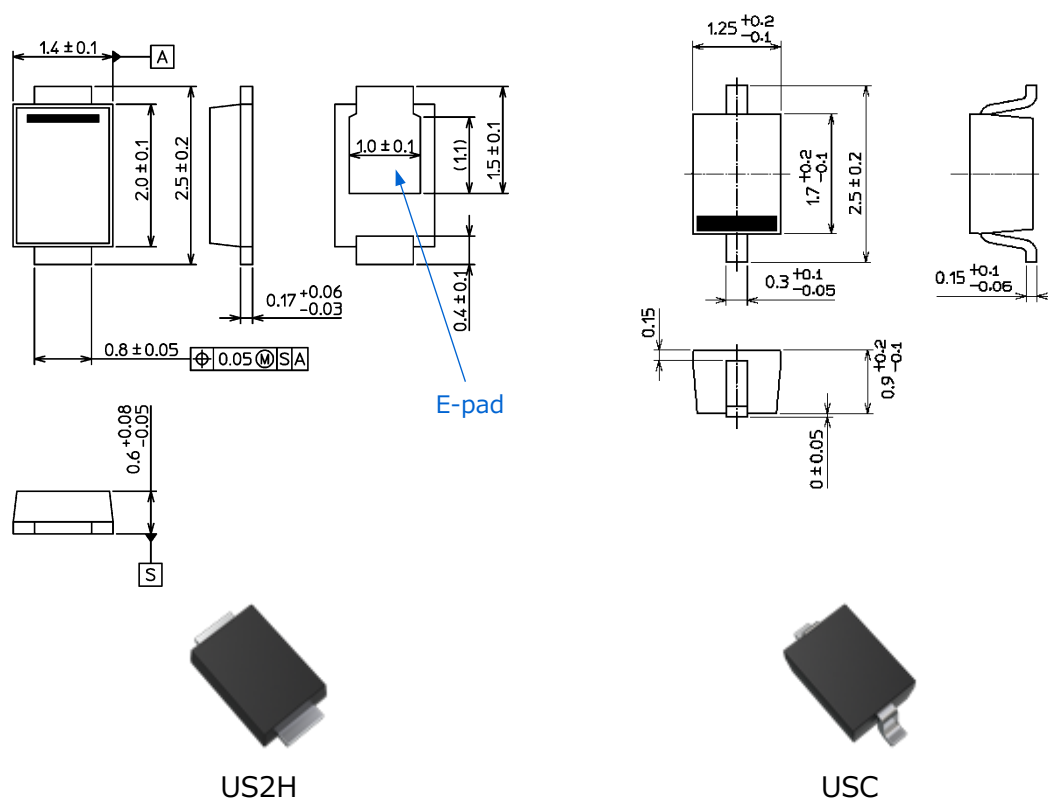


図 2.1 US2H と USC のパッケージ寸法図と外観比較

3. US2H パッケージの放熱性の優位性

US2H パッケージに搭載した CUHS15F40 と、USC パッケージに搭載した CUS10F40 の絶対最大定格と電気的特性の比較を表 3.1 と表 3.2 に示します。CUHS15F40 と CUS10F40 は平均整流電流や導電圧特性に違いはありますが類似した特性になります。

表 3.1 CUHS15F40 と CUS10F40 の絶対最大定格比較

絶対最大定格 (特に指定のない限り、 $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$)

項目	記号	注記	定格		単位
			CUHS15F40	CUS10F40	
逆電圧	V_R		40	40	V
平均整流電流	I_O	(注 1)	1.5	1.0	A
非線り返しピーク順電流	I_{FSM}	(注 2)	10	5	A
接合温度	T_j		150	150	$^\circ\text{C}$
保存温度	T_{stg}		-55~150	-55~150	$^\circ\text{C}$

注 1: FR4 基板実装時 (25.4 × 25.4 × 1.6 mm, Cu Pad: 45 mm²)

注 2: 10 ms パルスで測定

表 3.2 CUHS15F40 と CUS10F40 の電気的特性比較

電気的特性 (特に指定のない限り、 $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$)

項目	記号	注記	測定条件	CUHS15F40			CUS10F40			単位
				最小	標準	最大	最小	標準	最大	
順電圧	$V_{F(1)}$	(注 3)	$I_F=100\text{ mA}$	-	-	-	-	0.32	0.38	V
	$V_{F(2)}$		$I_F=500\text{ mA}$	-	0.40	0.45	-	0.46	0.53	
	$V_{F(3)}$		$I_F=1\text{ A}$	-	0.49	0.54	-	0.60	0.67	
	$V_{F(4)}$		$I_F=1.5\text{ A}$	-	0.57	0.63	-	-	-	
逆電流	$I_{R(1)}$	(注 3)	$V_R=10\text{ V}$	-	3	-	-	2.7	15	μA
	$I_{R(2)}$		$V_R=40\text{ V}$	-	6	50	-	4.9	20	
端子間容量	C_t		$V_R=0\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$	-	130	-	-	74	-	pF

注 3: パルス測定

図 3.1 は、CUHS15F40 と CUS10F40 の過渡熱インピーダンスを比較したグラフです。CUHS15F40 では、パッケージの裏面に配した E-Pad の効果により、CUS10F40 よりもパルス幅 1000 s での飽和熱抵抗は 45 % 低減しています。これにより CUHS15F40 は、CUS10F40 とほぼ同一のパッケージサイズながら、より大きな電力を取り扱うことが可能です。

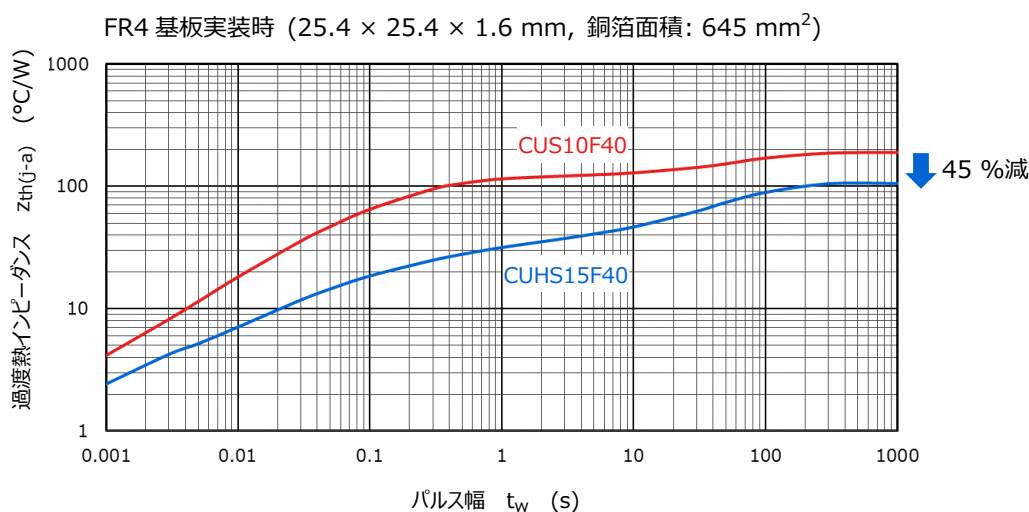


図 3.1 CUHS15F40 と CUS10F40 の過渡熱インピーダンス比較(参考値)

25.4 × 25.4 × 1.6 mm (銅箔被覆率:100 %) の FR-4 基板に CUHS15F40 と CUS10F40 を実装して、これらに同じパワーを印加したときのパッケージ表面温度のシミュレーション結果を図 3.2、図 3.3 に示します。大きいパワーを印加したときのパッケージ表面温度は、CUHS15F40 の 144 °C に対して、CUS10F40 は 287 °C と接合温度の最大定格を大幅に超える温度になっています。また、小さいパワーを印加したときのパッケージ表面温度は CUS10F40 の 145 °C に対して、CUHS15F40 は 83 °C となっており、これらの結果から US2H パッケージの放熱性の高さを確認することができます。

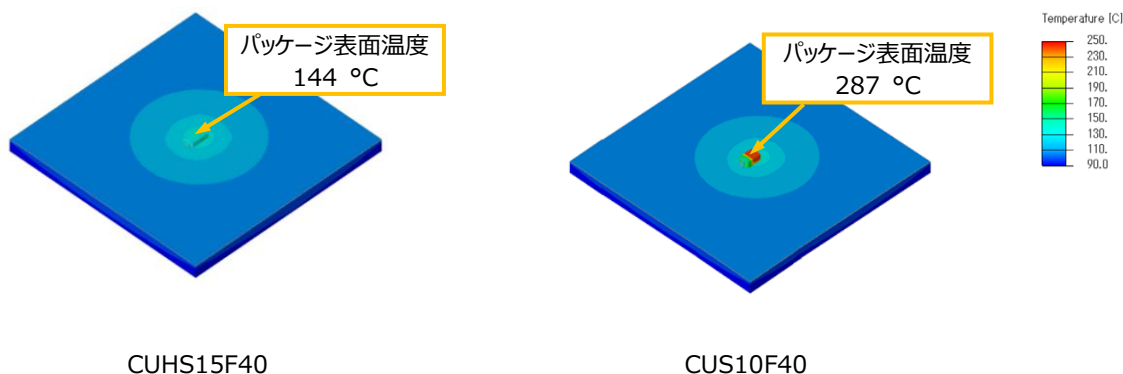


図 3.2 基板実装時、大きいパワーを印加したときのパッケージ表面温度例に実装して、大きいパワーを印加したときのパッケージ表面温度
※基板条件：25.4 × 25.4 × 1.6 mm (銅箔被覆率: 100%)それぞれには同等のパワーを印可。

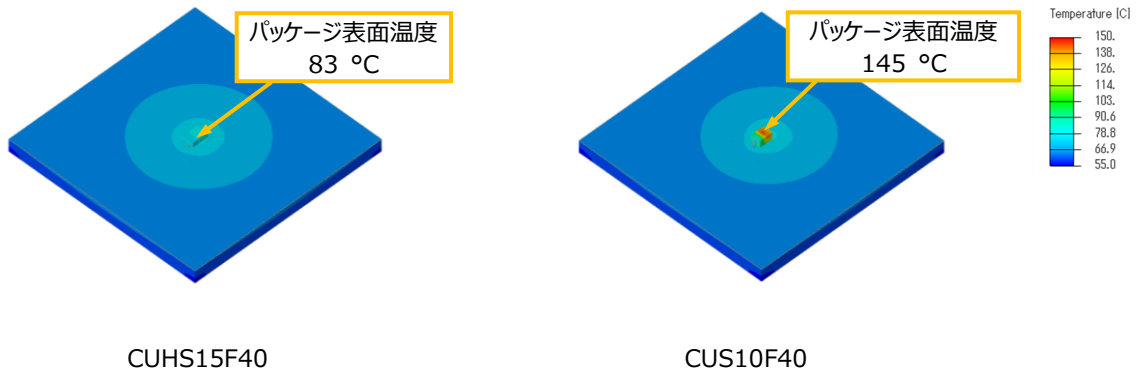


図 3.3 基板実装時、小さいパワーを印加したときのパッケージ表面温度

※基板条件：25.4 × 25.4 × 1.6 mm (銅箔被覆率: 100%)それぞれには同等のパワーを印可。

次に、25.4 × 25.4 × 1.6mm の FR-4 基板にそれぞれの製品を実装して、銅箔の被覆率を図 3.4 に示す 5 つの条件でシミュレーションしたときの熱抵抗 $R_{th(j-a)}$ - 銅箔面積のグラフを図 3.5 に示します。図 3.6 は銅箔面積を変えたものに対して同一パワーを印可した温度シミュレーションです。これらの結果より、銅箔面積が放熱特性改善に有効であることが分かります。

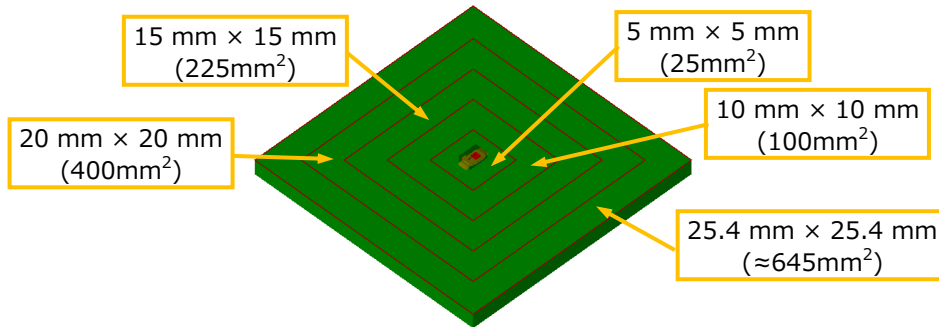


図 3.4 銅箔面積による熱抵抗シミュレーション基板図

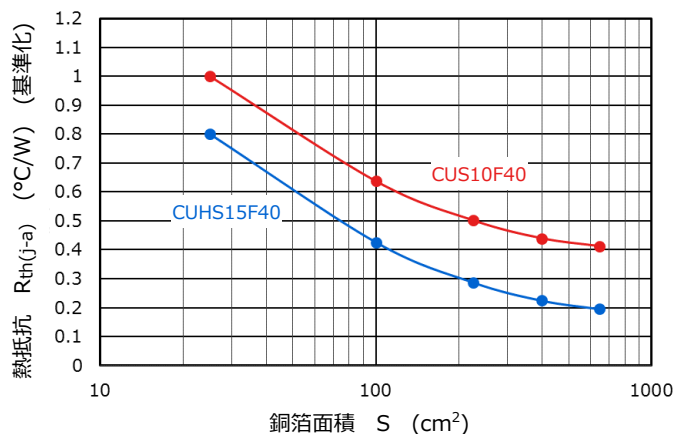


図 3.5 銅箔面積による熱抵抗特性 (ご参考データ)

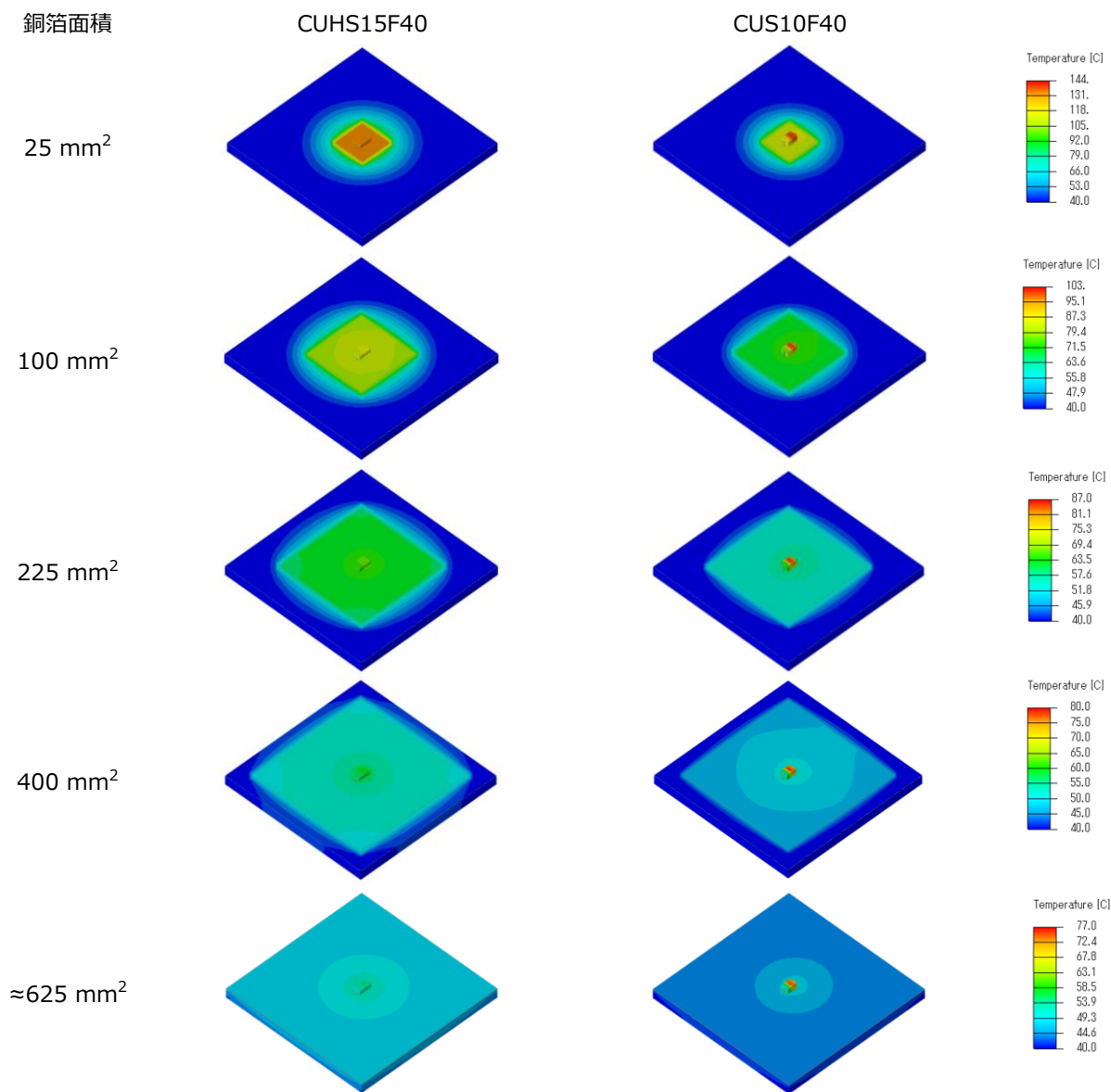


図 3.6 銅箔面積による温度シミュレーション

4. SBD の概要

4.1. SBD の構造

図 4.1 に SBD の構造図例を示します。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、Walter Hans Schottky が提唱したことから、ショットキーバリアダイオード (SBD) と呼ばれます。SBD は金属と n 形半導体との間にショットキー接合が形成されて、多数キャリアである電子で動作することから、一般的な pn 接合ダイオードに対してスイッチングが速いため比較的高い周波数領域まで動作するのが特長です。

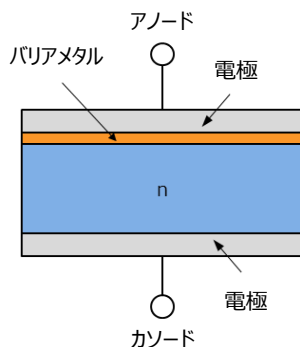


図 4.1 SBD の構造例

4.2. 金属と n 形半導体のバンド図

図 4.2 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。このため、金属で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します。

また、図 4.3 に n 形半導体のバンド図例を示します。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 形半導体と n 形半導体より低いフェルミ準位を持つ金属を接合すると、ショットキー接合ができて整流特性を示します。反対に、n 形半導体と n 形半導体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。

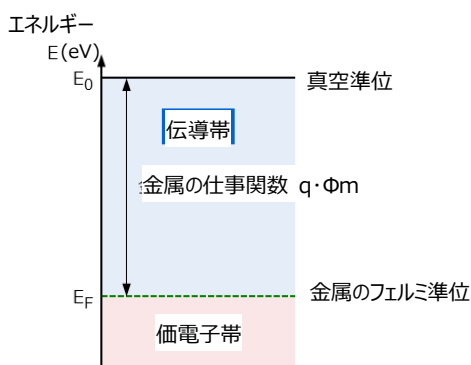


図 4.2 金属のバンド図

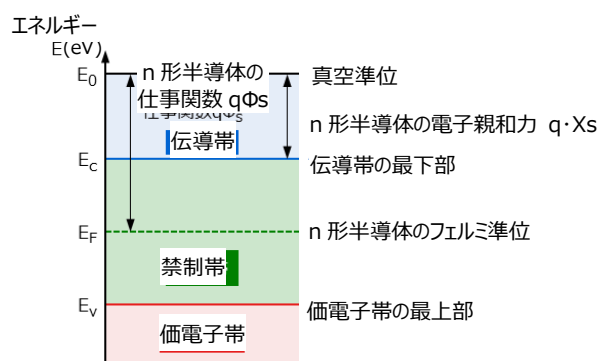


図 4.3 n 形半導体のバンド図

4.3. 無バイアス時のバンド図

金属と n 形半導体を接合すると、n 形半導体から金属へ電子の一部が流れ込んで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最下部 E_c と価電子帯の最上部 E_v もエネルギー準位が移動して、図 4.4 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、 $q \cdot \Phi_{bi} = q \cdot (\Phi_m - \Phi_s)$ となる拡散エネルギーが発生し、n 形半導体側には+ (プラス) イオンによる空乏層ができます。なお、金属側には多量の電子が存在するため、n 形半導体から金属側に電子が移動しても、空乏層はほとんどできません。ショットキー接合が無バイアスの状態では、ほとんどの電子が空乏層の拡散エネルギー $q \cdot \Phi_{bi} = q \cdot (\Phi_m - \Phi_s)$ を超えることができず、ダイオード内部の電流はほとんど流れません。

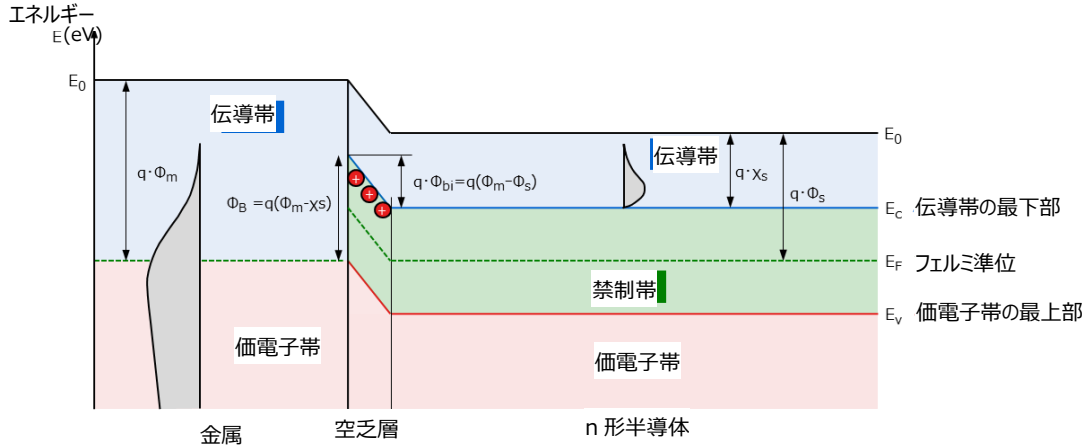


図 4.4 ショットキー接合の無バイアス時のバンド図

4.4. 逆電圧印加時のバンド図

ショットキー接合に逆電圧 V_R を印加すると、n 形半導体のエネルギー準位は下がります。このとき、拡散エネルギー $q \cdot \Phi_{bi} = q \cdot (\Phi_m - \Phi_s + V_R)$ を超えることのできる電子はわずかになります。拡散エネルギーを超えた一部の電子は、逆電流として流れます。SBD の逆電圧印加時の逆電流 (電流密度) は式 4.1 で表すことができ、ショットキー障壁 Φ_B の低い SBD ほど逆電流が大きくなります。

$$I_R = A^* \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\Phi_B}{K T}} \dots\dots\dots (4-1)$$

- I_R : 温度 T における逆電流 (A)
- A^* : リチャードソン定数 ($A/cm^2 \cdot K^2$)
- T : 絶対温度 (K)
- Φ_B : ショットキー障壁 (eV)
- K : ボルツマン定数 (1.381×10^{-23}) ($J \cdot K^{-1}$)

SBD は通常の pn 接合ダイオードに対して逆電流が大きく、高い逆電圧を印加したときや高温環境下では、逆電流による損失が無視することができなくなります。逆電流が大きいことから、逆電流の増加→損失の増加→逆電流の増加のようなループを繰り返して接合温度が急激に上昇し、素子の特性の劣化や破壊に至る可能性があるため、十分な放熱設計を考慮する必要があります。

特に、逆電流の大きな SBD を使用する際には、印加する逆電圧や周囲温度などの使用条件を考慮して、最悪使用条件下においても問題がないことを十分に確認してください。

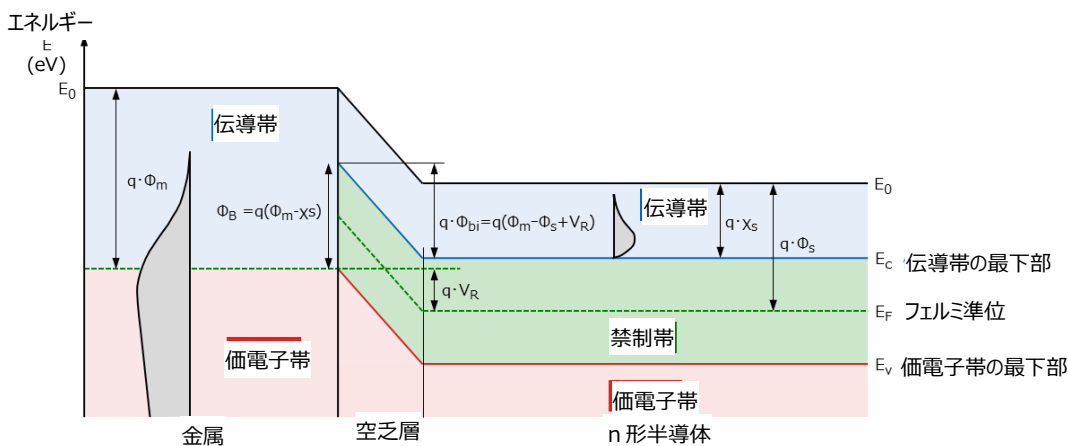


図 4.5 ショットキー接合の逆電圧印加時のバンド図

$$I_R = A^* \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\Phi_B}{kT}} \dots \dots \dots (4-2)$$

- I_R : 温度 T における逆電流 (A)
- A^* : リチャードソン定数 ($A/cm^2 \cdot K^2$)
- T : 絶対温度 (K)
- Φ_B : ショットキー障壁 (eV)
- K : ボルツマン定数 (1.381×10^{-23}) ($J \cdot K^{-1}$)

4.5. JBS 構造

SBD は、順電圧が小さい反面、逆電流が大きい特徴を持っています。当社の SBD では、順電圧が小さいながらも、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 4.6 のように n 層の表面に部分的に p 層を拡散した構造となっています。SBD に逆電圧を印加すると n 層と拡散した p 層の間で空乏層が広がります。さらに、逆電圧を増加させると、隣り合う空乏層同士がつながることによって逆電流を低減することができます。

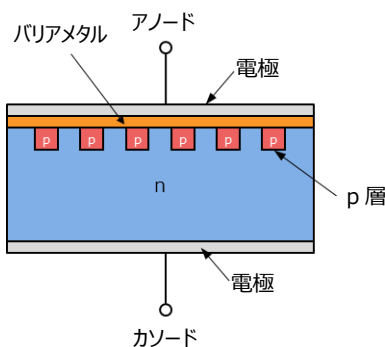


図 4.6 JBS 構造イメージ図

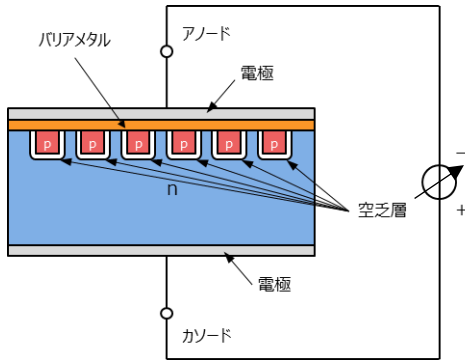


図 4.7 SBD に逆電圧を印加し始めたときの空乏層のイメージ図

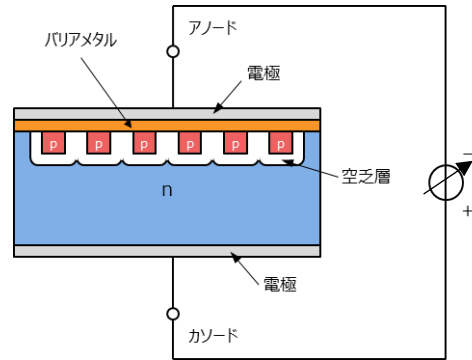


図 4.8 SBD に印加した逆電圧を増加したときの空乏層のイメージ図

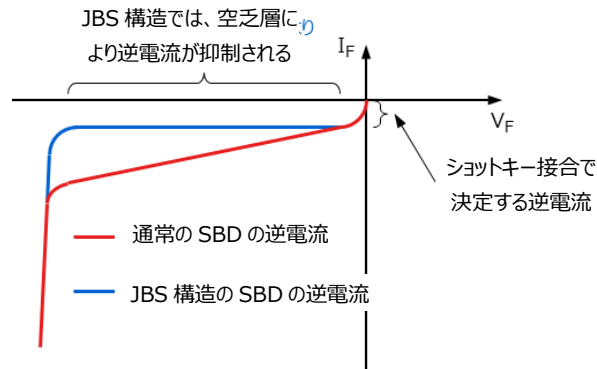


図 4.9 通常の SBD と JBS 構造を採用した SBD の逆電流特性イメージ図

5. ダイオードの損失

一般的なダイオードのスイッチング波形例を図 5.1 に示します。この図で、ダイオードの損失について説明します。

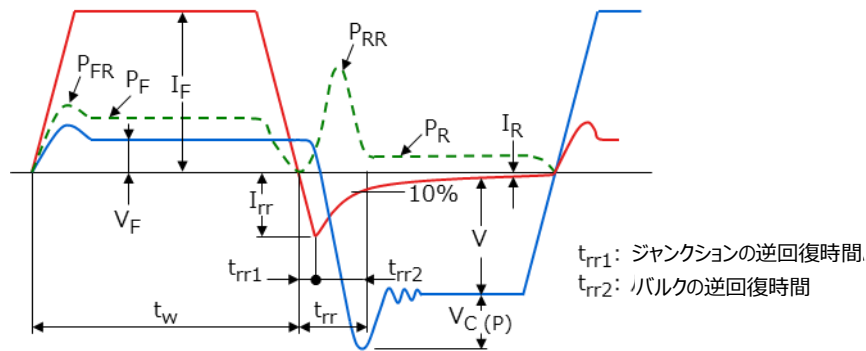


図 5.1 ダイオードのスイッチング波形例

(1) 順方向損失 P_F

順方向電流動作では、通電後の素子の温度が上昇すると順電圧 V_F は低下する方向であり、素子の温度としては安定方向になります。なお、常に順電流が流れているときの順方向損失 P_F は式 5.1 で表すことができます。

$$P_F = V_F \cdot I_F \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

P_F	:	順方向損失	(W)
V_F	:	順電圧	(V)
I_F	:	順電流	(A)

(2) 逆方向損失 P_R

逆方向の漏れ電流 I_R による損失は低い温度では小さく、順方向損失に対して無視できるレベルです。しかし、 I_R は温度に対して指数関数的に増加することから、高温の領域での損失は無視できなくなります。SBD と高速整流ダイオードは、一般的な整流ダイオードに対して I_R が大きくなります。特に、SBD は動作時の温度上昇や電流の増加によって、熱暴走を発生し破壊に至る場合があります。SBD を使用する際には、順方向および逆方向の損失を考慮して、高温時の許容損失を求め、その許容損失に見合う放熱設計および安全設計を実施してください。また、実使用に際しては、最悪使用条件を考慮した実機で評価を十分に実施して問題がないことを確認してください。

なお、逆電圧を印加しているときの逆方向損失 P_R は、式 5.2 で表すことができます。

$$P_R = V_R \cdot I_R \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

P_R	:	逆方向損失	(W)
V_R	:	逆電圧	(V)
I_R	:	逆電流	(A)

(3) 順方向スイッチング損失 P_{fr}

順方向スイッチング損失 P_{fr} は、ダイオードの順方向に立ち上がり時間の速いパルス（矩形波）を印加したときに発生する損失です。アノード・カソード間に急しゅんなパルス状の電流を印加すると、ダイオードの順方向電圧は定常値の V_F よりも瞬時的に高くなり、大きな損失が発生します（図 5.1 参照）。

これは、急しゅんな電流パルスを印加したときに、ダイオードが導通状態になるまでに一定の時間が必要となり、その間はダイオードが順方向であっても高抵抗の状態にあるためです。この現象を順回復特性と呼びます。このときの順回復時間 t_{fr} は、動作周波数に対する依存性を持ちませんが、立ち上がり時間に依存します。

(4) 逆方向スイッチング損失 P_{rr}

逆方向スイッチング損失 P_{rr} は、順方向で動作しているダイオードに急しゅんな逆電圧を印加したときに、逆回復時間 t_{rr} と呼ばれる期間で逆電流が流れるために生じる損失です (図 5.1 参照)。逆方向スイッチング損失 P_{rr} は、式 5.3 で近似できます。

$$P_{rr} \approx \frac{1}{2} i_{rr} \cdot t_{rr} \cdot V_R \cdot f = Q_R \cdot V_R \cdot f \quad \dots \dots \dots (5-3)$$

- i_{rr} : 逆方向電流の最大値 (A)
- t_{rr} : 逆回復時間 (s)
- V_R : 逆電圧 (定常時) (V)
- Q_R : 蓄積電荷 (C)
- f : 周波数 (Hz)

ここで、損失が発生するのは t_{rr} 期間中の t_{rr2} の間であり、 t_{rr1} 期間での損失は小さいことから式 5-3 は式 5-4 に近似することができます。

$$P_{rr} \approx \frac{1}{6} i_{rr} \cdot t_{rr2} \cdot V_R \cdot f \quad \dots \dots \dots (5-4)$$

- i_{rr} : 逆方向電流の最大値 (A)
- t_{rr2} : バルクの逆回復時間 (s)
- V_R : 逆電圧 (定常時) (V)
- Q_R : 蓄積電荷 (C)
- f : 周波数 (Hz)

なお、SBD はユニポーラー素子のために、pn 接合のダイオードのようなキャリアの再結合による t_{rr} は発生しませんが、接合容量により t_{rr} と同様な逆回復波形が観測できます。しかしながら、このときの逆電流値と期間は、図 5.3 の高速ダイオードである HED^{*2} (High Efficiency Diode: 高効率ダイオード) に対して、図 5.2 のように非常に小さい値となります。

*2 : LLD (Low Loss Diode) と呼ぶこともあります。

測定条件: $i_F=1$ A, $di/dt=-30$ A/ μ s, $T_a=25^\circ$ C

縦軸: 電流 0.5 A/ div
横軸: 時間 50 ns/ div

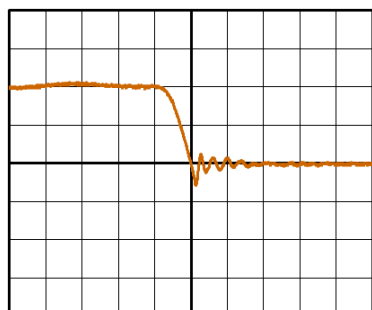


図 5.2 SBD リカバリー波形例

縦軸: 電流 0.5 A/ div
横軸: 時間 50 ns/ div

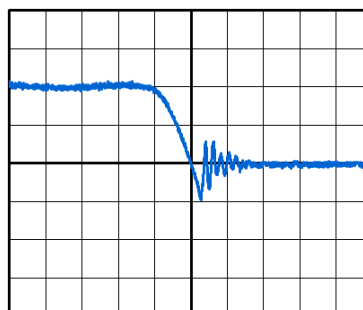


図 5.3 HED リカバリー波形例

SBD を図 5.4 のような DC-DC コンバーターの環流ダイオードとして使用するときには、SBD には順方向損失 P_F 、逆方向損失 P_R 、逆方向スイッチング損失 P_{rr} が発生します。このときの SBD の損失は式 5-5 から求めることができます。

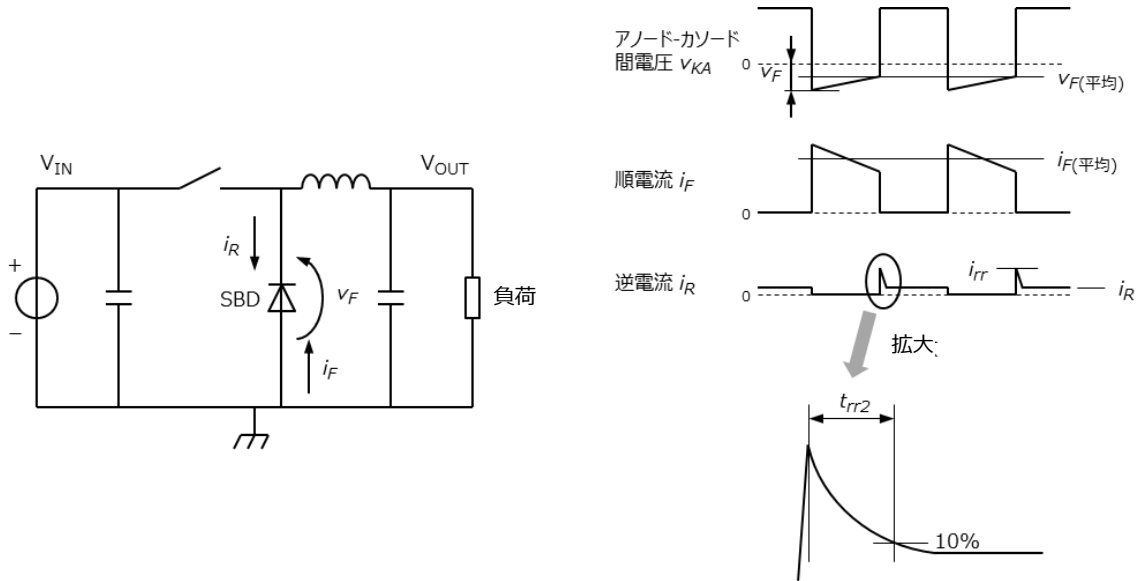


図 5.4 SBD を DC-DC コンバーターに使用したときの電圧、電流波形例

$$P_d = P_F + P_R + P_{rr}$$

$$= v_{F(\text{平均})} \cdot i_{F(\text{平均})} + V_{OUT} \cdot i_R + \frac{1}{6} i_{rr} \cdot t_{rr2} \cdot V_{OUT} \cdot f \quad \dots \dots \dots (5-5)$$

- i_{rr} : 逆方向電流の最大値 (A)
- t_{rr2} : パルクの逆回復時間 (s)
- V_R : 逆電圧 (定常時) (V)
- Q_R : 蓄積電荷 (C)
- f : 周波数 (Hz)

6. 放熱設計

6.1. 放熱設計

(1) 最大許容損失と放熱等価回路

ダイオードの最大許容損失 P_d は、ダイオードを使用するときの温度、最大接合温度、および、熱抵抗から式 6-1 の関係が成り立ちます。

$$P_{dmax(T_a)} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{th(j-a)}}, P_{dmax(T_c)} = \frac{T_{jmax} - T_c}{R_{th(j-c)}} \quad \dots \dots \dots (6-1)$$

- T_{jmax} : 最大接合温度 (接合温度最大定格) (°C)
- $P_{dmax(T_a)}$: 放熱器を使用しないときの熱抵抗 (°C/W)
- T_a : 周囲温度 (°C)
- $P_{dmax(T_c)}$: 放熱器を使用したときの熱抵抗 (°C/W)
- T_c : パッケージ温度 (°C)

ダイオードの接合部で発生する熱が周囲へ伝達する経路は、熱の移動を電流と同様に考えて電気回路に置き替えると、熱抵抗と熱容量から表すことができます。熱的に定常な状態では、放熱等価回路は図 6.1 のようになります。

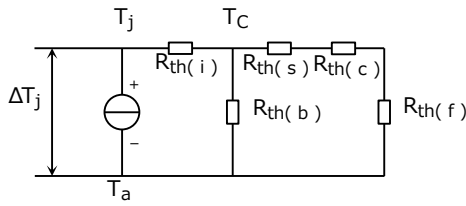


図 6.1 放熱等価回路

- $R_{th(i)}$: 接合部からパッケージまでの熱抵抗
 - $R_{th(b)}$: パッケージから周囲までの熱抵抗
 - $R_{th(s)}$: 絶縁板の熱抵抗 (放熱器使用時) または TIM^{*3}
 - $R_{th(c)}$: パッケージと放熱器の接触熱抵抗 (放熱器使用時)
 - $R_{th(f)}$: 放熱器の熱抵抗
- *3: TIM (Thermal interface material: 熱伝導性材料)

図 6.1 の放熱等価回路におけるそれぞれの熱抵抗は、次のように説明できます。

① 接合部からパッケージまでの熱抵抗 $R_{th(i)}$

ダイオードの接合部からパッケージまでの熱抵抗 $R_{th(i)}$ は、ダイオードの構造、材料などに決まるもので、それぞれのダイオードで固有の値です。この熱抵抗値を測定するためには、ダイオードを一定のパッケージ温度に強制的に冷却した状態にすることが必要です。パッケージ温度を $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$ に冷却して動作するとき、ダイオードで許容できる最大損失 $P_{dmax(T_C)}$ は、式 6.2 で求めることができます。

$$P_{dmax(T_C)} = \frac{T_{jmax} - T_C}{R_{th(i)}} = \frac{T_{jmax} - 25^\circ\text{C}}{R_{th(i)}} \dots\dots\dots (6-2)$$

- $P_{dmax(T_C)}$: ダイオードで許容される最大損失 (W)
- T_{jmax} : 最大接合温度 (接合温度最大定格) ($^\circ\text{C}$)
- T_C : パッケージ温度 ($T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$) ($^\circ\text{C}$)
- $R_{th(i)}$: 接合部からパッケージまでの熱抵抗 ($^\circ\text{C}/\text{W}$)

放熱器を取り付けることのできるスルーホールパッケージに搭載されたダイオードのデータシートでは $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$ 、または、無限大放熱器を使用したときの最大許容損失を記載していますが、これは式 6-2 にように、ダイオードの熱抵抗により決まるものです。

② 接触熱抵抗 $R_{th(c)}$

接触熱抵抗 $R_{th(c)}$ は、パッケージと放熱器との接触状態により決まり、接触面の平坦度、粗さ、接触面積、放熱器の取り付け方に大きく影響を受けます。パッケージと放熱器の接触面にシリコングリースの塗布、または、シリコンラバーを使用すると、接触面の粗さ、平坦度の影響を小さくすることができます。

③ 絶縁板熱抵抗 $R_{th(s)}$

パッケージが電氣的に絶縁していないスルーホールパッケージのダイオードを放熱器から絶縁するときは、ダイオードと放熱器との間に絶縁物を用いなければなりません。この絶縁物による熱抵抗 $R_{th(s)}$ は、絶縁物の材質と厚さ、面積により決まり、無視できない値となります。樹脂で絶縁したパッケージ製品のデータシートでは、 $R_{th(s)}$ を含んだ値を記載しています。

④ 放熱器熱抵抗 $R_{th(f)}$

放熱器の熱抵抗は、放熱器表面から周囲へ伝達する熱経路の分布定数的な熱インピーダンスです。周囲の状態、放熱器と周囲の温度差、および、放熱器の有効体積に関係してきますが、数式的に表現することは難しく、現状では実測により決めています。図 6.2 は放熱器の中央にダイオードを 1 つ取り付け、放熱器を垂直位置にしたときの熱抵抗の実測値例です。放熱器の熱抵抗については、放熱器メーカーが種々の放熱器を発表していますので、技術資料などを参照の上、最適な放熱器を選定してください。

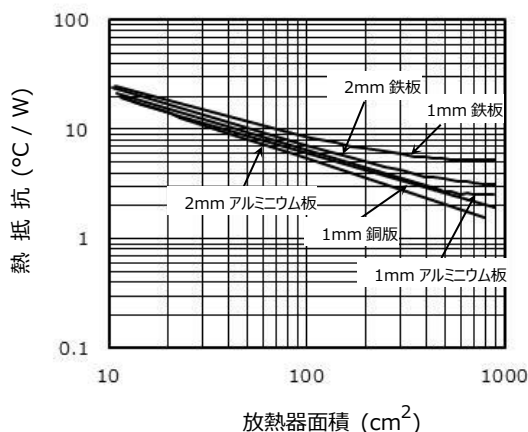


図 6.2 放熱器面積と熱抵抗特性例

接合部から周囲までの全熱抵抗 $R_{th(j-a)}$ は、図 6.1 の放熱等価回路から式 6-3 で求めることができます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + \frac{R_{th(b)} \cdot (R_{th(s)} + R_{th(c)} + R_{th(f)})}{R_{th(b)} + R_{th(s)} + R_{th(c)} + R_{th(f)}} \quad \dots \dots \dots (6-3)$$

- $R_{th(j-a)}$: 接合部から周囲までの全熱抵抗 (°C/W)
- $R_{th(i)}$: 接合部からパッケージまでの熱抵抗 (°C/W)
- $R_{th(b)}$: パッケージから周囲までの熱抵抗 (°C/W)
- $R_{th(s)}$: 絶縁板の熱抵抗 (°C/W)
- $R_{th(f)}$: 放熱器の熱抵抗 (°C/W)

パッケージから周囲への熱抵抗 $R_{th(b)}$ は、パッケージの材質や形状により決定します。 $R_{th(i)}$ 、 $R_{th(c)}$ 、 $R_{th(s)}$ 、および $R_{th(f)}$ に対して $R_{th(b)}$ は大きい値のため、式 6-3 は簡略化して式 6-4 を使うことができます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)} + R_{th(f)} \quad \dots \dots \dots (6-4)$$

また、小型のダイオードでは、一般的に放熱器を用いないので $R_{th(j-a)}$ は、

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(b)} \quad \dots \dots \dots (6-5)$$

となります。

小型のダイオードのデータシートなどでは、 $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ の最大許容損失を記載していますが、特に指定していない限り、式 6-6 で求めた値を示しています。

$$P_{dmax}(T_a=25\text{ }^\circ\text{C}) = \frac{T_{jmax} - 25\text{ }^\circ\text{C}}{R_{th(j-a)}} \dots\dots\dots (6-6)$$

- $P_{dmax}(T_a=25\text{ }^\circ\text{C})$: 周囲温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ でダイオードに許容される最大損失 (W)
- T_{jmax} : 最大接合温度 (接合温度最大定格) ($^\circ\text{C}$)
- $R_{th(j-a)}$: 接合部から周囲までの全熱抵抗 ($^\circ\text{C/W}$)

定常的な損失を扱うときには、式 6-5 から最大定格を満足する放熱設計が可能となります。しかしながら、ダイオードをスイッチング回路などに使用するときには、 T_j 過渡的な最大値が T_{jmax} を超えないように注意が必要です。

(2) 接合部のパルス応答

ダイオードの熱インピーダンスは、図 6.3 のような熱容量 C と熱抵抗 R の分布定数回路で表すことができます。

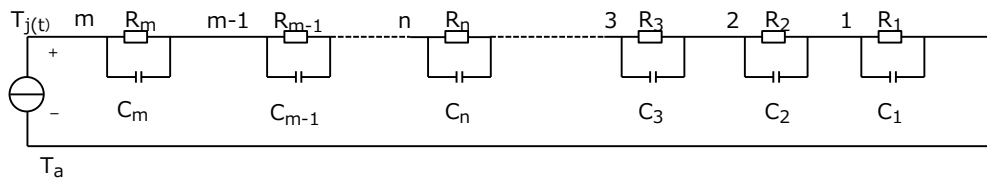


図 6.3 過渡熱インピーダンス回路

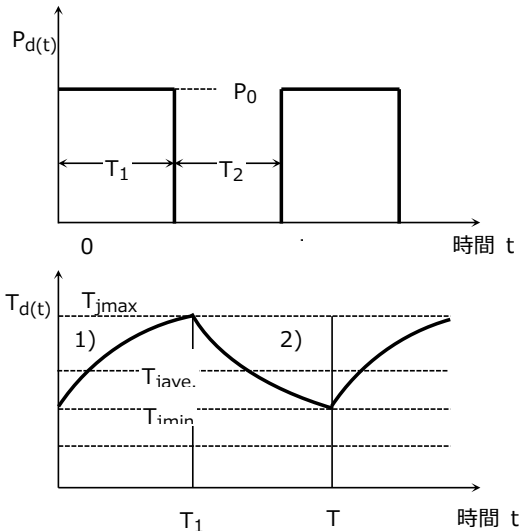


図 6.4 パルス状の損失を印加したときの温度変化

図 6.3 の回路に、図 6.4 のようなパルス状の損失 $P_{j(t)}$ が印加するときに、熱的な安定状態において m 番目の CR 並列回路に現れる温度変化 $T_{d(t)}$ は、次式で求めることができます。

1) $P_{d(t)}=P_0$ の領域では、

$$T_{d(t)} = \sum_{n=1}^m [(P_0 \cdot R_n) - T_{n \text{ min}}] \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{C_n R_n}\right)} \right] + T_{n \text{ min}}$$

2) $P_{d(t)}=0$ の領域では、

$$T_{d(t)} = \sum_{n=1}^m \left[T_{n \text{ max}} \cdot e^{\left(\frac{-t}{C_n R_n}\right)} \right]$$

通常のダイオードでは $n=4$ 程度を考えることにより、ほぼ実際の値に近似することが可能ですが、 C と R のそれぞれの値が明確でないときには T_j の値を算出することは困難です。そのため、一般的には次のように過渡熱インピーダンスを用いて T_{jmax} を算出します。図 6.5 は過渡熱インピーダンスの代表特性です。単発の矩形波パルス (パルス幅 t 、最大値 P_0) を印加するとき、パルス幅 t に対する過渡インピーダンス $z_{th}(t)$ を使用することにより T_{jmax} は式 6-7 となります。

$$T_{jmax} = z_{th}(t) \cdot P_0 + T_a \quad \dots\dots\dots (6-7)$$

- T_{jmax} : 最大接合温度 (接合温度最大定格) (°C)
- $z_{th}(t)$: 印加する損失のパルス幅での過渡熱インピーダンス (°C/W)
- P_0 : ダイオードの損失 (W)
- T_a : 周囲温度 (°C)

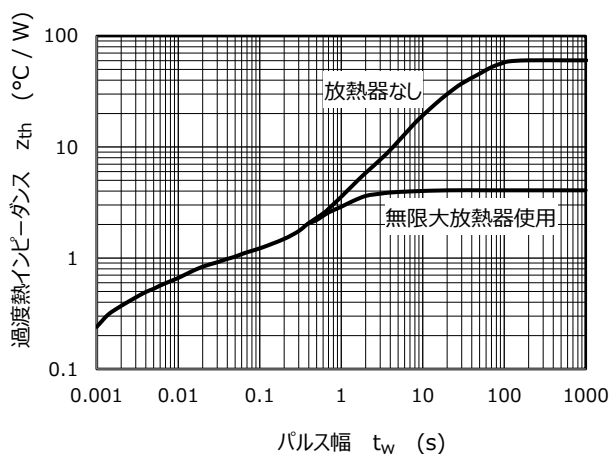


図 6.5 過渡熱インピーダンスの例

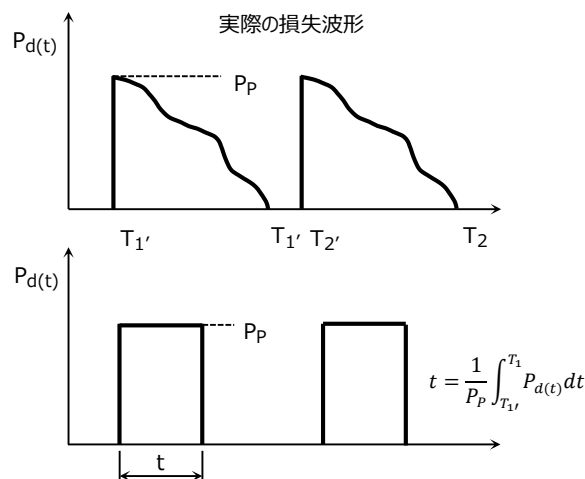
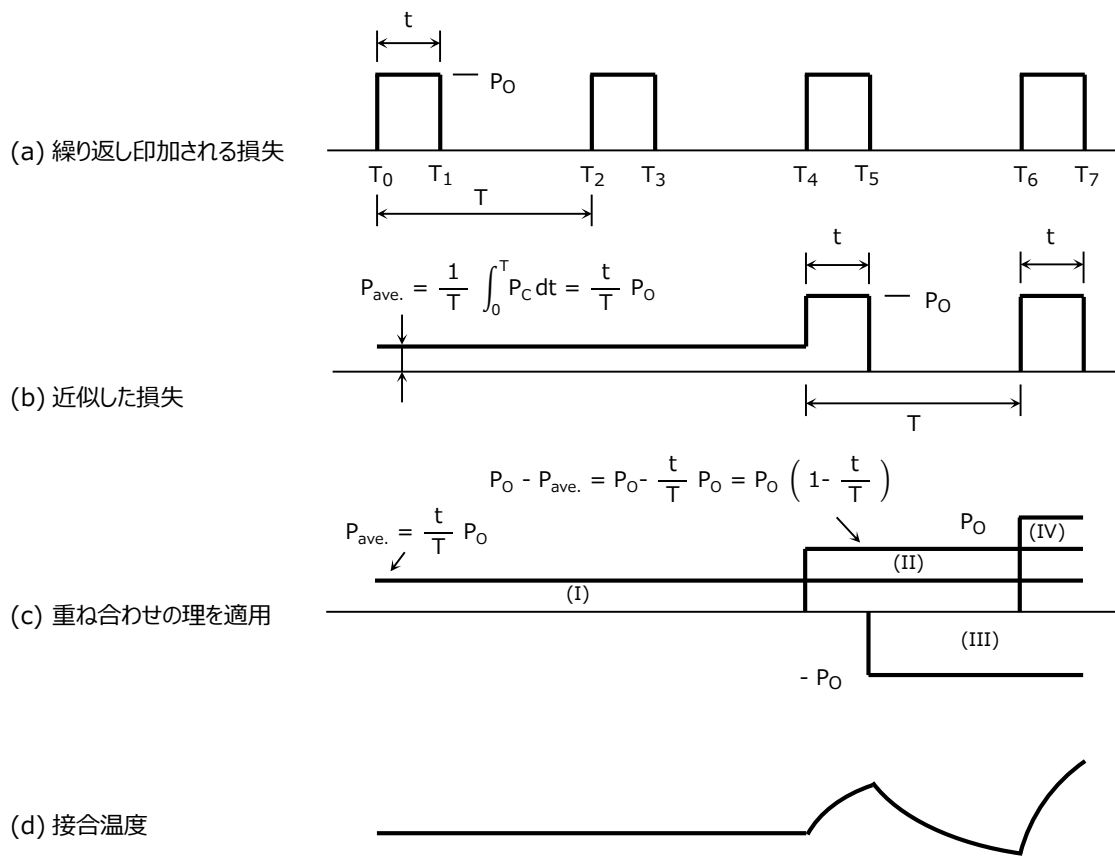


図 6.6 損失波形の矩形波への近似

図 6.6 のような、周期 T で連続するパルスの損失を印加したときには、下記の重ね合わせの理を用いて求めた式 6-12 から T_{jmax} を算出します。



$$\Delta T_{j(I)} = P_O \cdot \frac{t}{T} \cdot R_{th(j-a)} \dots\dots\dots (6-8)$$

$$\Delta T_{j(II)} = P_O \cdot \left(1 - \frac{t}{T} \right) \cdot z_{th(T+t)} \dots\dots\dots (6-9)$$

$$\Delta T_{j(III)} = -P_O \cdot z_{th(T)} \dots\dots\dots (6-10)$$

$$\Delta T_{j(IV)} = P_O \cdot z_{th(t)} \dots\dots\dots (6-11)$$

$$T_{jmax} = P_O \cdot \left[\frac{t}{T} \cdot R_{th(j-a)} + \left(1 - \frac{t}{T} \right) \cdot z_{th(T+t)} - z_{th(T)} + z_{th(t)} \right] + T_a \dots\dots\dots (6-12)$$

パルス的な電力を印加する回路の放熱設計では、式 6-12 で求めた T_{jmax} がダイオードの接合温度最大定格を超えないよう、十分な注意が必要です。

今までの説明では、矩形波を扱いましたが、実際にダイオードを電子機器に使用するとき、 $P_{j(t)}$ が矩形波であることはまれです。そのようなときには、損失波形を図 6.7 のように矩形波に近似して、式 6-12 により T_{jmax} を算出することができます。図 6.7 の (a) と (b) は、最大値 P_p を 0.7 倍して、パルス幅をそれぞれ 0.91 倍と 0.71 倍にします。また、(c) と (d) のときでは、最大値は同一としてパルス幅を、それぞれ 0.63 倍と 0.5 倍にすることでほぼ同等の面積に近似することができます。

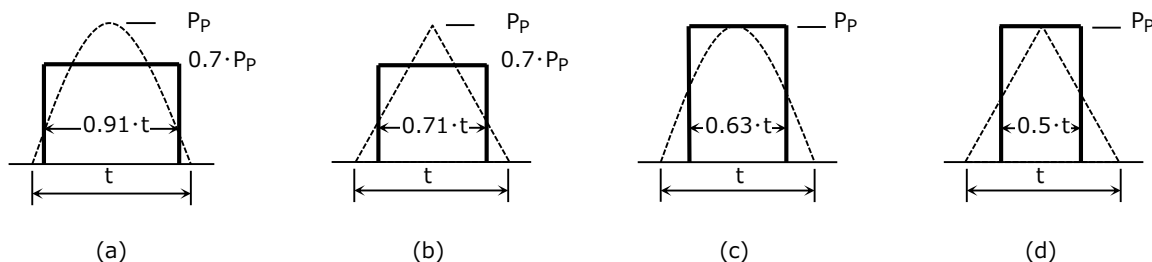


図 6.7 正弦波、三角波状の損失波形の矩形波への近似方法

なお、データシートに掲載している過渡熱インピーダンスの最小パルス幅より、短いパルス幅の熱インピーダンス値が必要なときには、式 6-13 を使用して求めたいパルス幅の過渡熱インピーダンスを近似することができます。

$$Z_{th}(t_{w1}) = Z_{th}(t_{w2}) \cdot \sqrt{\frac{t_{w1}}{t_{w2}}} \dots\dots\dots (6-13)$$

- $Z_{th}(t_{w1})$: 求めたいパルス幅 t_{w1} の過渡熱インピーダンス (°C/W)
- $Z_{th}(t_{w2})$: データシート記載の最小パルス幅 t_{w2} での過渡熱インピーダンス (°C/W)
- t_{w1} : 求めたい過渡熱インピーダンスのパルス幅 (s)
- t_{w2} : データシートに記載している過渡熱インピーダンス特性の最小パルス幅 (s)

SBD の製品ページはこちら	→ Click Here
CUHS15F40 の製品紹介ページはこちら	→ Click Here
CUS10F40 の製品紹介ページはこちら	→ Click Here
SBD のパラメトリックサーチはこちら	→ 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
ダイオードの基礎 : ダイオードの種類とその概要 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ダイオードの基礎 : 絶対最大定格と電気的特性 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ダイオードの基礎 : ダイオードの損失と放熱設計 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ディスクリート半導体の温度算出方法 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ディスクリート半導体熱設計の勘どころ (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ディスクリート半導体熱設計の勘どころ 2 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ディスクリート半導体熱設計の勘どころ 3 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
SBD の PSpice®モデルはこちら	→ Click Here
SBD の LTspice®モデルはこちら	→ Click Here
ダイオードの製品ページはこちら	→ Click Here
ダイオードの FAQ はこちら	→ Click Here
ダイオードの品番付与法はこちら	→ Click Here
ダイオードのパッケージ / 包装情報はこちら	→ Click Here
ダイオードの e-Learning はこちら	→ Click Here

* PSpice®は、Cadence Design Systems, Inc. の登録商標です。

* LTspice®は ADI 社 (Analog Devices, Inc.) のシミュレーション・ソフトウェアおよびその登録商標です。

* その他の社名・商品名・サービス名などは、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

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。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>