

ダイオードの基礎 (ダイオードの損失と放熱設計)

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、これらダイオードの損失と放熱設計について説明をしています。

目次

概要	1
目次	2
1. ダイオードの損失	4
2. 放熱設計	6
2.1. 許容損失と放熱等価回路	6
2.2. 熱抵抗	7
2.3. 接合部のパルス応答	8
製品取り扱い上のお願い	13

目次

図 1.1	ダイオードのスイッチング波形例	4
図 2.1	放熱等価回路	6
図 2.2	熱抵抗と放熱板面積 (参考例)	8
図 2.3	熱インピーダンス回路	8
図 2.4	パルス状の損失が印加されたときの	9
図 2.5	過渡熱インピーダンスデータ例	9
図 2.6	周期 T で矩形波状の損失が繰り返し印加されるときの接合温度	10
図 2.7	損失波形の近似	11
図 2.8	正弦波、三角波上の損失パルスの矩形波への近似方法	11

1. ダイオードの損失

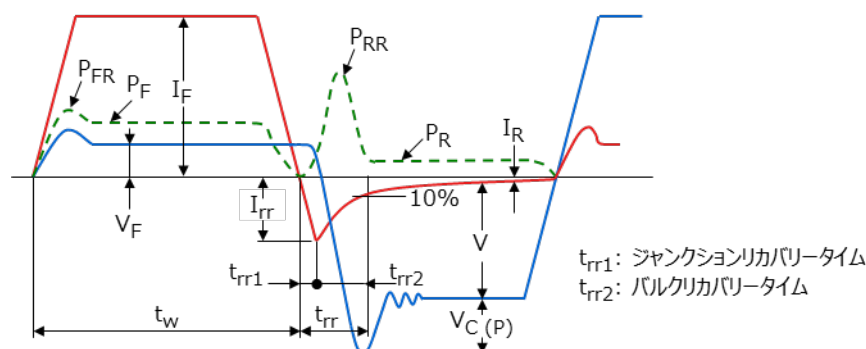


図 1.1 ダイオードのスイッチング波形例

(1) 順方向損失 P_F

通常、Si ダイオードの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。また、SiC SBD が大電流領域で動作するときの V_F は正の温度係数を持ちます。従って、順方向損失および接合温度が最大定格を超えないような設計をしてください。

(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 は温度に対し指数関数的に増加するため、高温領域では損失が無視できなくなります。さらに、 I_R による自己発熱が放熱能力を超え急激な熱暴走に陥る場合があります。このため逆方向損失に対しては、接合温度の最大定格および熱暴走に対するマージンを十分にとった設計が必要です。

Si SBD と高速整流ダイオードは一般の整流ダイオードに対して I_R が大きくなります。特に、Si 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。Si SBD や高速整流ダイオードを使用する際には、順方向および逆方向の損失を考慮し、素子に掛る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、最悪条件を考慮した実機による十分な評価を実施して問題が無いことを確認してください。

(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の急峻なパルス（矩形波）が印加された場合生じる損失です。

パルスが印加され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、定常状態よりも大きな電力消費をすることになります（図 1.1 参照）。

これは、立ち上がりの急峻なパルスが印加された場合、瞬時的にキャリアが蓄積された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、その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。この現象をフォワードリカバリー（forward recovery）といいます。このフォワードリカバリータイム 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、急峻な逆電圧パルスがダイオードに印加されたとき、直ちに逆電流を阻止できずにリカバリータイム t_{rr} 期間中に逆電流が流れるために生じる損失です (図 1.1 参照)。逆方向損失 P_{RR} は、式 1-1 で近似されます。

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

- 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} の期間であり、 t_{rr1} の期間での損失は小さいことから、式 1-1 は式 1-2 に近似することができます。

$$P_{RR} \approx \frac{1}{6} i_{rr} \cdot t_{rr2} \cdot V_R \cdot f \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

- i_{rr} : 逆方向電流の波高値 (A)
- t_{rr2} : バルクリカバリータイム (s)
- V_R : 逆電圧(定常時) (V)
- f : 周波数 (Hz)

2. 放熱設計

2.1. 許容損失と放熱等価回路

ダイオードの許容損失は、素子を使用される周囲温度 T_a 、外囲器温度 T_c 、接合部から雰囲気までの全熱抵抗 $R_{th(j-a)}$ 、接合部から外囲器までの全熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ 、および、最大接合温度 $T_{j(max)}$ により式 2-1 と式 2-2 の関係が成り立ちます。

$$P_{C(max)(T_a)} = \frac{T_{j(max)} - T_a}{R_{th(j-a)}} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$P_{C(max)(T_c)} = \frac{T_{j(max)} - T_c}{R_{th(j-c)}} \dots\dots\dots (2-2)$$

ダイオードの接合部で発生する熱が外部へ伝導される経路は、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されます。熱的定常状態では、図 2.1 の放熱等価回路で表されます。

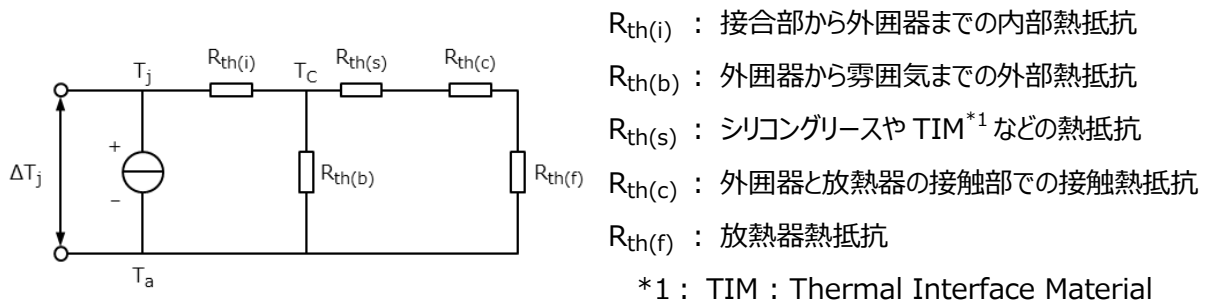


図 2.1 放熱等価回路

接合部から雰囲気までの全熱抵抗 $R_{th(j-a)}$ は、図 2.1 の等価回路から式 2-3 で求められます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + \frac{R_{th(b)} \cdot (R_{th(s)} + R_{th(c)} + R_{th(f)})}{R_{th(b)} + R_{th(s)} + R_{th(c)} + R_{th(f)}} \dots\dots\dots (2-3)$$

放熱器を使用しない素子の $R_{th(j-a)}$ は、式 2-4 で求められます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(b)} \dots\dots\dots (2-4)$$

放熱器を使用しない素子のデータシートでは、 $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ での許容損失が規定されていますが、特に指定されていない限り式 2-4 で与えられる $R_{th(j-a)}$ と $T_{j(max)}$ から

$$P_{C(max)(T_a=25^\circ\text{C})} = \frac{T_{j(max)} - 25}{R_{th(j-a)}} \dots\dots\dots (2-5)$$

で求められる値を記載しています。外圍器から雰囲気への熱抵抗 $R_{th(b)}$ は外圍器の材質や形状により決定されますが、一般的に $R_{th(i)}$ 、 $R_{th(c)}$ 、 $R_{th(s)}$ 、 $R_{th(f)}$ に比較して値が大きいため、式 2-3 式は簡略化して式 2-6 を使うこともできます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)} + R_{th(f)} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

定常的な損失を扱う場合には式 2-6 を使用することにより、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で使用する場合には、 T_j のピーク値が $T_{j(max)}$ を超えないよう十分に注意することが必要です。

2.2. 熱抵抗

図 2.1 の放熱等価回路における熱抵抗はそれぞれ次のように説明されます。

(1) 接合部-外圍器間熱抵抗(内部熱抵抗) $R_{th(i)}$

ダイオードの接合部から外圍器までの内部熱抵抗 $R_{th(i)}$ は、ダイオードの構造や材料などに決まるもので、それぞれのダイオード固有の値です。この熱抵抗値を測定するためには、ダイオードを一定の外圍器温度に強制的に冷却した状態にすることが必要です。外圍器温度を一定値 $T_C=25^\circ\text{C}$ に冷却して動作する場合に、ダイオードに許容される最大損失 $P_C(max)$ は、

$$P_{C(max)} = \frac{T_{j(max)} - T_C}{R_{th(i)}} = \frac{T_{j(max)} - 25}{R_{th(i)}} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

で求められます。

放熱器に取り付け可能なダイオードのデータシートなどでは $T_C=25^\circ\text{C}$ 、または、無限大放熱器を使用したときの許容損失が記載されていますが、これは式 2-7 のように、ダイオードの内部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、外圍器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、取り付け方に大きく影響されます。接触面にシリコングリースを塗布したり、TIM 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 $R_{th(s)}$

ダイオードを放熱器から絶縁する必要があるときは、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、厚さおよび面積により決定され無視できない値となります。

樹脂モールドにより絶縁された外圍器では、記載されたダイオードの熱抵抗に絶縁物の熱抵抗 $R_{th(s)}$ を含んでいます。

(4) 放熱器熱抵抗 $R_{th(f)}$

放熱器の熱抵抗は放熱器表面より雰囲気へ逃げる熱の経路の分布定数的熱抵抗と考えられます。雰囲気の状態、放熱器と雰囲気との温度差および放熱器の有効面積に関係してきますが、数式的に表現することは難しく、現状では全て実測に

より決めています。図 2.2 は放熱器の中央にダイオードを 1 個取り付け、放熱器を垂直位置にしたときの熱抵抗の実測値です。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。

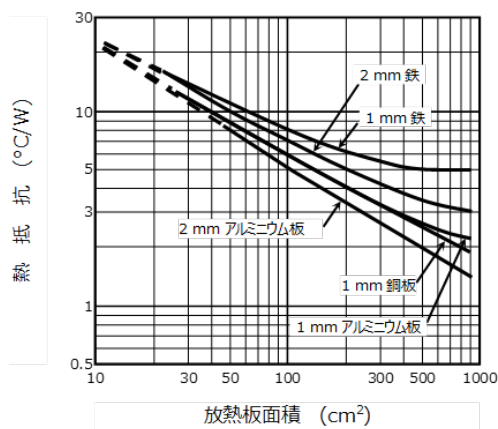


図 2.2 熱抵抗と放熱板面積 (参考例)

2.3. 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 2.3 のような分布定数回路で求められます。

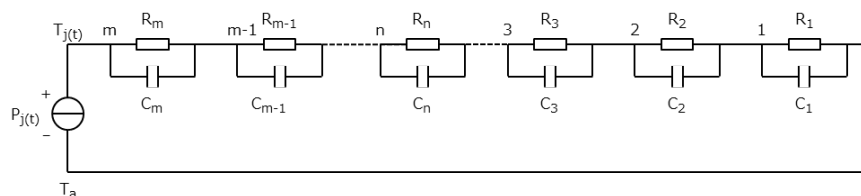


図 2.3 熱インピーダンス回路

図 2.3 の回路に図 2.4 のパルス状の損失 $P_{j(t)}$ が印加されたとき、熱的安定状態における m 番目の CR 並列回路に現れる温度変化 $t_j(t)$ は式 2-8、式 2-9 で表されます。

(a)の領域 ($P_{j(t)} = P_O$) では、

$$T_{j(t)} = \sum_{n=1}^m \{ (P_O \cdot R_n) - T_{n(min)} \} \left(1 - \exp^{-\frac{t}{C_n \cdot R_n}} \right) + T_{n(min)} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

(b)の領域($P_{j(t)} = 0$)では、

$$T_{j(t)} = \sum_{n=1}^m \{ T_{n(max)} \cdot \exp^{-\frac{t}{C_n \cdot R_n}} \} \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

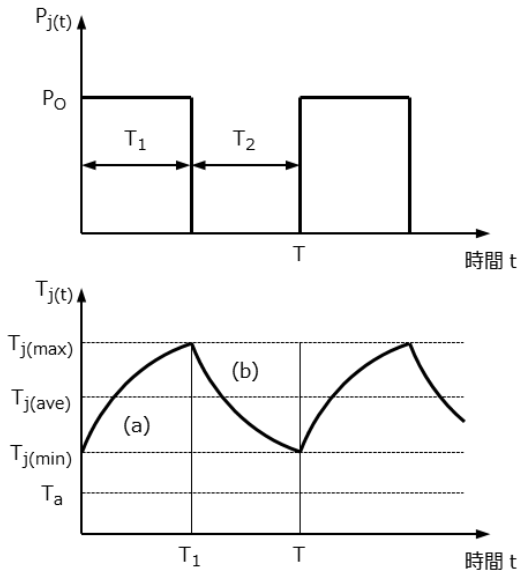


図 2.4 パルス状の損失が印加されたときの接合温度の変化

通常のダイオードでは、 $m=4$ 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 の値が明確でないときに T_j の値を算出することは困難です。そこで、一般的には図 2.5 のような過渡熱抵抗データを使用して $T_{j(max)}$ を推定します。

単発矩形波のパルス状の損失 (パルス幅 t 、尖頭値 P_O) が印加されたとき、パルス幅 t に対する過渡熱抵抗 $r_{th(t)}$ を使用することにより $T_{j(max)}$ は、式 2-10 となります。

$$T_{j(max)} = r_{th(t)} \cdot P_O + T_a \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

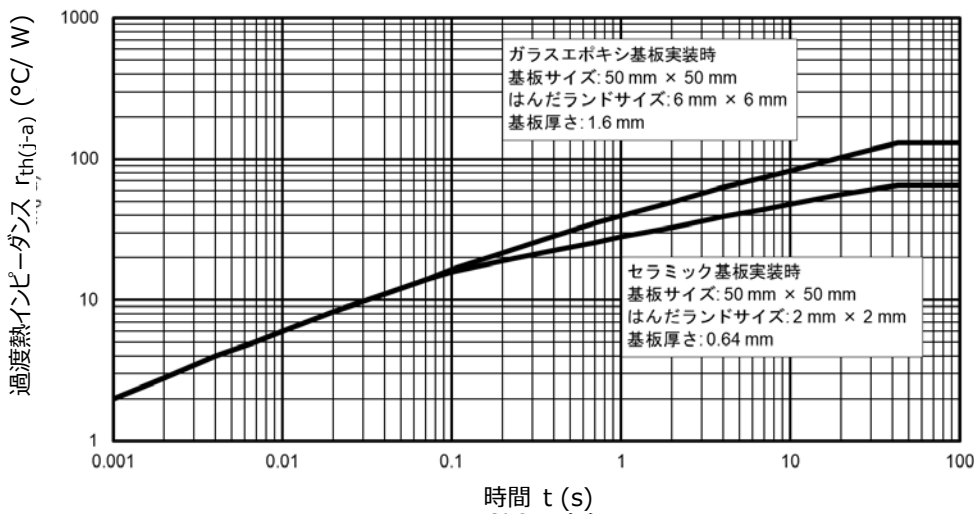


図 2.5 過渡熱インピーダンスデータ例

図 2.6 のような周期 T の連続パルスの損失が印加されたときには、下記の重ね合わせの理を用いて求めた式 2-15 から $T_j(\max)$ を算出します。

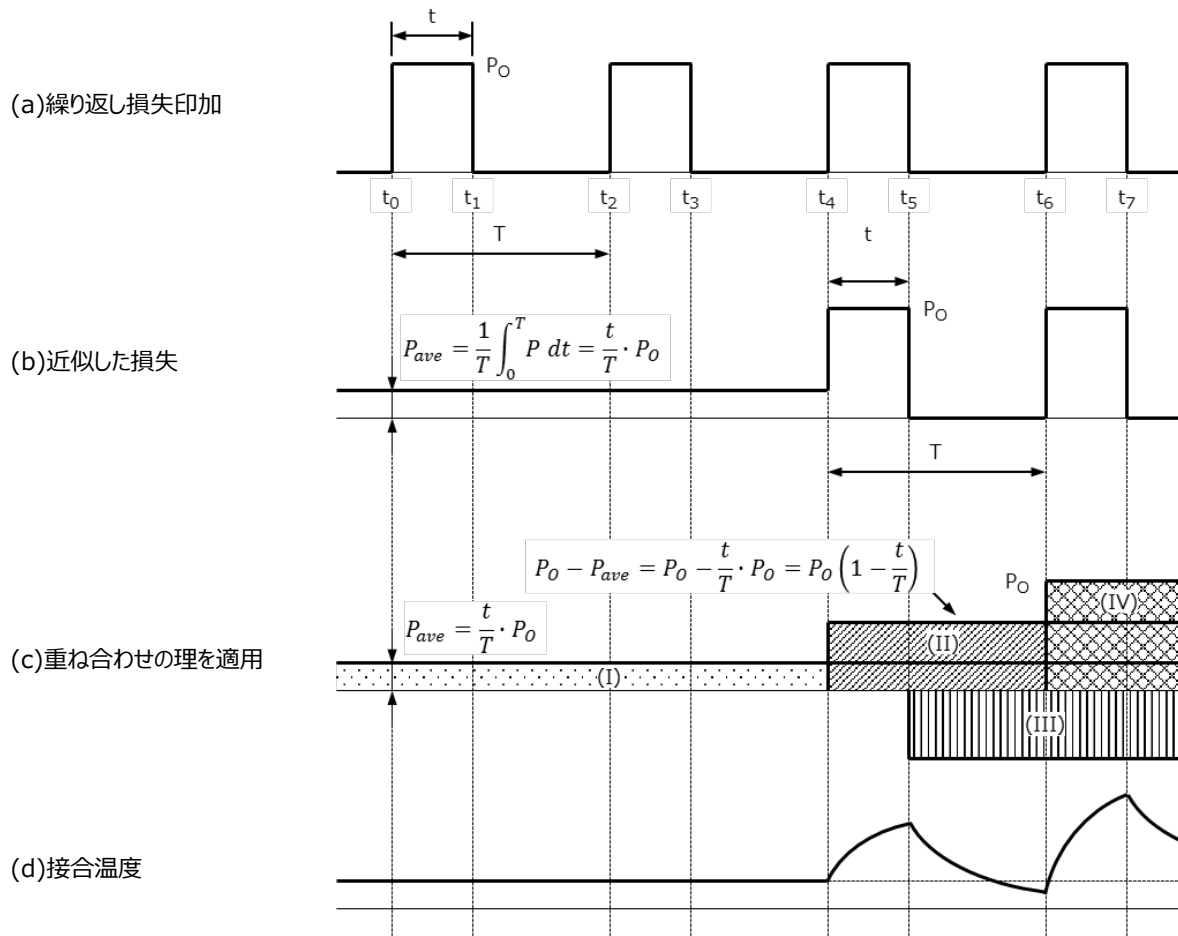


図 2.6 周期 T で矩形波状の損失が繰り返し印加されるときにの接合温度

(I)の領域の接合温度上昇

$$\Delta T_{j(I)} = P_0 \cdot \frac{t}{T} \cdot R_{th(j-a)} \dots\dots\dots (2-11)$$

(II)の領域の接合温度上昇

$$\Delta T_{j(II)} = P_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot r_{th(\tau+t)} \dots\dots\dots (2-12)$$

(III)の領域の接合温度上昇

$$\Delta T_{j(III)} = -P_0 \cdot r_{ch(\tau)} \dots\dots\dots (2-13)$$

(IV)の領域の接合温度上昇

$$\Delta T_{j(IV)} = P_0 \cdot r_{th(t)} \dots\dots\dots (2-14)$$

式 2-11 から式 2-14 までをまとめて、最大接合温度 $T_{j(max)}$ を求めると式 2-15 となります。

$$T_{j(max)} = P_o \cdot \left\{ \frac{t}{T} \cdot R_{th(j-a)} + \left(1 - \frac{t}{T} \right) \cdot r_{th(T+t)} - r_{th(T)} + r_{th(t)} \right\} + T_a \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

パルス的な電力が印加される回路の放熱設計では、式 2-15 で求められた $T_{j(max)}$ がダイオードの最大接合温度定格を超えないように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機器に応用する場合、 $P_j(t)$ が矩形波であることはまれです。そのような場合は、損失波形を図 2.7 のように矩形波に近似し、式 2-15 により $T_{j(max)}$ を算出することができます。

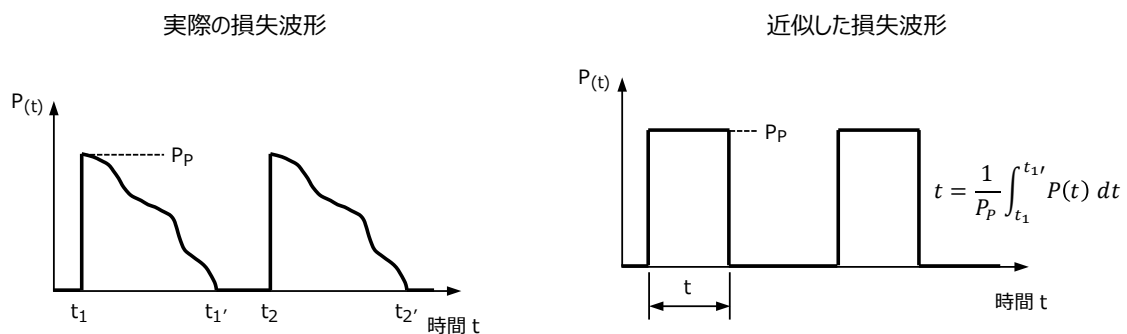


図 2.7 損失波形の近似

矩形波の近似方法として、損失波形が正弦波や三角波の場合には、図 2.8 のようにして近似することができます。図 2.8 の (a)、(b) では、最大値 P_p を 0.7 倍にして、パルス幅をそれぞれ 0.91 倍、0.71 倍にします。また、(c)、(d) では最大値は同一としてパルス幅を 0.63 倍、0.5 倍とすることで、ほぼ同等の面積に近似することができます。

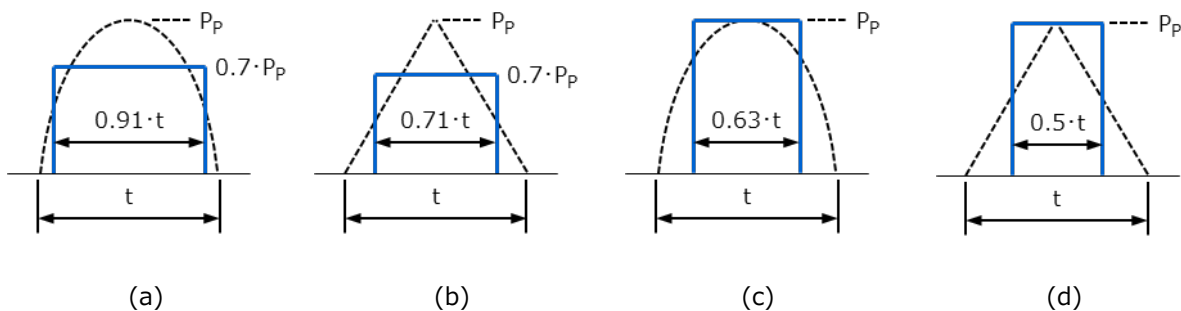


図 2.8 正弦波、三角波上の損失パルスの矩形波への近似方法

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/>