

お客様各位

---

## カタログ等資料中の旧社名の扱いについて

---

2010年4月1日を以ってNECエレクトロニクス株式会社及び株式会社ルネサステクノロジが合併し、両社の全ての事業が当社に承継されております。従いまして、本資料中には旧社名での表記が残っておりますが、当社の資料として有効ですので、ご理解の程宜しくお願い申し上げます。

ルネサスエレクトロニクス ホームページ (<http://www.renesas.com>)

2010年4月1日  
ルネサスエレクトロニクス株式会社

【発行】ルネサスエレクトロニクス株式会社 (<http://www.renesas.com>)

【問い合わせ先】<http://japan.renesas.com/inquiry>

## ご注意書き

1. 本資料に記載されている内容は本資料発行時点のものであり、予告なく変更することがあります。当社製品のご購入およびご使用にあたりましては、事前に当社営業窓口で最新の情報をご確認いただきますとともに、当社ホームページなどを通じて公開される情報に常にご注意ください。
2. 本資料に記載された当社製品および技術情報の使用に関連し発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権の侵害等に関し、当社は、一切その責任を負いません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
3. 当社製品を改造、改変、複製等しないでください。
4. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器の設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因しお客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
5. 輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」その他輸出関連法令を遵守し、かかる法令の定めるところにより必要な手続を行ってください。本資料に記載されている当社製品および技術を大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的その他軍事用途の目的で使用しないでください。また、当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器に使用することができません。
6. 本資料に記載されている情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、誤りがないことを保証するものではありません。万一、本資料に記載されている情報の誤りに起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社は、一切その責任を負いません。
7. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」、「高品質水準」および「特定水準」に分類しております。また、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使われることを意図しておりますので、当社製品の品質水準をご確認ください。お客様は、当社の文書による事前の承諾を得ることなく、「特定水準」に分類された用途に当社製品を使用することができません。また、お客様は、当社の文書による事前の承諾を得ることなく、意図されていない用途に当社製品を使用することができません。当社の文書による事前の承諾を得ることなく、「特定水準」に分類された用途または意図されていない用途に当社製品を使用したことによりお客様または第三者に生じた損害等に関し、当社は、一切その責任を負いません。なお、当社製品のデータ・シート、データ・ブック等の資料で特に品質水準の表示がない場合は、標準水準製品であることを表します。  
標準水準： コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット  
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、防災・防犯装置、各種安全装置、生命維持を目的として設計されていない医療機器（厚生労働省定義の管理医療機器に相当）  
特定水準： 航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、原子力制御システム、生命維持のための医療機器（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの、治療行為（患部切り出し等）を行うもの、その他直接人命に影響を与えるもの）（厚生労働省定義の高度管理医療機器に相当）またはシステム等
8. 本資料に記載された当社製品のご使用につき、特に、最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他諸条件につきましては、当社保証範囲内でご使用ください。当社保証範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
9. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めておりますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は耐放射線設計については行っておりません。当社製品の故障または誤動作が生じた場合も、人身事故、火災事故、社会的損害などを生じさせないようお客様の責任において冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、機器またはシステムとしての出荷保証をお願いいたします。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様が製造された最終の機器・システムとしての安全検証をお願いいたします。
10. 当社製品の環境適合性等、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合せください。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、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、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、当社は、一切その責任を負いません。
11. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを固くお断りいたします。
12. 本資料に関する詳細についてのお問い合わせその他お気付きの点等がございましたら当社営業窓口までご照会ください。

注 1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサスエレクトロニクス株式会社およびルネサスエレクトロニクス株式会社とその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいいます。

注 2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注 1 において定義された当社の開発、製造製品をいいます。



ユーザーズ・マニュアル

# パワーMOSFETの安全動作領域について

---

資料番号 D13877JJ6V0UM00 (第6版)

発行年月 February 2008 NS

© NEC Electronics Corporation 1988

- 本資料に記載されている内容は2008年2月現在のものです、今後、予告なく変更することがあります。量産設計の際には最新の個別データ・シート等をご参照ください。
- 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。当社は、本資料の誤りに関し、一切その責を負いません。
- 当社は、本資料に記載された当社製品の使用に関連し発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権の侵害等に関し、一切その責を負いません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
- 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器の設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因しお客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責を負いません。
- 当社は、当社製品の品質、信頼性の向上に努めておりますが、当社製品の不具合が完全に発生しないことを保証するものではありません。また、当社製品は耐放射線設計については行っていません。当社製品をお客様の機器にご使用の際には、当社製品の不具合の結果として、生命、身体および財産に対する損害や社会的損害を生じさせないよう、お客様の責任において冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計を行ってください。
- 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」、「特別水準」およびお客様に品質保証プログラムを指定していただく「特定水準」に分類しております。また、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使われることを意図しておりますので、当社製品の品質水準をご確認ください。
  - 標準水準：コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット
  - 特別水準：輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、防災・防犯装置、各種安全装置、生命維持を目的として設計されていない医療機器
  - 特定水準：航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、原子力制御システム、生命維持のための医療機器、生命維持のための装置またはシステム等当社製品のデータ・シート、データ・ブック等の資料で特に品質水準の表示がない場合は、標準水準製品であることを表します。意図されていない用途で当社製品の使用をお客様が希望する場合には、事前に当社販売窓口までお問い合わせください。

(注)

- (1) 本事項において使用されている「当社」とは、NECエレクトロニクス株式会社およびNECエレクトロニクス株式会社がその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいう。
- (2) 本事項において使用されている「当社製品」とは、(1)において定義された当社の開発、製造製品をいう。

## 本版で改訂された主な箇所

箇所	内容
全般	逆バイアスSOA (RBSOA) についての記述を削除
p. 4	1. タイトルと前文を変更
	2. FBSOA定格に二次降伏制限 (ラインD) を追加, 図1を変更
p. 5	3. タイトルと図4を変更
p. 22	4.3 チャネル温度算出の計算式と図21を変更
p. 23	4.3 チャネル温度算出の計算式を変更

本文欄外の 印は、本版で改訂された主な箇所を示しています。

この" "をPDF上でコピーして「検索する文字列」に指定することによって、改版箇所を容易に検索できます。

# 1. パワーMOSFETの安全動作領域 ( FBSOA = Forward Bias Safe Operating Area ) とは

パワーMOSFETの安全動作領域 ( 以下FBSOAという ) は、動作状態におけるパワーMOSFETの動作軌跡が電圧、電流、電力、二次降伏制限領域にあるか確認するために用いる定格です。

ここでは、パワーMOSFETのFBSOAの適用方法およびチャネル温度の算出方法について2SK735を一例に説明します。

**注意** 2SK735は本資料初版発行当時の製品で、現在は廃止品扱いとなっております。本資料の記述は、お客様が仕様検討される際の参考事例としてご覧ください。

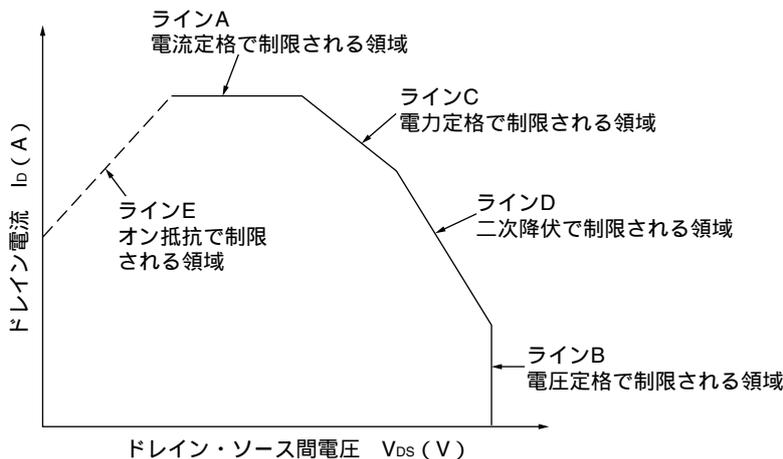
## 2. 順バイアスSOA ( FBSOA ) 定格

パワーMOSFETをスイッチング・レギュレータのようにインダクティブ負荷などのスイッチング用途で用いる場合、ターンオン時およびターンオフ時にFBSOAを適用します。

図1のようにFBSOAは5つの制限領域から成ります。

- 電流定格 ..... ラインA
- 電圧定格 ..... ラインB
- 電力定格 ..... ラインC
- 二次降伏制限 ..... ラインD
- オン抵抗制限 ..... ラインE

図1 FBSOA定格



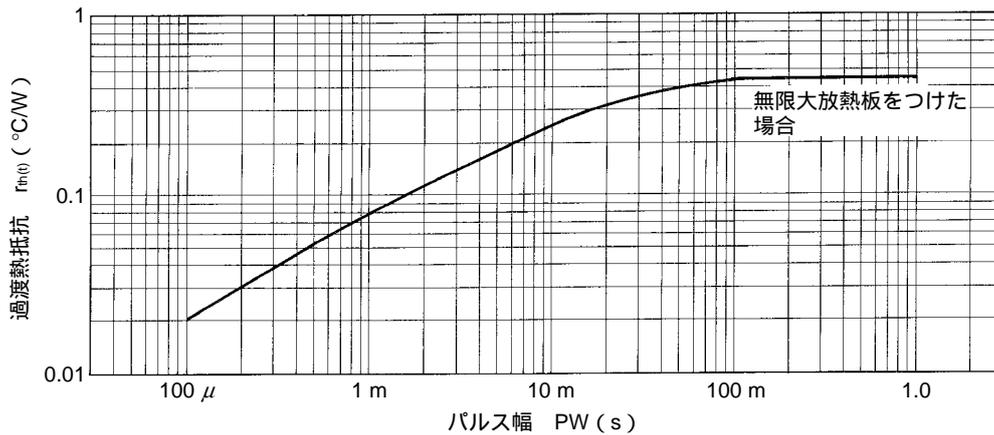
ラインAは電流定格で制限される領域であり、パルスの時間幅でドレインの電流定格を規格化しております。この領域を決定する要素は、ボンディング・ワイヤの径やソース・ボンディング・パットの大きさ、熱抵抗などです。スイッチング電源の異常時やランプ負荷のスイッチング・オン時にサージ状に突入電流が流れますが、このとき、定格以内に入るよう注意してください。

ラインBはドレイン・ソース間電圧定格 ( $V_{DSS}$ ) で制限される領域です。インダクティブ負荷のスイッチングで特にターンオフ時にこの領域を越えないように注意してください。この定格を瞬時でも越えるような電圧が印加された場合、特性劣化あるいは破壊にいたることもあります。

ラインCはチップおよびパッケージで決定される熱抵抗の制限ラインです。一般にパルス時間幅でこのラインを規定しています。直流電力損失はチャンネル温度の最大定格値と定常熱抵抗によって決定されます。過渡的な電力損失の場合には、過渡熱抵抗で考えます。

図2に過渡熱抵抗対パルス幅の特性グラフを示します。一般に熱の伝達時間はパルス幅、チップのマウント方法や半田の厚さなどにより決定され、チップから放熱板までの伝達時間は1~10 s程度、放熱板から外気までは数分を要します。また、パルス幅が数10  $\mu$ sと短い場合には放熱板を考慮する必要はありません。

図2 過渡熱抵抗対パルス幅特性データ



ラインDはMOSFETセルの二次降伏により制限されるラインです。この領域では、局所的なセルに電流集中が起こることで熱暴走を生じ、場合によっては破壊にいたることもあります。ダイナミッククランプ回路などでの用途において制限ラインを超えないよう注意が必要です。

ラインEはドレイン・ソース間のオン抵抗によって制限される領域で、実際の応用では $T_{ch} = 150^{\circ}\text{C}$ の条件でのオン抵抗制限ラインを考慮する必要があります。

### 3. 実用回路でのFBSOAの適用法とチャンネル温度の算出方法について

一般にパワーMOSFETを誘導性負荷にて図3のようなスイッチング動作をさせた場合、図4に示すようにターンオン時にはしゃ断領域 A 飽和領域 B，ターンオフ時には飽和領域 B しゃ断領域 A に動作領域を描いて移動します。この場合のターンオン時、ターンオフ時の動作軌跡がSOA定格内にあるかの確認方法について説明します。

図3 実使用回路例

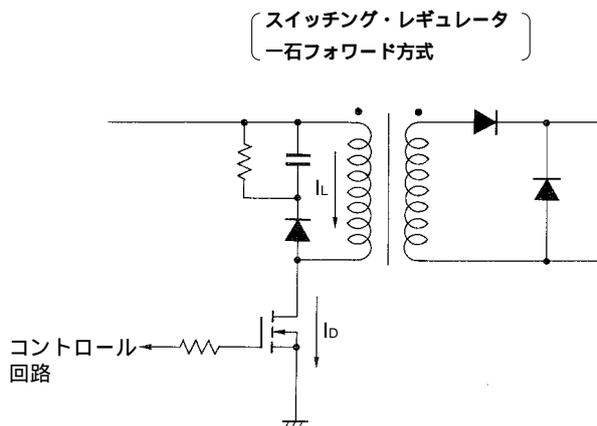
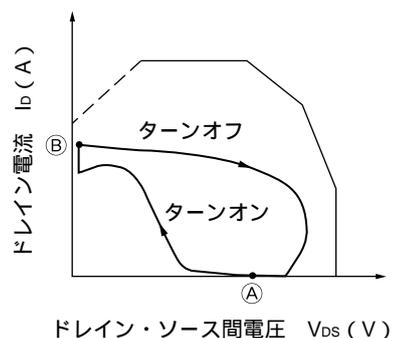


図4 スwitching動作軌跡



### 3.1 FBSOA定格の適用方法

パワーMOSFETのスイッチング時のターンオン時間の動作軌跡が図7に示すような場合、ターンオン時間 $t_i$ とオン時間 $\tau$ について、それぞれのパルス幅でSOA内に軌跡があるかのチェックを行います。

データ・シートに記載されているパルス幅のFBSOAはケース温度 $T_c = 25^\circ\text{C}$ の条件であり、実際の応用では周囲温度および放熱条件からケース温度が決定するためFBSOAを書き替える必要があります。その手順について次に示します。

- (1)  $V_{DSS}$ 定格ラインは、 $T_c = 25^\circ\text{C}$ と同一にします。
- (2) 過渡熱抵抗のデータからパワーMOSFETの動作条件に対する過渡熱抵抗 $r_{th(ch-c)}$ を求めます。
- (3)  $T_c, T_{ch}$  ( $T_{ch}$ は $T_{ch(MAX)}$ )とします。)を設定し、(2)で求めた $r_{th(ch-c)}$ から最大許容損失ライン $P_{d(MAX)}$ を求め損失ラインを引きます。

$$P_{d(MAX)} = \frac{T_{ch(MAX)} - T_c}{r_{th(ch-c)}} \quad (3-1)$$

- (4) オン抵抗の温度依存性から $T_{ch} = 150^\circ\text{C}$ におけるオン抵抗 $R_{DS(on)}(T_{ch} = 150^\circ\text{C})$ を求め、

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS(on)}(T_{ch} = 150^\circ\text{C})} \quad (3-2)$$

としてオン抵抗の制限ラインを引きます。

この手法を用いてターンオン時、オン時についてFBSOAを書き替えSOA内にあるかの確認を行います。

図5 オン時の動作軌跡

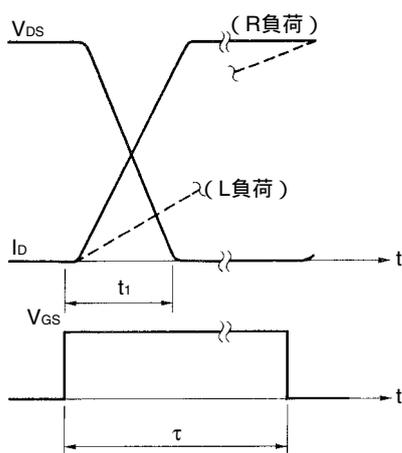
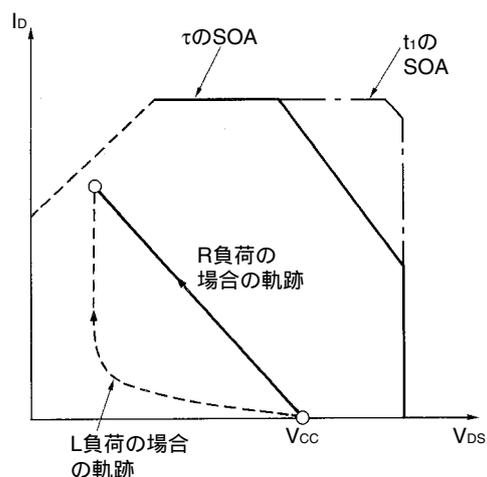


図6 FBSOA



### 3.2 チャネル温度の算出方法

次にパワーMOSFETのチャネル温度のピーク値が絶対最大定格内にあるかの確認を行います。その算出方法について説明します。

#### 3.2.1 パワーMOSFETの電力損失

パワーMOSFETの電力損失は次式から成り立ちます。

$$P_T = P_S + P_G + P_{on} + P_L + P_D \quad (3-3)$$

ここで $P_T$  = 放熱すべき全損失

$P_S$  = スイッチング損失

$P_{on}$  = オン時の損失

$P_G$  = ゲート損失

$P_L$  = オフ時のもれ電流 $I_{DSS}$ による損失

$P_D$  = パワー-MOSFETに内蔵されるダイオードの損失

です。

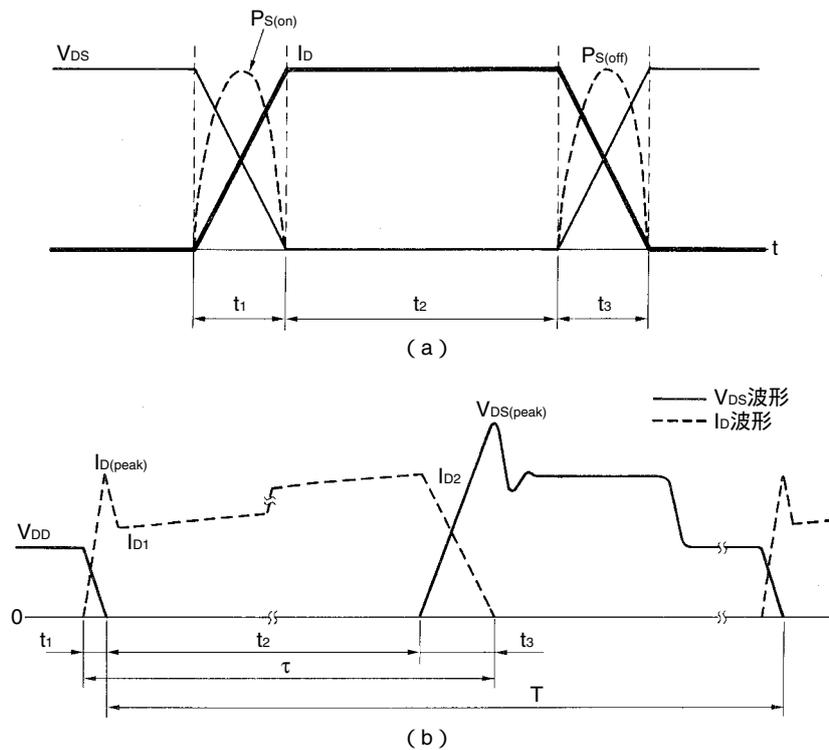
(1) スイッチング損失 $P_S$

パワー-MOSFETは多数キャリア・デバイスであるためバイポーラ・トランジスタと比較するとスイッチング・スピードが約100倍速く、注意深く設計すればスイッチング損失 $P_S$ は無視できる大きさまで減らせます。しかしそのようなケースはまれであり一般にスイッチング損失は次式で表されます。

$$P_S = f [t_1 \int_0^{t_1} V_{DS} \cdot I_D \cdot dt + t_3 \int_0^{t_3} V_{DS} \cdot I_D \cdot dt] \quad (3-4)$$

ここでは $f$ スイッチング周波数、 $t_1$ はターンオン時間、 $t_3$ はターンオフ時間です。(図7(a)を参照願います。)

図7 スイッチング波形



たとえば図3のように1石フォワード形のスイッチング・レギュレータに用いた場合、通電波形は図7(b)のようになり、この場合のスイッチング損失は次式から計算されます。

$$\text{ターンオン時の損失} : P_{S(on)} = \frac{1}{6} V_{DD} \cdot I_{D(peak)} \cdot t_1 \cdot f \quad (3-5)$$

$$\text{ターンオフ時の損失} : P_{S(off)} = \frac{1}{6} V_{DS(peak)} \cdot I_{D2} \cdot t_3 \cdot f \quad (3-6)$$

$$\text{スイッチング損失} : P_S = P_{S(on)} + P_{S(off)} \quad (3-7)$$

(2) ゲート損失 $P_G$

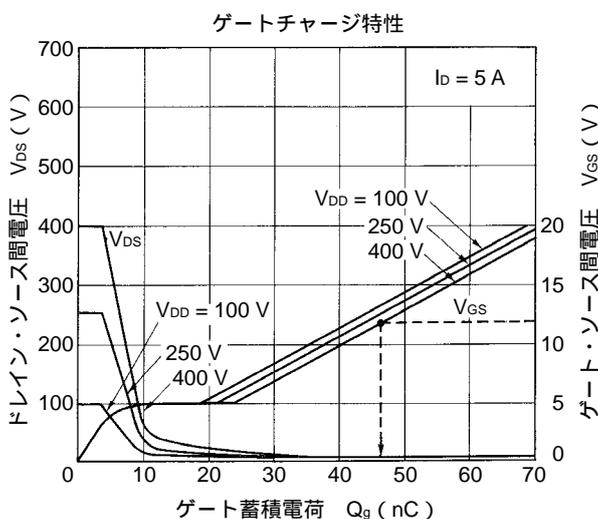
パワーMOSFETのゲート駆動損失はオン時の損失に比べれば非常に小さく、ゲート駆動の設計によっては無視できます。しかし入力容量 $C_{iss}$ の大きいパワーMOSFETを高速スイッチング動作させる場合には注意が必要です。

一般にゲート駆動損失は次式で計算できます。

$$P_G = V_{GS} \cdot Q_g \cdot f \quad (3-8)$$

$V_{GS}$ はゲート・ソース間のピーク電圧、 $Q_g$ はゲートに蓄積される容量のピーク値、 $f$ はスイッチング周波数です。 $Q_g$ の値はカタログに記載されている $V_{GS}$ 対 $Q_g$ の特性データ(図8に2SK735の特性データを示します。)から容易に読み取れます。たとえば $V_{GS} = 12\text{ V}$ でドライブし、 $I_D = 5\text{ A}$ 流したときの $Q_g$ の値は図8から46 nC ( $V_{DD} = 400\text{ V}$ のとき)となります。

図8 2SK735  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$ 対 $Q_g$ 特性データ



(3) オン時の損失 $P_{on}$

オン時の損失は次式で表されます。

$$P_{on} = I_{D(r.m.s.)}^2 \cdot R_{DS(on)}(T_{ch}) \quad (3-9)$$

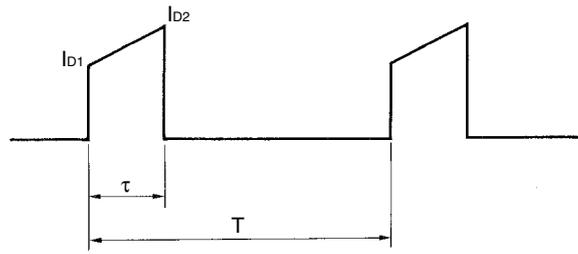
$I_{D(r.m.s.)}$ はドレイン実効値電流であり次式によって求められます。

$$I_{D(r.m.s.)} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T [i(t)]^2 dt \right\}^{1/2}$$

一石フォワード方式のスイッチングレギュレータのようにドレイン電流波形が台形波(図9を参照願います。)の場合は次式ようになります。

$$I_{D(r.m.s.)} = \frac{\tau}{T} \left\{ \frac{I_{D1}^2 + I_{D1} \cdot I_{D2} + I_{D2}^2}{3} \right\}^{1/2} \quad (3-10)$$

図9 ドレイン電流波形



また (3-9) 式においてオン抵抗 $R_{DS(on)}$ はチャネル温度 $T_{ch}$ の関数となります。それはオン抵抗が正の温度係数をもっているため温度の上昇とともにオン抵抗も増加するからです。図10に2SK735のオン抵抗チャネル温度の関係を示します。

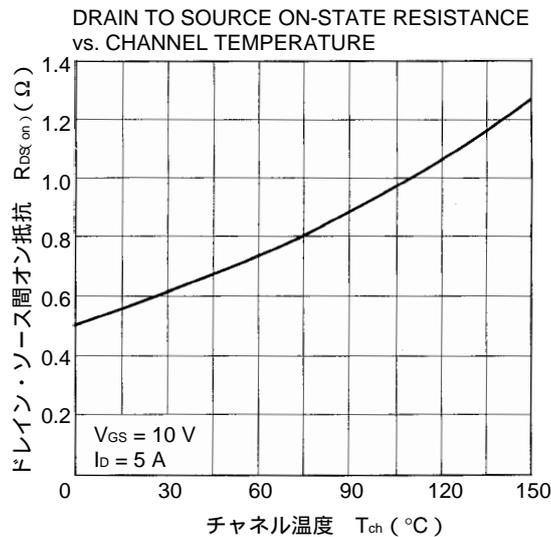
(4) オフ期間中の電力損失 $P_L$

オフ期間中の電力損失 $P_L$ は次式で表されます。

$$P_L = I_{DSS} \cdot V_{DS} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \quad (3-11)$$

通常 $I_{DSS}$ は数nA～数100 nA程度と小さく $P_L$ は無視できます。

図10 2SK735のオン抵抗対チャネル温度特性グラフ



(5) 寄生ダイオード損失 $P_D$

寄生ダイオード損失 $P_D$ は一般に次式で表せます。

$$P_D = I_{RD(AV)} \cdot V_{F(AV)} \quad (3-12)$$

この損失はターンオフの期間中に発生する損失で、特にHブリッジ形のモータ駆動やブリッジ回路の駆動で高周波動作 (20 kHz ~ ) させる場合に重要視されます。

### 3.2.2 チャンネル温度と電力損失の算出方法

パワーMOSFETの電力損失は3.2.1で説明しましたように5つの損失が考えられますが、この中でオン時の損失は重要な電力損失であり、またゲート損失 $P_G$ 、オフ時の損失 $P_L$ 、ダイオード損失 $P_D$ は一般用途では小さく無視できますので(3-3)式を(3-13)式のように変形します。

$$\begin{cases} P_T = P_1 + I_{D(r.m.s.)}^2 \cdot R_{DS(on)}(T_{ch}) & (3-13) \\ P_1 = P_S + P_G + P_L + P_D & P_S \end{cases} \quad (3-14)$$

一般にチャンネル温度 $T_{ch}$ は次式で表されます。

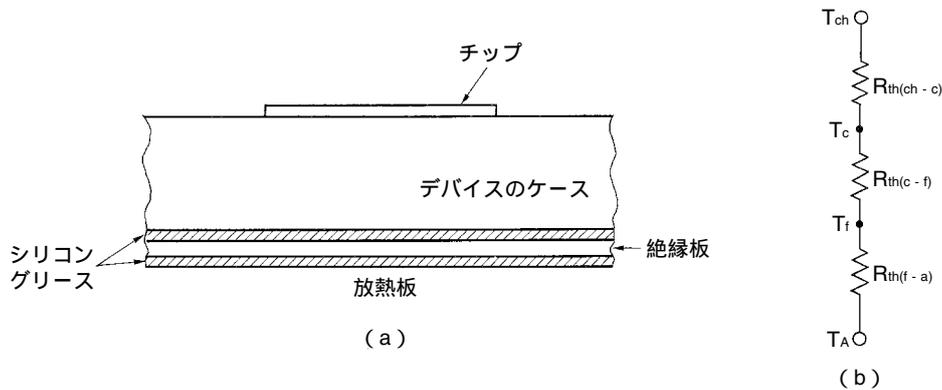
$$T_{ch} = T_A + R_{th(ch-a)} \cdot P_T \quad (3-15)$$

ここで $T_A$ は周囲温度、 $R_{th(ch-a)}$ はチャンネル・周囲間の熱抵抗、 $P_T$ は(3-13)式の電力損失です。チャンネル・周囲間の熱抵抗 $R_{th(ch-a)}$ は図11に示すようにいくつかの直列の熱抵抗から構成されます。

$$R_{th(ch-a)} = R_{th(ch-c)} + R_{th(c-f)} + R_{th(f-a)} \quad (3-16)$$

ここで $R_{th(ch-c)}$ はチャンネル・ケース間の熱抵抗、 $R_{th(c-f)}$ はケース・放熱板間の接触熱抵抗、 $R_{th(f-a)}$ は放熱板・周囲間の熱抵抗です。

図11 熱抵抗モデル



ところで求めるチャンネル温度は(3-13)式と(3-15)式により求めることができます。これは図式を用いることで容易に求められます。図12において直線Aは(3-15)式を変形したもので放熱条件を表し

$$T_{ch} = T_A + P \cdot R_{th(ch-a)} \quad (3-15)$$

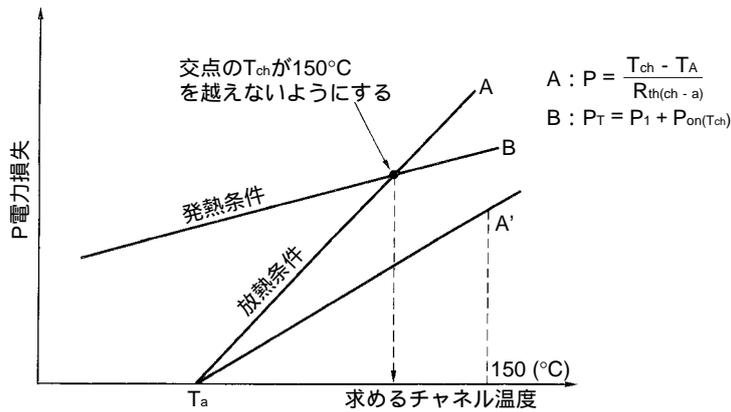
$$P = \frac{T_{ch} - T_A}{R_{th(ch-a)}} \quad (3-17)$$

を示す直線で、直線BはパワーMOSFETの発熱条件を表し(3-13)式で $I_{D(r.m.s.)}^2 \cdot R_{DS(on)}(T_{ch}) = R_{on}(T_{ch})$ として表したものです。

$$P_T = P_1 + P_{on}(T_{ch}) \quad (3-18)$$

この直線は任意の2点のオン抵抗(たとえば $T_{ch} = 25^\circ\text{C}$ と $T_{ch} = 50^\circ\text{C}$ のときのオン抵抗)を(3-18)式に代入して得られた2点を結んだ直線です。求めるチャンネル温度はAとBの交点として決定されます。ここで放熱条件で熱抵抗が大きい場合、すなわち放熱板が小さすぎると図12の直線A'のように定格 $150^\circ\text{C}$ 以内に交点を持たない場合があります。これは熱暴走を意味しますので再度設計定数を見直す必要があります。

図12 T<sub>ch</sub>チャンネル温度



3. 2. 3 チャンネル温度のピーク値の算出

3. 2. 2にて算出しましたチャンネル温度は平均チャンネル温度であり一般に次のようにチャンネル温度のピーク値を求めます。

図3のスイッチング・レギュレータを例にとり説明します。この場合の電力損失は図13 - (a) のように3つの部分から成り立ちます。すなわち

- { P<sub>on</sub> : オン時の損失
- { P<sub>S(on)</sub> : ターンオン時の損失
- { P<sub>S(off)</sub> : ターンオフ時の損失

です。このP<sub>on</sub>, P<sub>S(on)</sub>, P<sub>S(off)</sub>からなる電力損失が無限に続いているものとして“重ね合わせの理”を用いて上昇温度を求めます。このような電力損失波形に対しては全期間平均値から飛び出す部分2~3波を合わせて計算する方法が算出も容易で精度が高く有効です。具体的には電力損失波形の近似 (b) のようにT間の平均化された電力損失

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T P_T dt = \frac{\tau}{T} \cdot P_T \quad (3 - 19)$$

を印加し、さらにP<sub>on</sub>, P<sub>S(on)</sub>, P<sub>S(off)</sub>の平均値をτ区間積分することで求められるτ間の平均電力損失

$$P_\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau P_T dt \quad (3 - 20)$$

との差すなわちP<sub>τ</sub> - P<sub>av</sub>の電力損失をT + τ時間印加し、次に - P<sub>τ</sub>の負の電力損失をT時間印加し、以下同様にP<sub>S(on)</sub>, - (P<sub>S(on)</sub> - P<sub>on</sub>), P<sub>S(off)</sub> - P<sub>on</sub>をそれぞれτ, τ-t<sub>1</sub>, t<sub>3</sub>時間印加してチャンネル温度上昇分を求めます。

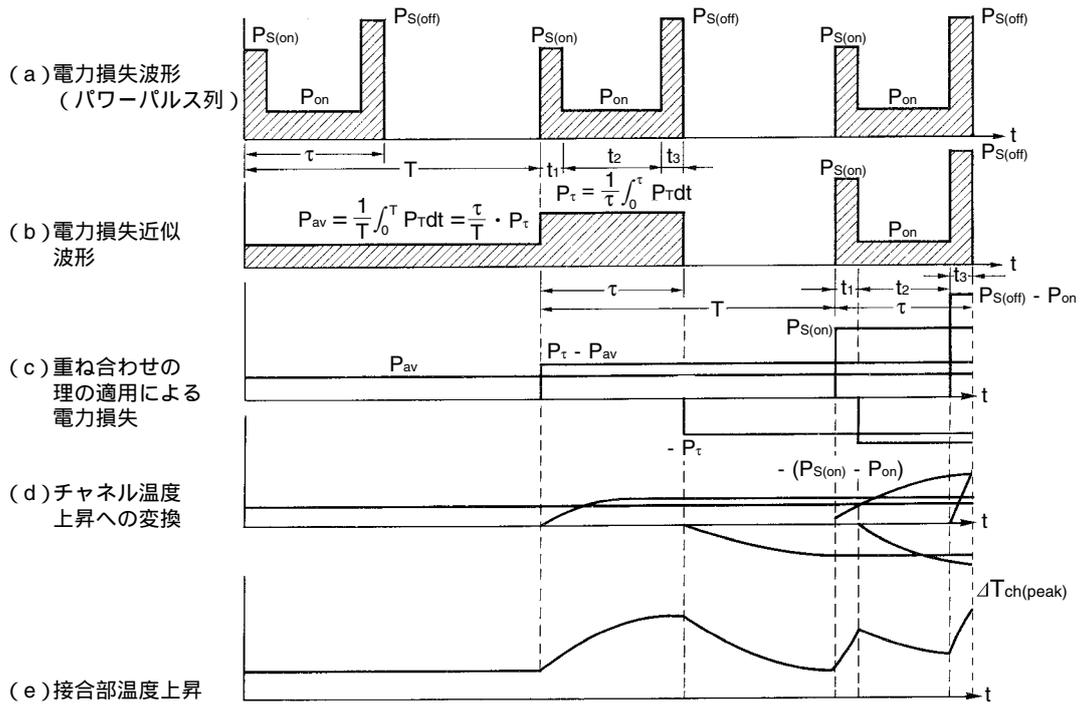
計算結果は

$$\begin{aligned} \Delta T_{ch(peak)} = & P_{av} \cdot R_{th(ch-c)} + (P_\tau - P_{av}) r_{th(ch-c)} (T + \tau) \\ & - P_\tau \cdot r_{th(ch-c)} (T) + P_{S(on)} \cdot r_{th(ch-c)} (\tau) \\ & - (P_{S(on)} - P_{on}) r_{th(ch-c)} (\tau - t_1) + (P_{S(off)} - P_{on}) \cdot r_{th(ch-c)} (t_3) \end{aligned} \quad (3 - 21)$$

となります。

- ΔT<sub>ch(peak)</sub> : ケース温度からのチャンネル温度上昇の最大値 (°C)
- τ : 電力損失のパルス幅 (= t<sub>1</sub> + t<sub>2</sub> + t<sub>3</sub>) (s)
- T : 周期 (1/f) (s)
- R<sub>th(ch-c)</sub> : チャンネル・ケース間の飽和熱抵抗 (°C/W)
- r<sub>th(ch-c)(t)</sub> : パルス幅 (t) におけるチャンネル・ケース間の過度熱抵抗 (°C/W)

図13 スイッチングモードにおける電力損失波形と定常時におけるチャネル温度の求め方



#### 4. 実使用状態における適用方法について

次にスイッチング・レギュレータ (AC100 V入力, 出力87 W,  $f = 200 \text{ kHz}$ ) を例にとり, パワー-MOSFET 2SK735 のSOAの適用法とチャネル温度の算出方法について説明します。

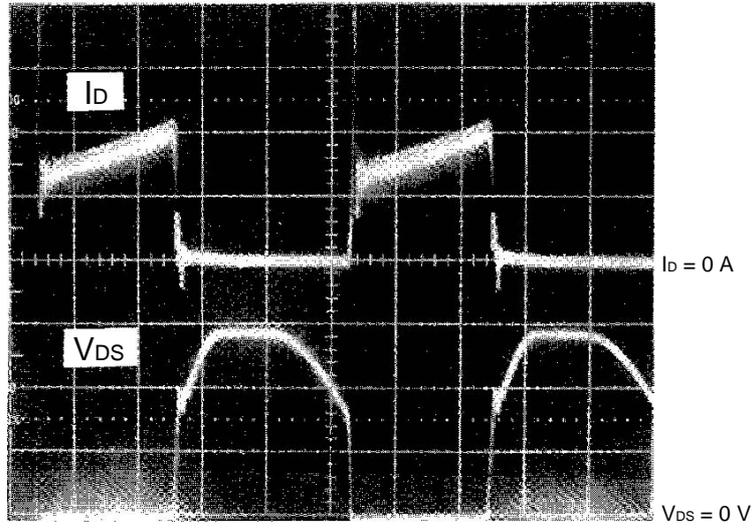
##### 4.1 応用回路

図3に示す一般的なフォワード方式のスイッチング・レギュレータのスイッチング部の回路でパワー-MOSFETを動作させたときの動作波形を写真1～6に示します。写真1は $I_D$ と $V_{DS}$ のスイッチング波形, 写真2は $I_G$ と $V_{GS}$ のスイッチング波形, 写真3, 4はスイッチングのターンオン時, ターンオフ時の $I_D$ ,  $V_{DS}$ 波形, 写真5は動作軌跡を, 写真6は $I_D$ ,  $V_{GS}$ の波形をそれぞれ示します。また他の条件については次のとおりです。

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| (1) スイッチング周波数             | $f = 200 \text{ kHz}$                                    |
| (2) デューティ・サイクル            | $D = 40\% \quad T = 5 \mu\text{s}, \tau = 2 \mu\text{s}$ |
| (3) デバイスのケース温度 (裏面のチップ直下) | $T_C = 36 (^\circ\text{C})$                              |
| (4) 周囲温度                  | $T_A = 25 (^\circ\text{C})$                              |
| (5) チャネル・ケース間熱抵抗          | $R_{th(ch-c)} = 1.25 (^\circ\text{C/W})$                 |

### 写真1 $I_D, V_{DS}$ 動作波形

$I_D : 0.5 \text{ A/div.}, V_{DS} : 100 \text{ V/div.}$   
 $t : 1 \mu\text{s/div.}$



### 写真2 $I_G, V_{GS}$ 動作波形

$I_G : 0.5 \text{ A/div.}$   
 $V_{GS} : 10 \text{ V/div.}$   
 $t : 1 \mu\text{s/div.}$

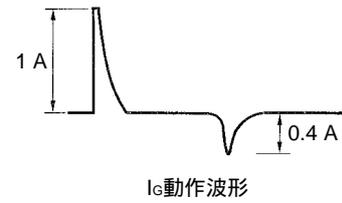
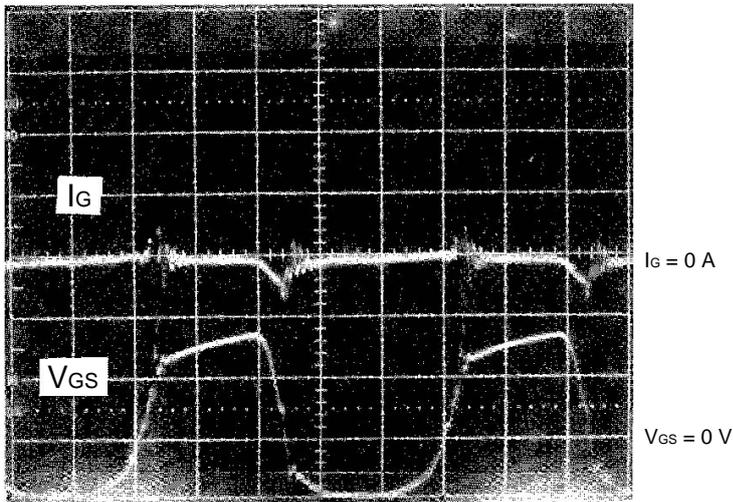
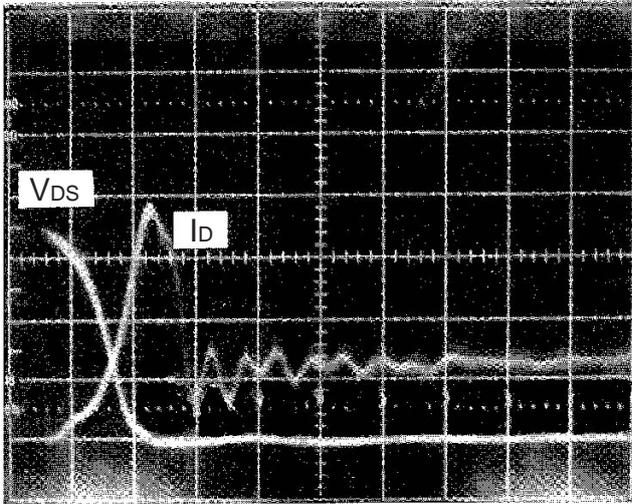


写真3 ターンオン時の $I_D$ ,  $V_{DS}$ 波形

( $I_D$ : 0.5 A/div.,  $V_{DS}$ : 50 V/div.)  
( $t$ : 50 ns/div.)



$I_D = 0$  A,  
 $V_{DS} = 0$  V

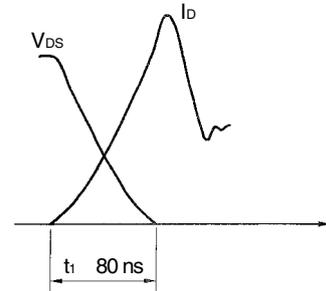
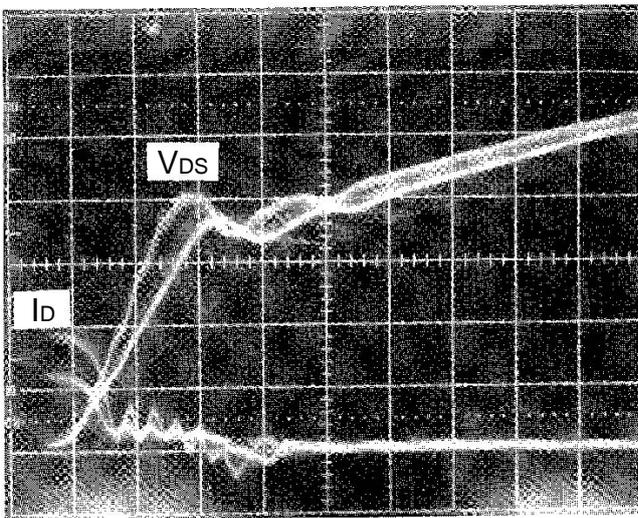


写真4 ターンオフ時の $I_D$ ,  $V_{DS}$ 波形

( $I_D$ : 0.5 A/div.,  $V_{DS}$ : 50 V/div.)  
( $t$ : 50 ns/div.)



$I_D = 0$  A,  
 $V_{DS} = 0$  V

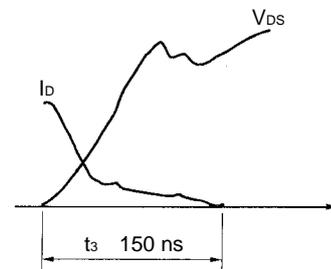


写真5 動作軌跡

$I_D : 0.5 \text{ A/div.}$   
 $V_{DS} : 100 \text{ V/div.}$

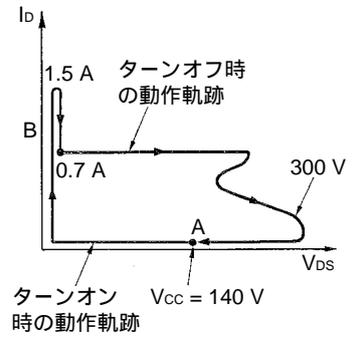
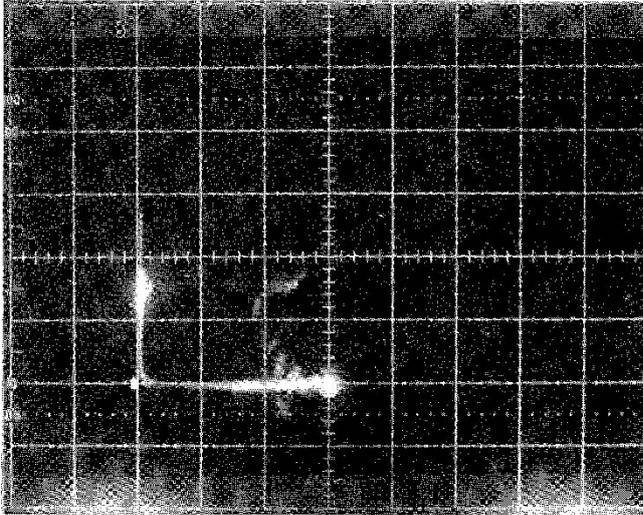


写真6  $I_D, V_{GS}$ 波形

$I_D : 0.5 \text{ A/div.}$   
 $V_{GS} : 10 \text{ V/div.}$   
 $t : 0.5 \mu\text{div.}$

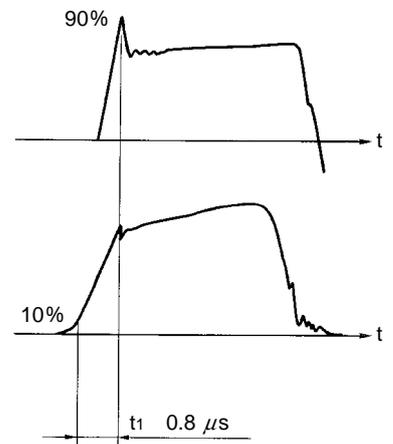
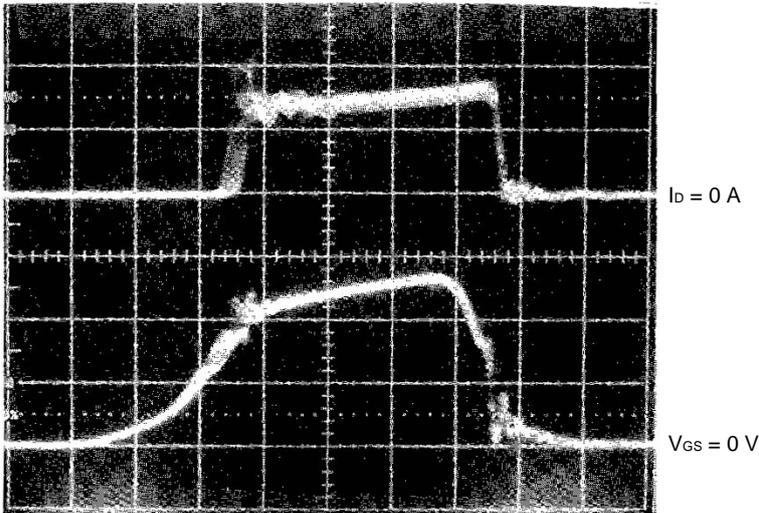


表1. 2SK735の定格と電気的特性

絶対最大定格 (TA = 25°C)

項目	略号	条件	定格	単位
ドレイン・ソース間電圧	V <sub>DSS</sub>	V <sub>GS</sub> = 0 V	450	V
ゲート・ソース間電圧	V <sub>GSS</sub>	V <sub>DS</sub> = 0 V	± 20	V
ドレイン電流 (直流)	I <sub>D (DC)</sub>		± 10	A
ドレイン電流 (パルス)	I <sub>D (pulse)</sub>	PW 100 μs, Duty Cycle 2%	± 30	A
全損失	P <sub>T</sub>	T <sub>C</sub> = 25°C	100	W
チャネル温度	T <sub>ch</sub>		150	°C
保存温度	T <sub>stg</sub>		- 55 ~ + 150	°C

電気的特性 (TA = 25°C)

項目	略号	条件	MIN.	TYP.	MAX.	単位
ドレインシャ断電流	I <sub>DSS</sub>	V <sub>DS</sub> = 450 V, V <sub>GS</sub> = 0 V			100	μA
ゲート漏れ電流	I <sub>GSS</sub>	V <sub>GS</sub> = ± 20 V, V <sub>DS</sub> = 0 V			± 100	nA
ゲートカットオフ電圧	V <sub>GS (off)</sub>	V <sub>DS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 1 mA	1.5		3.5	V
順伝達アドミタンス	y <sub>fs</sub>	V <sub>DS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 5.0 A	3.0			S
ドレイン・ソース間オン抵抗	R <sub>DS (on)</sub>	V <sub>GS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 5.0 A		0.60	0.80	Ω
入力容量	C <sub>iss</sub>	V <sub>DS</sub> = 10 V, V <sub>GS</sub> = 0 V,		1270		pF
出力容量	C <sub>oss</sub>	f = 1 MHz		320		pF
帰還容量	C <sub>rss</sub>			70		pF
オン時遅延時間	t <sub>d (on)</sub>	I <sub>D</sub> = 5.0 A, V <sub>GS (on)</sub> = 10 V,		15		ns
立ち上がり時間	t <sub>r</sub>	V <sub>DD</sub> = 150 V, R <sub>L</sub> = 30 Ω,		20		ns
オフ時遅延時間	t <sub>d (off)</sub>	R <sub>in</sub> = 10 Ω		60		ns
下降時間	t <sub>f</sub>			30		ns

4.2 FBSOAの検討

3. 1で説明しました手順に従ってFBSOAを検討します。まずターンオン時のFBSOAについて検討します。写真6のI<sub>D</sub>, V<sub>GS</sub>の動作波形からターンオン時間t<sub>1</sub> = 0.8 μsと読み取れます。次に図14の正規化過渡熱抵抗対パルス幅の特性データから過渡熱抵抗を求めるわけですが、条件から、

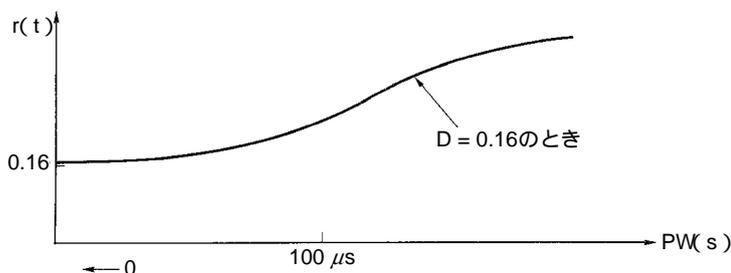
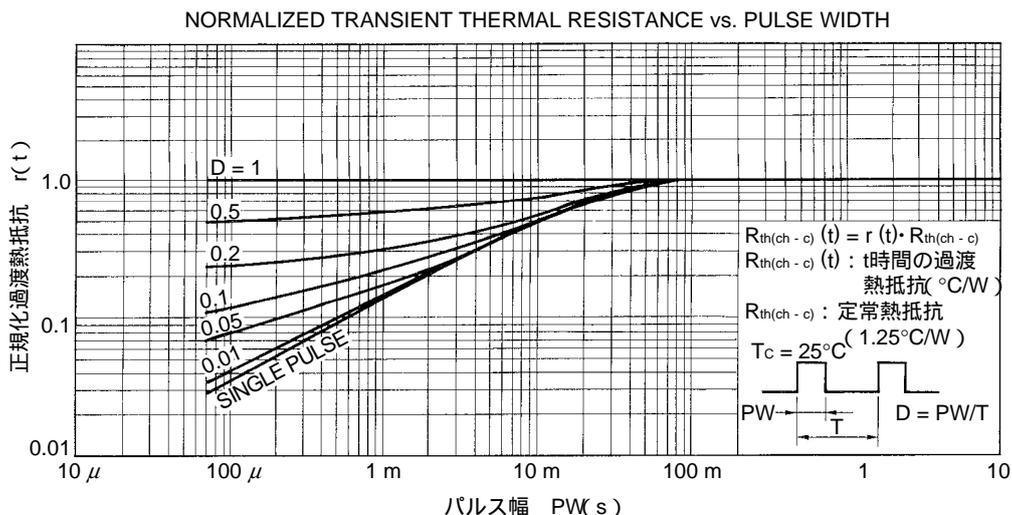
$$T = 5 \mu s, t_1 = 0.8 \mu s \text{ より Duty Cycle} = \frac{t_1}{T} = \frac{0.8 (\mu s)}{5 (\mu s)} = 0.16$$

となり、グラフではPW = 100 μs以下が記載されていませんが、この場合PWが小さくなればD = 0.16のラインは限りなくr(t) = 0.16に近づきます。したがって過渡熱抵抗は、

$$r_{th(ch-c)} = r(t) \cdot R_{th(ch-c)} = 0.16 \times 1.25 (^\circ C/W) = 0.2 (^\circ C/W)$$

となります。

図14 正規化過渡熱抵抗対パルス幅



ここで $R_{th(ch-c)}$ は定常熱抵抗であり2SK735の場合、 $P_T = 100 (W)$  定格ですから

$$R_{th(ch-c)} = \frac{150(°C) - 25(°C)}{100(W)} = 1.25(°C/W)$$

となります。

このときの許容損失は

$$P_{ds(on)} = \frac{T_{ch(MAX)} - T_c}{r_{th(ch-c)}} = \frac{150(°C) - 30(°C)}{0.2(°C/W)} = 570(W)$$

となります。求めた $P_{ds(on)}$ の損失ラインは(3-1)式より図15の ようになります。

次にオン抵抗の制限ラインを引きますが、図16のオン抵抗対チャネル温度の特性データから $T_{ch} = 150(°C)$ のときは、 $R_{DS(on)} = 1.3(Ω)$ と読み取れますので

$$I_D = \frac{V_{DS}}{1.3(Ω)}$$

として図15の のラインが引けます。

同様にしてオン時のFBSOAを求めます。条件から $D = 0.4$ 、 $\tau = 2 \mu s$ から図14より $r(t) = 0.4$ となります。よってこのときの許容損失は

$$r_{th(ch-c)} = r(t) \cdot R_{th(ch-c)} = 0.4 \times 1.25(°C/W) = 0.5(°C/W)$$

$$P_{d(on)} = \frac{T_{ch(MAX)} - T_c}{r_{th(ch-c)}} = \frac{150(°C) - 30(°C)}{0.5(°C/W)} = 220(W)$$

となりますので(3-1)式から図15のライン のようなラインが引けます。以上求めた図15のFBSOA定格ラインと写真5の動作軌跡とを照らし合わせて定格内かを確認します。写真5の動作軌跡は図4のようにターンオン時にはA B, ターンオフ時にはB Aに動作軌跡を描いて移動します。よってA Bに動作する軌跡が図15のFBSOA内にあるかを検討する訳ですが定格内に十分入っていることが確認されます。

図15 FBSOA

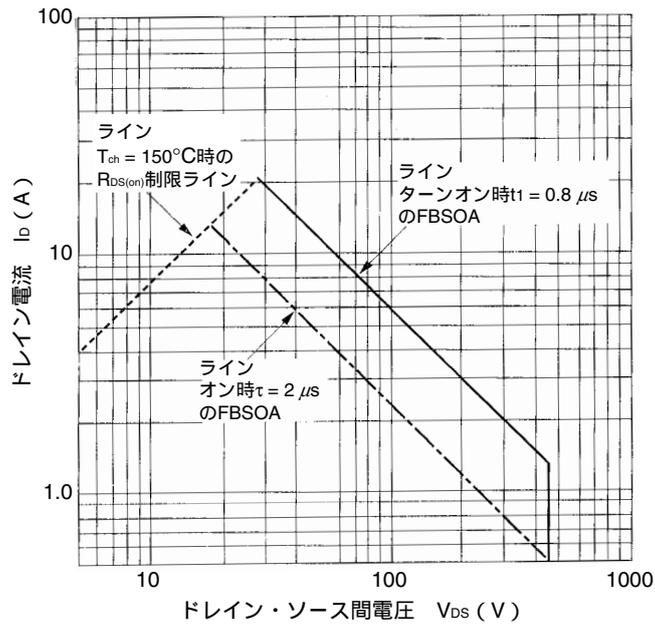
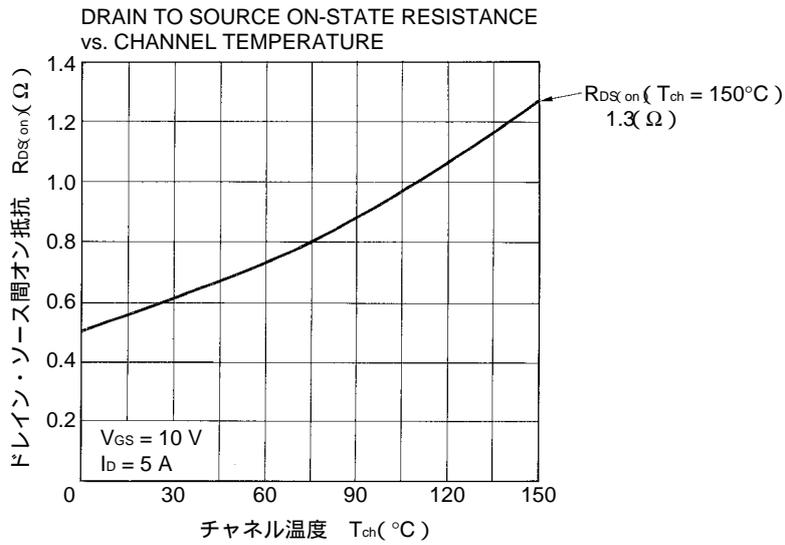


図16 オン抵抗対チャネル温度

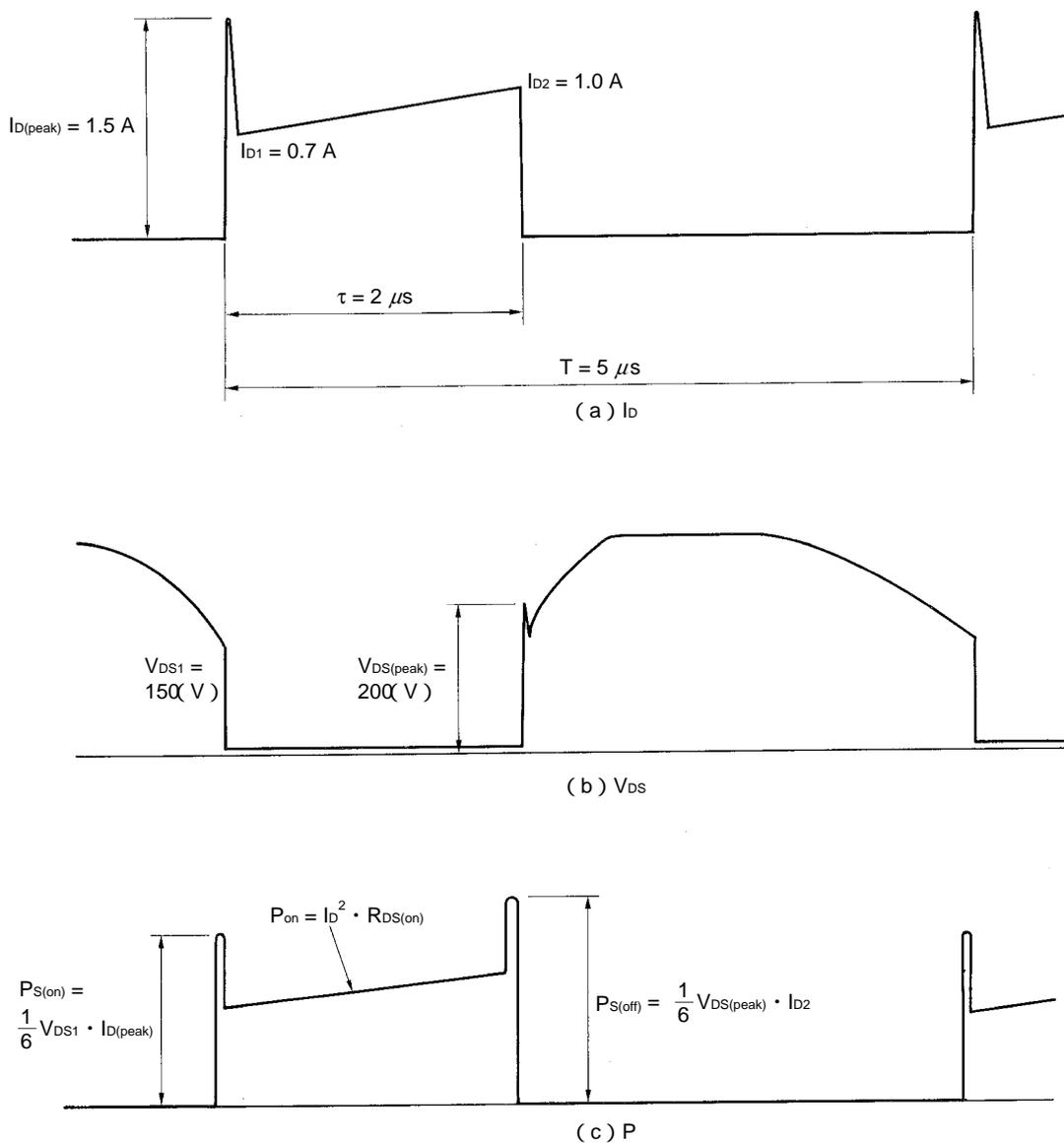


### 4.3 チャンネル温度算出

図17にパワーMOSFETの動作波形，ドレイン電流 ( $I_D$ )，ドレイン・ソース間電圧 ( $V_{DS}$ ) および電力波形 ( $I_D \times V_{DS}$ ) を示します。

まず与えられた条件から平均チャンネル温度を算出します。

図17 動作波形



放熱条件を表す (3 - 17) 式において， $T_C = 36.0 (^{\circ}\text{C})$ ， $R_{th(ch-c)} = 1.25 (^{\circ}\text{C/W})$  を代入し， $P_T$  について解けば

$$P_T = \frac{T_{ch} - T_C}{R_{th(ch-c)}} = \frac{T_{ch} - 36.0 (^{\circ}\text{C})}{1.25 (^{\circ}\text{C/W})} \quad (4-1)$$

となります。この直線式を  $P - T_{ch}$  の特性グラフに描けば図18のラインAのようになります。

一方パワー-MOSFETの損失は(3-13)式, (3-14)式から求められます。(3-14)式よりオン損失以外はスイッチング損失のみで近似されますので, (3-5)式, (3-6)式から次のようにして求められます。

$$\begin{aligned}
 P_{S(on)} &= \frac{1}{6} V_{DD} \cdot I_{D(peak)} \cdot t_1 \cdot f \\
 &= \frac{1}{6} \times 150(\text{V}) \times 1.5(\text{A}) \times 0.08(\mu\text{s}) \times \frac{1}{5(\mu\text{s})} \\
 &= 0.6(\text{W})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{S(off)} &= \frac{1}{6} V_{DS(peak)} \cdot I_{D2} \cdot t_3 \cdot f \\
 &= \frac{1}{6} \times 200(\text{V}) \times 1.0(\text{A}) \times 0.15(\mu\text{s}) \times \frac{1}{5(\mu\text{s})} \\
 &= 1.0(\text{W})
 \end{aligned}$$

(上式にて  $f = \frac{1}{T}$  としています。)

$$P_S = P_{S(on)} + P_{S(off)} = 1.6(\text{W})$$

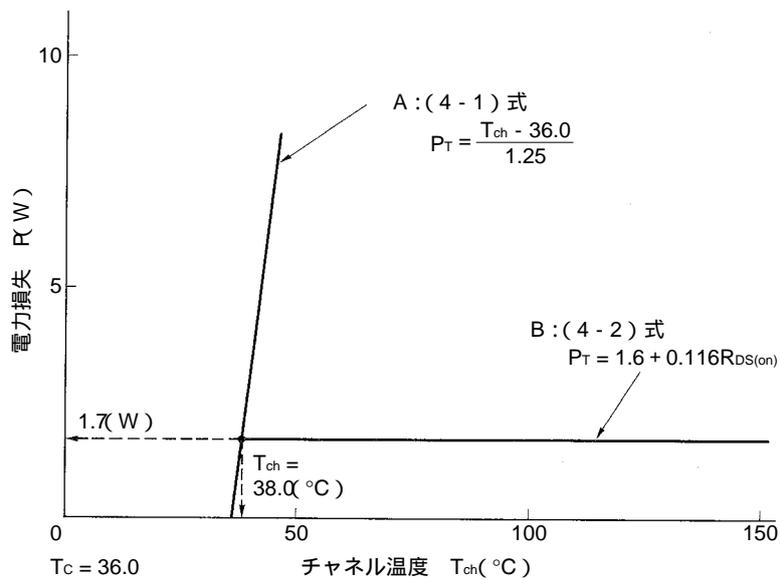
また, このときのドレイン電流の実効値は(3-10)式から

$$\begin{aligned}
 I_{D(r.m.s.)} &= \frac{t_{on}}{T} \left\{ \frac{I_{D1}^2 + I_{D1} \cdot I_{D2} + I_{D2}^2}{3} \right\}^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{2(\mu\text{s})}{5(\mu\text{s})} \times \left\{ \frac{0.7^2(\text{A}) + 0.7(\text{A}) \times 1.0(\text{A}) + 1.0^2(\text{A})}{3} \right\}^{\frac{1}{2}} \\
 &= 0.34(\text{A})
 \end{aligned}$$

です。これらの値を用いてパワー-MOSFETのチャネル温度と損失の関係を示す式は(3-18)式より次のようになります。

$$\begin{aligned}
 P_T &= P_S + I_{D(r.m.s.)}^2 \cdot R_{DS(on)}(T_{ch}) \\
 &= 1.6 + 0.116 \cdot R_{DS(on)}(T_{ch})
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

図18 チャネル温度の算出方法



求めた(4-2)式は、パワーMOSFETのオン抵抗が温度によって変わるので温度の関数となります。この(4-2)式に任意のオン抵抗の値を代入して図18にラインを引きます。図16のオン抵抗対チャネル温度のグラフから

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ch} = 60^{\circ}\text{C} \text{ のとき } R_{DS(on)} \quad 0.73 (\Omega) \\ T_{ch} = 90^{\circ}\text{C} \text{ のとき } R_{DS(on)} \quad 0.88 (\Omega) \end{array} \right\}$$

と読み取れます。この値を(4-2)式に代入して

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{T(T_{ch} = 60^{\circ}\text{C})} = 1.68 (\text{W}) \\ P_{T(T_{ch} = 90^{\circ}\text{C})} = 1.7 (\text{W}) \end{array} \right\}$$

となります。この2点を結ぶ直線を図18のラインBとして示します。

求めるチャネル温度は(4-1)式のラインAと(4-2)式のラインBとの交点となります。グラフから

$$T_{ch} = 38 (^{\circ}\text{C}), P = 1.7 (\text{W})$$

と読み取れます

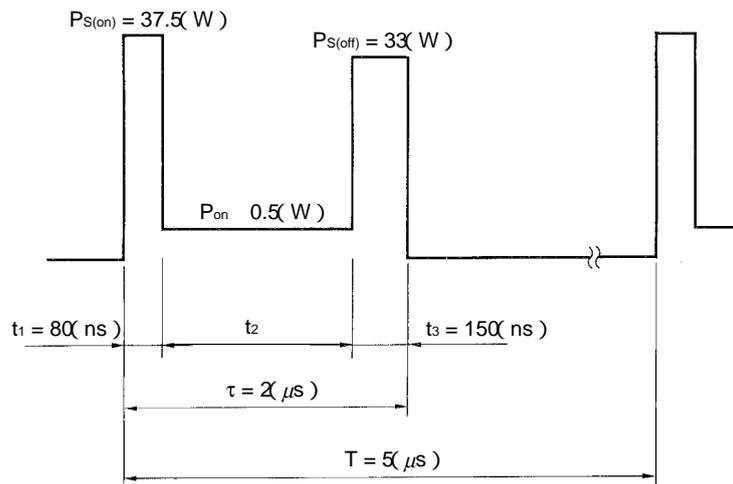
次に4.2.3の手順に従ってチャネル温度のピーク値を求めます。図17の電力波形を近似すると図19のようになります。

$$\begin{aligned} P_{S(on)} &= \frac{1}{6} \times V_{DS1} \times I_{D(\text{peak})} = \frac{1}{6} \times 150 (\text{V}) \times 1.5 (\text{A}) \\ &= 37.5 (\text{W}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{S(off)} &= \frac{1}{6} \times V_{DS(\text{peak})} \times I_{D2} = \frac{1}{6} \times 200 (\text{V}) \times 1.0 (\text{A}) \\ &= 33 (\text{W}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{on} &= I_D^2 \cdot R_{DS(on)} = \left( \frac{I_{D1} + I_{D2}}{2} \right)^2 \cdot R_{DS(on)} (T_{ch} = 38^{\circ}\text{C}) \\ &= \left( \frac{0.7 (\text{A}) + 1.0 (\text{A})}{2} \right)^2 \times 0.65 (\Omega) = 0.47 (\text{W}) \end{aligned}$$

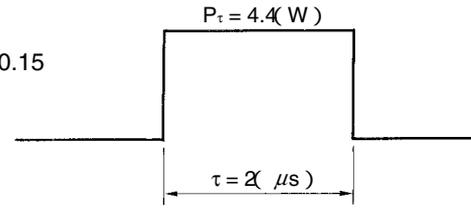
図19 電力波形



また図19の電力波形は次のようにして方形波近似されます。

$$\begin{aligned}
 P_{\tau} &= \frac{1}{\tau} \{ P_{S(on)} \cdot t_1 + P_{on} \cdot (\tau - t_1 - t_3) + P_{S(off)} \cdot t_3 \} \\
 &= \frac{1}{2 (\mu s)} \{ 37.5 (W) \times 0.08 (\mu s) + 0.47 (W) \times (2 - 0.08 - 0.15 (\mu s)) + 33 (W) \times 0.15 (\mu s) \} = 4.4 (W) \\
 P_{av} &= \frac{\tau}{T} \cdot P_{\tau} = \frac{2 (\mu s)}{5 (\mu s)} \times 4.4 (W) = 1.76 (W)
 \end{aligned}$$

図20 方形波近似



次に $t_3$ ,  $\tau - t_1$ ,  $\tau$ ,  $T$ ,  $T + \tau$ の時間幅での過渡熱抵抗を求めるわけですがカタログではPW = 100  $\mu s$ 以下のデータは記載されておりませんので図21のように直線近似を行って短いパルス幅の時の過渡熱抵抗を読み取ります。図21より

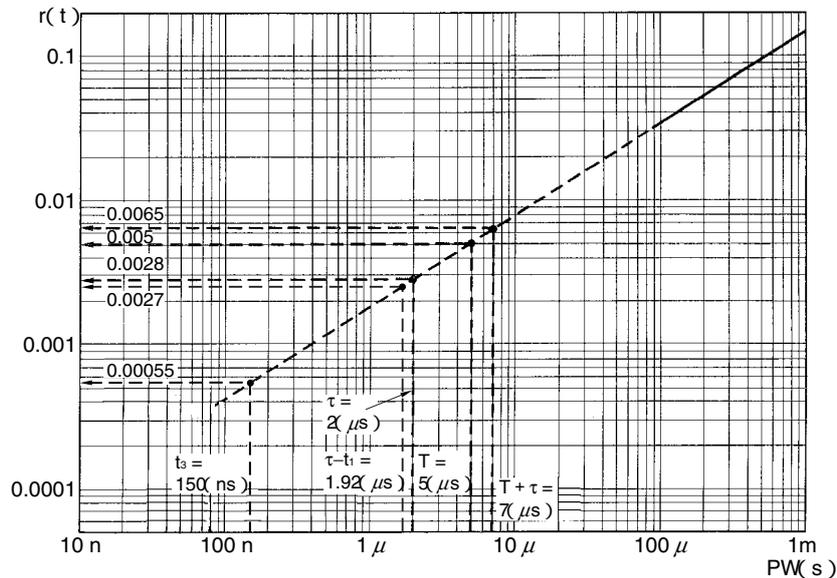
$$\begin{cases}
 r_{th(ch-c)}(t_3) &= 0.00055 \times 1.25 (^\circ C/W) & 0.0007 (^\circ C/W) \\
 r_{th(ch-c)}(\tau - t_1) &= 0.0027 \times 1.25 (^\circ C/W) & 0.0034 (^\circ C/W) \\
 r_{th(ch-c)}(\tau) &= 0.0028 \times 1.25 (^\circ C/W) & 0.0035 (^\circ C/W) \\
 r_{th(ch-c)}(T) &= 0.005 \times 1.25 (^\circ C/W) & 0.0063 (^\circ C/W) \\
 r_{th(ch-c)}(T + \tau) &= 0.0065 \times 1.25 (^\circ C/W) & 0.0081 (^\circ C/W)
 \end{cases}$$

となります。

よって求めるチャンネル温度の温度上昇分のピーク値は(3-21)式から次のように求められます。

$$\begin{aligned}
 T_{ch(peak)} &= P_{av} \cdot R_{th(ch-c)} + (P_{\tau} - P_{av}) r_{th(ch-c)}(T + \tau) \\
 &\quad - P_{\tau} \cdot r_{th(ch-c)}(T) + P_{S(on)} \cdot r_{th(ch-c)}(\tau) \\
 &\quad - (P_{S(on)} - P_{on}) r_{th(ch-c)}(\tau - t_1) \\
 &\quad + (P_{S(off)} - P_{on}) \cdot r_{th(ch-c)}(t_3)
 \end{aligned}$$

図21 正規化過渡熱抵抗対パルス幅



$$\begin{aligned}
T_{\text{ch(peak)}} &= 1.76 \text{ (W)} \times 1.25 \text{ (}^\circ\text{C/W)} + (4.4 \text{ (W)} - 1.76 \text{ (W)}) \times 0.0081 \text{ (}^\circ\text{C/W)} \\
&\quad - 4.4 \text{ (W)} \times 0.0063 \text{ (}^\circ\text{C/W)} + 37.5 \text{ (W)} \times 0.0035 \text{ (}^\circ\text{C/W)} \\
&\quad - (37.5 \text{ (W)} - 0.5 \text{ (W)}) \times 0.0034 \text{ (}^\circ\text{C/W)} + (33 \text{ (W)} - 0.5 \text{ (W)}) \times 0.0007 \text{ (}^\circ\text{C/W)} \\
&\quad 2.2 \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.02 \text{ (}^\circ\text{C)} - 0.03 \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.13 \text{ (}^\circ\text{C)} - 0.13 \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.02 \text{ (}^\circ\text{C)} \\
&\quad 2.21 \text{ (}^\circ\text{C)}
\end{aligned}$$

$T_c = 36.0^\circ\text{C}$ なので

$$T_{\text{ch}} = T_c + T_{\text{ch(peak)}} = 36.00 + 2.21 = 38.21 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上よりチャネル温度は十分定格内にあることが確認できました。

## 【発 行】

NECエレクトロニクス株式会社

〒211-8668 神奈川県川崎市中原区下沼部1753

電話（代表）：044(435)5111

—— お問い合わせ先 ——

---

## 【ホームページ】

NECエレクトロニクスの情報がインターネットでご覧になれます。

URL(アドレス) <http://www.necel.co.jp/>

---

## 【営業関係、技術関係お問い合わせ先】

半導体ホットライン

(電話：午前 9:00～12:00，午後 1:00～5:00)

電 話 : 044-435-9494

E-mail : [info@necel.com](mailto:info@necel.com)

---

## 【資料請求先】

NECエレクトロニクスのホームページよりダウンロードいただくか、NECエレクトロニクスの販売特約店へお申し付けください。

---