MOSFET の選び方

- 基本的な動作からパラメーターの見方を紹介 -

概要

トランジスターの中で最も注目を集めているのが、電界効果トランジスターMOSFET(Metal Oxide Semiconductor FET)です。MOSFET を選ぶ場合、用途に応じて適切な定格、特性を持つ製品を選ぶ必要があります。設計時、どの MOSFET を使うかを悩んだ時、データシートのパラメーターの見方を知っておくと適切な MOSFET の選び方が分かります。ここでは、そのパラメーターの見方を主に説明いたします。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2022-03-31
Rev.1.0

1. 構造と特長 4
1.1. パワーMOSFET の構造 4
1.2. パワーMOSFET の特長 5
2. データシートの読みかた 6
2.1. 絶対最大定格 6
2.1.1. ドレイン・ソース間電圧 V_{DSS} 7
2.1.2. ゲート・ソース間電圧 V_{GSS} 7
2.1.3. ドレイン電流 I_D 7
2.1.4. 許容損失 P_D 7
2.1.5. アバランシェ電流 I_{AS}、 アバランシェエネルギー E_{AS} 8
2.1.6. チャネル温度 T_{ch}、保存温度 T_{stg} 11
2.1.7. 絶縁耐圧 $V_{ISO(RMS)}$ 11
2.2. 静的特性 11
2.3. 動的特性 12
2.3.1. 静電容量特性 12
2.3.2. 実効容量(エネルギー換算) 13
2.3.3. スイッチング特性 14
2.3.4. dv/dt 耐量 15
2.4. 電荷容量特性 16
2.4.1. ゲート電荷量 16
2.4.2. ゲート電荷の算出方法 17
2.4.3. 出力電荷量（Q_{oss}） 17
2.5. ソース・ドレイン間特性 18
2.5.1. ボディーダイオード特性 18
2.5.2. ボディーダイオード dv/dt 特性 19
3. MOSFET の選び方 21
3.1. 電圧・電流定格 21
3.2. V_{GS} 検討 21
3.3. スイッチング速度 22
製品取り扱い上のお願い 23

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

図目次

図 1　MOSFET の構造 4
図 2　MOSFET の断面図（寄生 NPN トランジスタ） 8
図 3　MOSFET 等価回路 8
図 4　アバランシェ電流等価回路 9
図 5　一般的アバランシェ耐量測定回路 10
図 6　アバランシェ降伏時各部の波形（MOSFET 電圧波形およびドレイン電流） 10
図 7　容量等価回路 12
図 8　静電容量- V_{DS} 特性 13
図 9　スイッチング時間測定回路と入出力波形 14
図 10　MOSFET の断面図及び等価回路 15
図 11　ゲート電荷量 Qg の定義 16
図 12　ゲート電荷 17
図 13　静電容量-VDS 特性 17
図 14　ボディーダイオードの電流特性 18
図 15　MOSFET のボディーダイオードの逆回復時間 18
図 16　ボディーダイオードの等価回路及び逆回復時の波形 19

表目次

表 1　MOSFET 特長比較 5
表 2　トランジスターと MOSFET の比較 5
表 3　絶対最大定格項目 6
表 4　静的特性項目 11
表 5　動的特性項目 12
表 6　電荷容量特性項目 16

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

1. 構造と特長

パワーMOSFET は原理的に多数キャリアのみで動作します。バイポーラトランジスタのような少数キャリアの影響はなく、また、基本的に接合型 FET 以上の高入力インピーダンスをもっています。

パワーMOSFET は、高速性に優れているものの低オン抵抗、高耐圧、大電力は難しいと当初考えられていましたが、 近年では、プレーナゲート型の二重拡散構造に加え、トレンチゲート型構造、スーパージャンクション構造(SJ 構造)が主流となり、高速かつ低オン抵抗、高耐圧が可能となっており高性能化が進んでいます。スイッチング用素子として、民生、産業、車載機器など幅広く使用されています。

1.1. パワーMOSFET の構造

パワーMOSFET は、ゲート構造、ドリフト層の構造によって大別でき、前述の近年主流となっている三つの構造を以下に示します。

図 1 の(a) は D-MOS 構造です。二重拡散によりチャネルを形成し高耐圧を得る D-MOS(Double Diffusion MOS)と呼ばれる構造を採用しています。高集積化ができ、低オン抵抗・低損失で高性能のパワーMOSFET を実現することができます。

図 1 の(b) はトレンチゲート構造です。ゲートを U 溝とし、チャネルを縦方向に形成することで高集積化を実現し、より低オン抵抗化を図る方法です。この構造は比較的低い耐圧のパワーMOSFET に使用されています。

図 1 の(c) はスーパージャンクション構造です。ドリフト層にスーパージャンクション(SJ)構造と呼ばれる周期的な p ／ n 構造を形成することで、従来の縦型パワーMOSFET のシリコン限界を下回る超低オン抵抗を実現できます。

従来のパワーMOSFET に比べ、素子の耐圧 V_{DSS} と単位面積で規格化されたオン抵抗 Ron・A とのトレードオフ関係を大幅に改善し、導通損失を大きく低減できます。

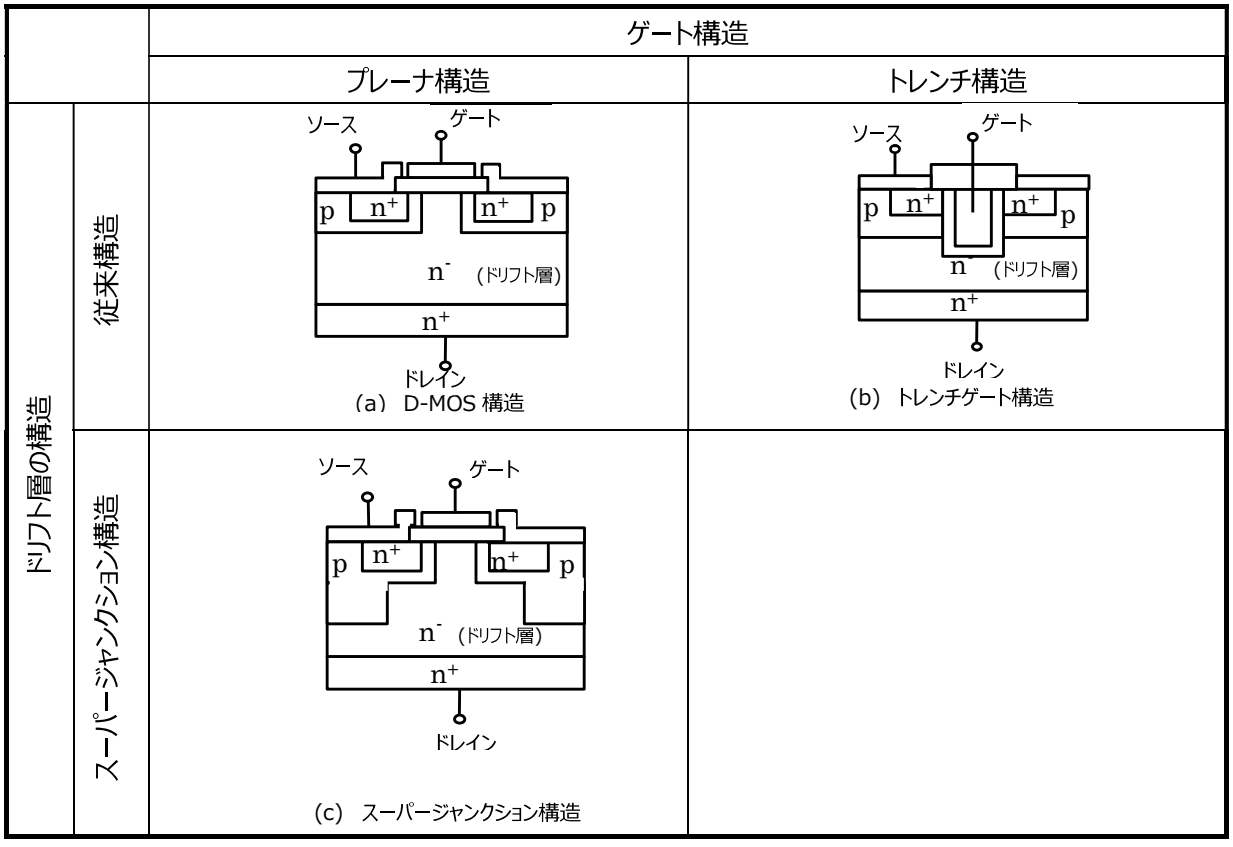


図 1 MOSFET の構造

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

表 1　MOSFET 特長比較

東芝製品	高耐圧化	低オン抵抗化	大電流化	高速化
n-MOS (DMOS)	優秀(～９００V)	可	可	良好
U-MOS (トレンチゲート MOS)	良好(～２５０V)	優秀	優秀	良好
DTMOS（SJ-MOS）	優秀(５００V～)	優秀	優秀	優秀

1.2. パワーMOSFET の特長

パワーMOSFET の一般的な特長を次に示します。

(1) MOSFET は基本的に多数キャリアデバイスです。少数キャリアデバイスのバイポーラトランジスタとはこの点で大きく異なります。

(2) MOSFET は、バイポーラトランジスタのように電流制御ではなく、ゲート・ソース間の印加電圧によって制御する電圧制御デバイスです。

(3) 多数キャリアデバイスであるため、キャリアの蓄積による遅延時間がなく、高周波のスイッチング動作ができます。

(4) バイポーラトランジスタでは、高電圧領域において電流集中が発生し、これによる二次降伏現象でジャンクション破壊が起こる危険があります。これを避けるため、素子の動作条件には十分なディレーティングがとられます。パワーMOSFET においては二次降伏現象がおこりにくく、破壊に強い特長を持っていますが、最近の製品には二次降伏現象が見られ、十分素子特性を確認の上使用する必要があります。

(5) パワーMOSFET のオン抵抗の温度係数は正であるため、高温時の RDS(ON)を考慮して放熱設計を行う必要があります。

表 2 にバイポーラ型パワートランジスタとパワーMOSFET の比較を示します。

表 2　トランジスターと MOSFET の比較

	トランジスター	MOSFET
駆動回路	駆動電流の条件によりスイッチング時間がかわるため駆動条件の選定が難しく、駆動回路の損失も大きくなります。	バイポーラに対して電圧駆動のため駆動回路の作成が簡単で、駆動回路による損失も小さくなります。
スイッチング時間	構造的に蓄積時間(t_{stg}) があり、MOSFET と比較してスイッチング時間は遅くなります。	バイポーラと比べ大幅に高速で、蓄積時間もなく温度の影響も少ないです。
安全動作領域	二次降伏の制限があります。	基本的には電力損失が支配的です。
耐圧（コレクタ・エミッタ間 / ドレイン・ソース間）	ゲート逆バイアスでの使用が多く V_{CES} だけでなく $V_{CEX}(V_{CBO})$が定格として使われる場合もあります。	トレンチ型構造のゲート逆バイアス時を除き V_{DSS} で制限されます（ゲート逆バイアス時は V_{DSX} で制限されます）。
オン電圧	高耐圧素子の場合でも非常に低く、一般的に負の温度係数を持ちます。	低耐圧素子では極めて低いが、高耐圧素子ではやや大きくなります。温度係数は正であり、並列接続に有効です。
並列接続	電流をバランスさせる必要があり、難しくなります。	発振防止、スイッチング時間の整合などの若干の注意が必要ですが、比較的容易に並列運転ができます。
温度安定性	温度上昇すると、h_{FE} が大きくなったり V_{BE} が小さくなったりするため、若干の注意が必要になります。	各種パラメーターの温度に対する安定度は極めて高いです。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2. データシートの読みかた

2.1. 絶対最大定格

パワーMOSFET に流し得る電流や、印加可能な電圧、電力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。回路を設計する上で最大定格をよく認識することはパワーMOSFET を有効に働かせる上からも、目標とする稼働時間に十分高い信頼度で動作させる上からも、非常に大切なことです。最大定格値は、パワーMOSFET の寿命と信頼度を保証するために超えてはならない最大値で、絶対最大定格の考え方を採用しています。絶対最大定格とは、瞬時といえども動作中に定格値を超えてはならないとするものです。定格を超えて使用した場合、特性は回復しない場合もあります。回路設計においては供給電圧の変動、電気部品の特性のバラつき、回路調整時の最大定格オーバー、周囲温度の変化、入力信号の変動などに注意し、定格の 1 つでも超えることは避けなければなりません。定格値として定められるべき主な項目は、パワーMOSFET のドレイン電流、各端子間電圧、電力損失、チャネル温度、保存温度などです。これらの特性は相互に密接な関係があるので、個々別々に考えることができず、また外部回路条件によっても異なります。表 3 に代表的な絶対最大定格項目を示します（製品によって規定している項目が異なります。指定のない限り、測定条件は Ta=25°C）。

表 3　絶対最大定格項目

項目		記号	単位	説明
ドレイン・ソース間電圧		V_{DSS}	V	ゲート・ソース間を短絡した状態で、ドレイン・ソース間に許容される電圧の最大値です。
ゲート・ソース間電圧		V_{GSS}	V	ドレイン・ソース間を短絡した状態で、ゲート・ソース間に許容される電圧の最大値です。
ドレイン電流	DC	I_D	A	ドレイン・ソースに許容される直流電流の最大値です。
	パルス	I_{DP}		パルス動作において許容されるドレイン電流の最大ピーク値です。
許容損失（T_c=25°C）		P_D	W	MOSFET に許容される損失の最大値です。
アバランシェ電流		I_{AS}	A	アバランシェ状態で許容できる最大ピーク電流(非繰り返し)です。
アバランシェエネルギー		E_{AS}	mJ	アバランシェ降伏時の最大許容損失エネルギー(非繰り返し)です。
チャネル温度		T_{ch}	°C	MOSFET の動作が許容されるチップ温度の最大値です。
保存温度		T_{stg}	°C	MOSFET に電圧を印加しない状態で保存できる温度の最大値です。
絶縁耐圧		$V_{ISO(RMS)}$	V	パッケージの指定されたケース部分と電極端子間の絶縁耐圧の最大値です。
締め付けトルク		TOR	N•m	ねじを回して締め付けるときに回転方向に回す力の最大値です。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.1.1. ドレイン・ソース間電圧 V_{DSS}

パワーMOSFET のドレイン・ソース間降伏電圧の規定は、ゲート・ソース間のバイアス条件により、下記があります。

(1) V_{DSS} ： ゲート・ソース間短絡時のドレイン・ソース間電圧です、定格以上の電圧が加わると、ブレークダウン領域に入って MOSFET が故障する危険があります。

(2) V_{DSX} ： ゲート・ソース間逆バイアス時のドレイン・ソース間電圧です。

上記以外に、V_{DSR}(ゲート・ソース間に抵抗を挿入した場合のドレイン・ソース間電圧)、V_{DSO}(ゲートオープン時のドレイン・ソース間電圧)があります。パワーMOSFET は入力インピーダンスが非常に高いため、V_{DSO} モードでは静電誘導などによりゲート・ソース間がバイアスされ“オン”状態になって、素子を破壊する可能性が高くこのモードでは使用しないでください。

2.1.2. ゲート・ソース間電圧 V_{GSS}

ドレイン・ソース間を短絡した場合のゲート・ソース間電圧が V_{GSS} です。この定格はゲート酸化膜の耐量に起因しますが、MOSFET では実用的な電圧あるいは信頼性を考慮して、その値を定めています。

2.1.3. ドレイン電流 I_D

一般的にはパワーMOSFET では順方向に直流印加できる電流を I_D 、パルスにて流し得る電流を I_{DP} とし、逆方向 (ダイオード方向) の直流電流 I_{DR} とパルス電流 I_{DRP} も同電流 (理想的な放熱条件下) で規定しています。しかしながら、この各電流は順方向がドレイン・ソース間オン抵抗によるパワー損失で、逆方向はダイオードの順方向電圧による損失によって制限を受けます。そのため、電流定格については放熱条件によって左右され、チャネル温度が定格 T_{ch}(max)を超えない電流値を設定し、その電流値以下で使用する必要があります。

$$I_D = \sqrt{\frac{T_{ch}(max) - T_c}{R_{DS(on)}(max) \times R_{th(ch-c)}}}$$

$$I_{DP} = \sqrt{\frac{T_{ch}(max) - T_c}{R_{DS(on)}(max) \times r_{th(ch-c)}(t)}}$$

T_{ch}(max)： チャネル温度 max

T_c： ケース温度(25°C)

$R_{th(ch-c)}$： 定常熱抵抗

$r_{th(ch-c)}$(t)： 過渡熱抵抗

$R_{DS(ON)}$(max)： 最大チャネル温度時のドレイン・ソース間オン抵抗の max 値

製品への通電可能なドレイン電流(I_D)は損失制限以外に、その製品のパッケージの通電能力、最大チャネル温度や安全動作領域等で制限されます。

2.1.4. 許容損失 P_D

規定の放熱条件において、MOSFET に連続的に消費させることのできる MOSFET の損失の最大値です。許容損失は使用条件（周囲温度、放熱条件）によって変わります。許容損失（T_c=25°C）は周囲温度 25°C で無限大放熱器を付けた場合に等しい条件の値です。

$$P_D = \frac{T_{ch}(max) - 25°C}{R_{th(ch-c)}}$$

また、過渡期の許容損失 P_{DP} はデータシートの過渡熱抵抗特性により下記で算出されます。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

$$P_{DP} = \frac{T_{ch}(max) - 25°C}{r_{th(ch-c)}(t)}$$

2.1.5. アバランシェ電流 I_{AS}、 アバランシェエネルギー E_{AS}

パワーMOSFET を高速スイッチング素子として使用する場合、回路自体のインダクタンスおよび浮遊インダクタンスにより、ターンオフ時に高いサージ電圧がドレイン・ソース間に印加され、時にはサージ電圧が素子の定格を超えブレークダウン領域に入る場合があります。この時、アバランシェ電流が流れ、素子が許容できる電流およびエネルギーを超えると破壊に至ります。このモードをアバランシェ破壊と呼びます。また、これを許容できる電流をアバランシェ電流 I_{AS}、エネルギーをアバランシェエネルギーE_{AS}と言います。

(1) MOSFET 等価回路

MOSFET の断面および等価回路を図 2 および図 3 に示します。

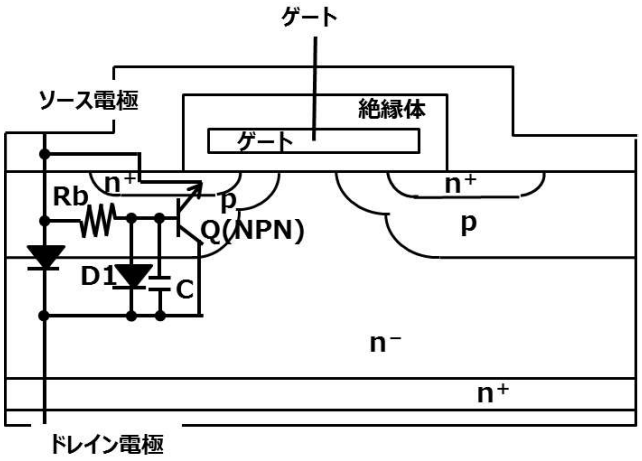


図 2　MOSFET の断面図（寄生 NPN トランジスタ）

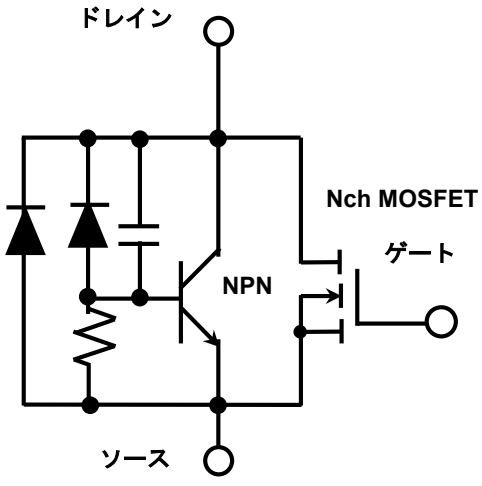


図 3　MOSFET 等価回路

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

(2) アバランシェ動作

アバランシェ破壊には次の 2 つのモードがあります。図 1.3 にアバランシェ電流等価回路を示します。

(a) 電流破壊モード

ドレイン・ソース間に耐圧以上の電圧が印加されると抵抗 R_b に電流 i が流れます。トランジスターのベース・エミッタ間には $i \times R_b$ の順方向電圧が印加されます。許容できる電流を超えると、寄生 NPN トランジスターがターンオンし、トランジスターに大電流が流れ、破壊されます。

(b) エネルギー破壊モード

ドレイン・ソース間に耐圧以上の電圧が印加されると電流 i が流れます。この電流と印加電圧($i \times BV_{DSS}$)により損失が発生し、このエネルギーで温度が上昇し、定格チャネル温度を超えると破壊に至ります。

(3) アバランシェ耐量及び測定

パワーMOSFET のアバランシェ耐量の測定回路を図 5 および測定波形を図 6 に示します。ターンオフ時にゲート電圧 V_{GS} がしきい値以下になると、インダクタ L を流れるドレイン電流が減少し、ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} が急激に上昇します。V_{GS} がしきい値電圧以上のときは、I_D はパワーMOSFET のチャネル領域を流れていますが、しきい値以下になるとチャネルが遮断され、I_D の経路はドレイン・ベース間のダイオード(図 4)にかわります。この間に V_{DS} は上昇し、自己ブレークダウン電圧 BV_{DSS}（実力値）に達すると、パワーMOSFET はアバランシェブレークダウンを起こし V_{DS} は一定となります。L に蓄えられたエネルギーは素子の温度上昇によって消費されます。この結果 $I_D=0$ となり、V_{DS} は印加電圧 V_{DD} となります。この時の許容されるピーク電流がアバランシェ電流 I_{AS} で、許容されるエネルギーがアバランシェエネルギー E_{AS} です。

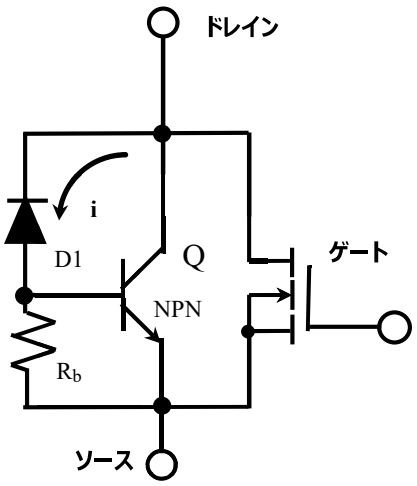


図 4　アバランシェ電流等価回路

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

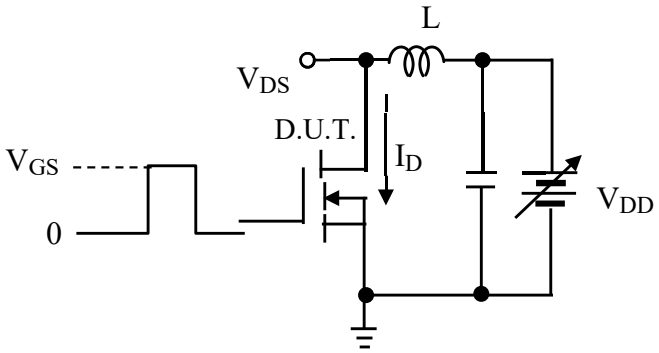
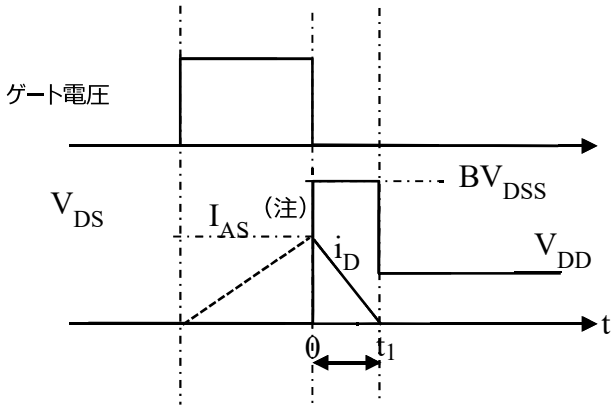


図 5　一般的アバランシェ耐量測定回路



（注）I_{AS} はターンオフ直前の電流値

図 6　アバランシェ降伏時各部の波形（MOSFET 電圧波形およびドレイン電流）

(4) アバランシェエネルギー計算

アバランシェエネルギーは下記から計算される。

$$\Delta V = -L\frac{di_D}{dt} \quad \text{から}$$

$$BV_{DSS} - V_{DD} = -L\frac{di_D}{dt}$$

$$di_D = -\frac{BV_{DSS} - V_{DD}}{L}dt$$

$$i_D(t) = I_{AS} - \left(\frac{BV_{DSS} - V_{DD}}{L}\right)t$$

$$E_{AS} = \int_0^{t_1} i_D(t) \cdot BV_{DSS}dt$$

$$= \int_0^{t_1} \left\{I_{AS} - \left(\frac{BV_{DSS} - V_{DD}}{L}\right)t\right\} \cdot BV_{DSS}dt$$

$$= \left[I_{AS}BV_{DSS}t - \frac{1}{2}\left(\frac{BV_{DSS} - V_{DD}}{L}\right)BV_{DSS}t^2\right]_0^{t_1}$$

ここで、

$$t_1 = \frac{I_{AS}L}{BV_{DSS} - V_{DD}}$$

を代入して式を解くと

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

$$E_{AS} = \frac{1}{2} L I_{AS}{}^2 \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}}$$

となる。

2.1.6. チャネル温度 T_{ch}、保存温度 T_{stg}

最大チャネル温度 T_{ch}(max)はパワーMOSFET を構成する材料と信頼度によって規定され、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。一般にパワーMOSFET の劣化はチャネル温度が高くなるにつれて加速され、平均寿命 L_m（時間）、チャネル温度 T_{ch}（K）との間には、A,B をトランジスター固有の定数として、次式の関係が認められています。

$$\log L_m = A + \frac{B}{T_{ch}}$$

従って、長期寿命の保証を要するパワーMOSFET では不良率、信頼度に見合った許容チャネル温度の上限を決めております。保存温度 T_{stg} はパワーMOSFET を動作させないで保存し得る温度範囲で、これも構成する材料の性質と信頼度から規定されます。

2.1.7. 絶縁耐圧 $V_{ISO(RMS)}$

フルモールドパッケージ製品において、指定されたケース部分と内部回路および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確認します。絶縁耐圧は AC 電圧の実効値で示します。

2.2. 静的特性

表 4　静的特性項目

項目	記号	単位	説明
ゲート・ソース間漏れ電流	I_{GSS}	μA	ドレイン・ソース間をショートし、ゲート・ソース間に指定の電圧を与えた時の漏れ電流です。
ドレインしゃ断電流	I_{DSS}	μA	ゲート・ソース間をショートし。ドレイン・ソース間に指定の電圧を与えた時の漏れ電流です。
ドレイン・ソース間降伏電圧	$V_{(BR)DSS}$ $V_{(BR)DSX}$	V	指定の漏れ電流を流した時のドレイン・ソース間の耐圧です。 $V_{(BR)DSS}$:ゲート・ソース間を短絡 $V_{(BR)DSX}$:ゲート・ソース間を逆バイアス
ゲートしきい値電圧	V_{th}	V	Threshold voltage の略でソースとドレインの間に指定の電流が流れる時のゲート電圧です。
ドレイン・ソース間オン抵抗	$R_{DS\ (ON)}$	Ω	MOSFET がオン状態のときのドレイン・ソース間の抵抗値です。
順方向伝達アドミタンス	$\|Y_{fs}\|$	S	$\|Y_{fs}\|$は g_m とも呼ばれており、ゲート電圧増加分に対するドレイン電流の増加分のことで、$\|Y_{fs}\| = \Delta I_D/\Delta V_{GS}$ で表せます。パワーMOSFET の感度あるいは増幅能力を示します。I_D-V_{GS} 特性カーブから読み取ることが可能です。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

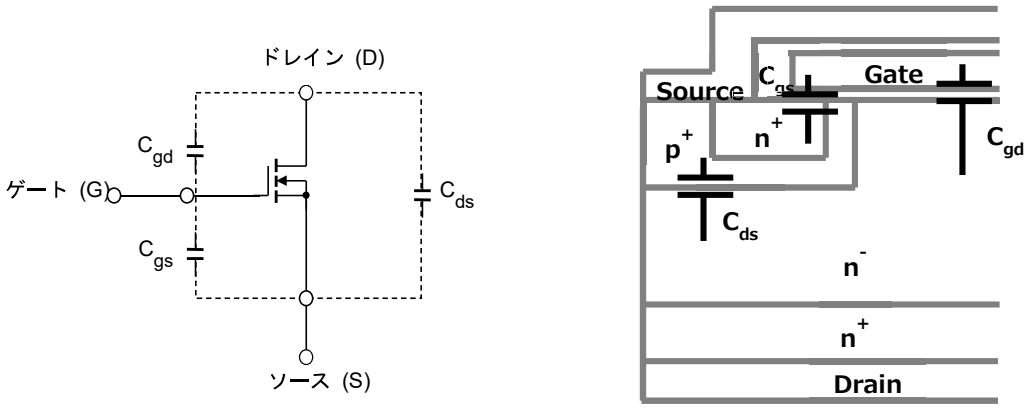
2.3. 動的特性

表 5　動的特性項目

記号	単位	単位	説明
静電容量	C_{iss} C_{rss} C_{oss}	pF	C_{iss} は入力容量、C_{rss} は帰還容量、C_{oss} は出力容量です。この容量は、パワーMOSFET のスイッチング性能に影響を及ぼします。
実効容量（エネルギー換算）	$C_{o(er)}$	pF	C_{oss} を充電する為に必要な E_{oss} から求めた実効容量値です。
ゲート抵抗	r_g	Ω	MOSFET 内部のゲート抵抗値です。
スイッチング時間	t_r t_{on} t_f t_{off}	ns	t_r は上昇時間、t_{on} はターンオン時間、t_f は下降時間、t_{off} はターンオフ時間です。
MOSFET dv/dt 耐量	dv/dt	V/ns	MOSFET ターンオフ時のドレイン・ソース間電圧変動に対する耐量です。

2.3.1. 静電容量特性

パワーMOSFET は、ゲートがシリコン酸化膜で絶縁されている構造であるため、ドレイン、ゲート、ソースの各端子間には、図 7 に示すような静電容量が存在します。ゲート・ドレイン間の静電容量 C_{gd} とゲート・ソース間の静電容量 C_{gs} は、主にゲート電極の構造から決定し、ドレイン・ソース間は縦方向構造に基づく PN 接合容量により静電容量 C_{ds} が決定されます。パワーMOSFET では、入力容量 $C_{iss}=C_{gd}+C_{gs}$、出力容量 $C_{oss}=C_{ds}+C_{gd}$、帰還容量 $C_{rss}=C_{gd}$ が重要な項目です。図 8 は、C_{iss}, C_{rss}, C_{oss} のドレイン・ソース間電圧 V_{DS} に対する依存性を示しています。パワーMOSFET のスイッチング特性は、主に入力容量 C_{iss} とドライブ回路の出力インピーダンスにより変化します。この入力容量を充電するために、ゲート・ソース間にはゲート電流が瞬間的に流れ、ドライブ回路の出力インピーダンスが低いほどスイッチング時間は速くなります。また、パワーMOSFET の容量が大きいと軽負荷時の損失が大きくなります。C_{iss}, C_{rss}, C_{oss} の温度依存性はほとんどありません。



入力容量 $C_{iss} \fallingdotseq C_{gd} + C_{gs}$
出力容量 $C_{oss} \fallingdotseq C_{ds} + C_{gd}$
帰還容量 $C_{rss} \fallingdotseq C_{gd}$

図 7　容量等価回路

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

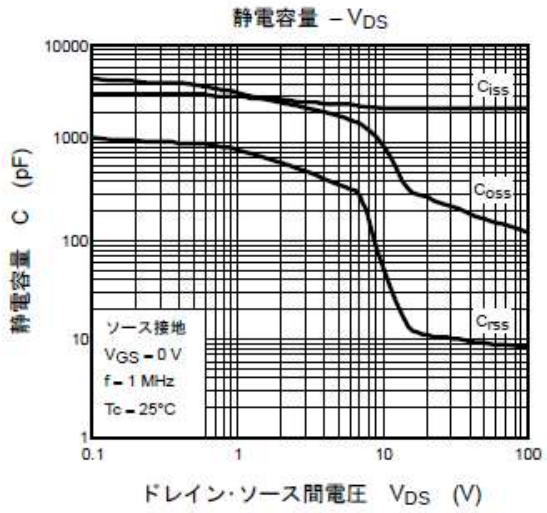


図 8　静電容量- V_{DS} 特性

2.3.2. 実効容量(エネルギー換算)

$C_{o(er)}$はドレイン電圧変動間による有効出力容量（エネルギー変換）であり下記に計算式を示します。スーパージャンクション MOSFET はその構造上から大きな出力容量を持っています。MOSFET のターンオン、ターンオフ時にはこの容量への充放電による損失も生じます。

$$\frac{C_{o(er)} \times {V_{DS}}^2}{2} = \int_0^{V_{DS}} C(v) \times v dv$$

$$C_{o(er)} = \frac{2}{{V_{DS}}^2} \int_0^{V_{DS}} C(v) \times v dv$$

C(v)は V_{DS} に依存性のある出力容量 C_{oss} の関数です。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.3.3. スイッチング特性

パワーMOSFET が多数キャリアデバイスであることによる顕著な特性は、バイポーラトランジスタに比べて、高速動作に優れており、高周波のスイッチング動作ができることです。スイッチング時間測定回路と入出力波形を図 9 に示します。

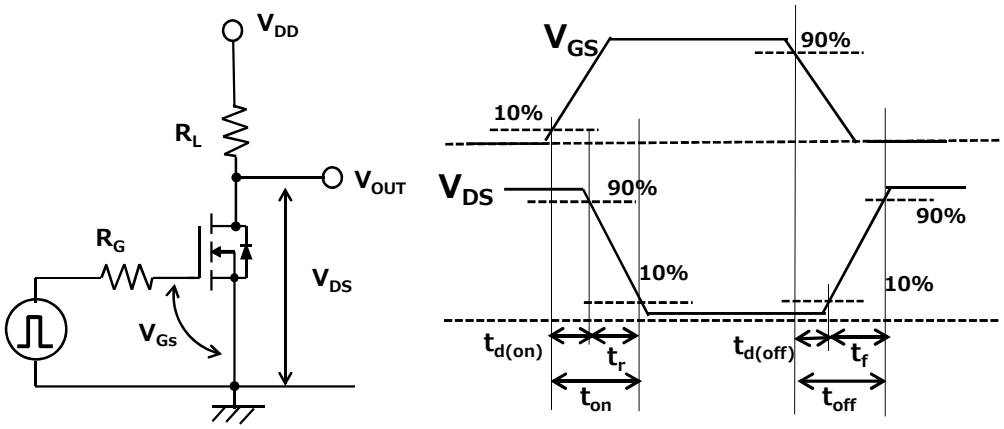


図 9　スイッチング時間測定回路と入出力波形

スイッチング時間の入出力波形に関する記号定義について、以下に説明します。

(1) $t_{d\ (on)}$: ターンオン遅延時間
　ゲート・ソース電圧が設定電圧の 10%に達してから、ドレイン・ソース間電圧が設定電圧の 90%まで下降するまでのゲート・ソース間電圧に対するドレイン・ソース間の遅延時間です。
(2) t_r: 上昇時間(立ち上がり時間)
　ドレイン・ソース間電圧が設定値の 90%から 10%まで下降する時間です。
(3) t_{on}: ターンオン時間
　ターンオン時間で $t_{d\ (on)}$ + t_r になります。
(4) $t_{d\ (off)}$: ターンオフ遅延時間
　ターンオフ時にゲート・ソース間電圧が設定電圧の 90%に達してから、ドレイン・ソース間電圧が設定電圧の 10%まで上昇する時間です。
(5) t_f: 下降時間
　ドレイン・ソース間電圧が設定値の 10%から 90%まで上昇する時間です。
(6) t_{off}: ターンオフ時間
　ターンオフ時間で $t_{d\ (off)}$ + t_f になります。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.3.4. dv/dt 耐量

MOSFET のターンオフ時にドレイン・ソース間の電圧を急激に上昇させた場合、図 10 のように電圧変化 dv / dt により、MOSFET のドレイン・ゲート間 の PN 接合容量 C に、変位電流が流れます。この変位電流は $i = C \cdot (dv_C/dt)$ で示されます。この電流が流れると、この層の抵抗 R_b により、$i \cdot R_b$ による電圧降下が発生し、この電圧レベルが、寄生 NPN トランジスターのベース・エミッタ 順方向電圧 V_{BE} 以上となると寄生 NPN トランジスターがオンします。この時、ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} が高いと寄生 NPN トランジスターは 2 次降伏に入り、破壊する可能性があります。

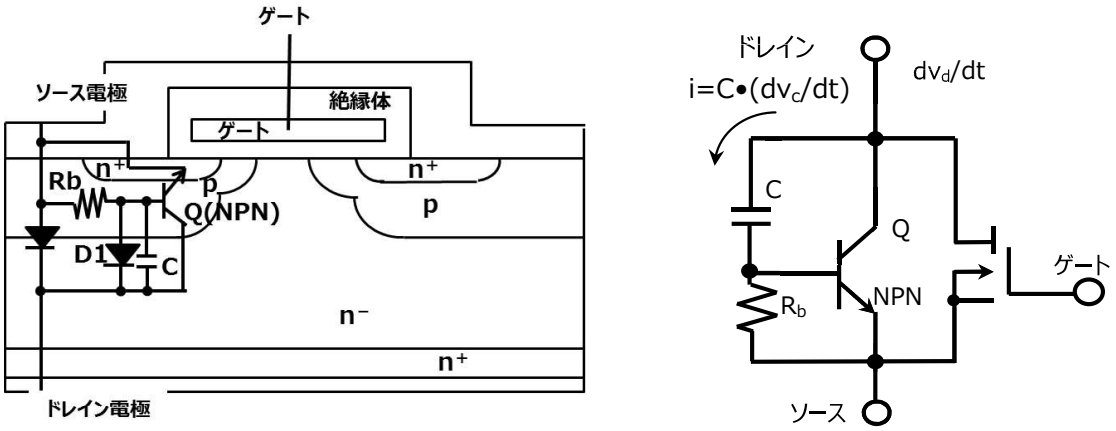


図 10　MOSFET の断面図及び等価回路

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.4. 電荷容量特性

表 6　電荷容量特性項目

項目	記号	単位	説明
ゲート入力電荷量	Q_g	nC	ゲート電圧が、ゼロから指定された電圧となるまでの総電荷量です。
ゲート・ソース間電荷量 1	Q_{gs1}		MOSFET がオンし始めるまで、ドレイン・ソース間電圧が低下する前にゲート・ソース間電圧を充電する電荷量です。
ゲート・ドレイン間電荷量	Q_{gd}		Q_{gd} は、ドレイン・ソース間電圧が低下しゲート・ドレイン間の容量を充電するミラー期間の電荷量です。
ゲートスイッチ電荷量	Q_{sw}		V_{th} を超えてミラー期間が終わるまでのゲート蓄積電荷量です。
出力電荷量	Q_{oss}		ドレイン・ソース間の電荷量です。

2.4.1. ゲート電荷量

MOSFET は入力端子ゲート G が絶縁されていますので、ゲート端子から見た電荷量 Q が重要なパラメーターになります。ゲート電荷量の定義を図 11 に示します。

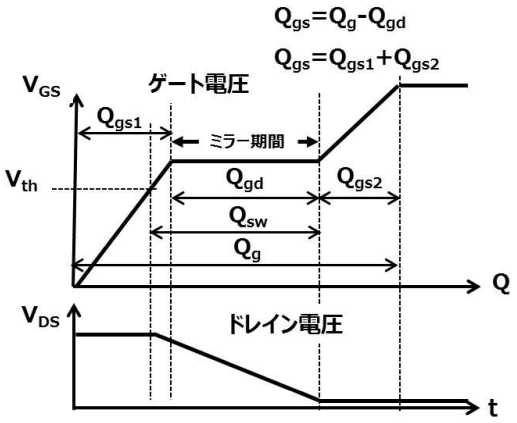


図 11　ゲート電荷量 Qg の定義

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.4.2. ゲート電荷の算出方法

パワーMOSFET のスイッチオン時にゲート・ソース間容量とゲート・ドレイン間容量を充電するため、ゲートに電流が流れます。ゲート電荷量は測定回路、図 12 左にて、ゲートに定電流を流し、ゲート・ソース間電圧と時間の波形グラフ(図 12 右)の時間軸にゲート定電流 i_G を乗じることで、時間軸をゲート電荷量 Q_g で表すことができます。ゲート入力電荷量は下記式で表されます。

$$Q_g = \int_0^t i_G(t)dt$$

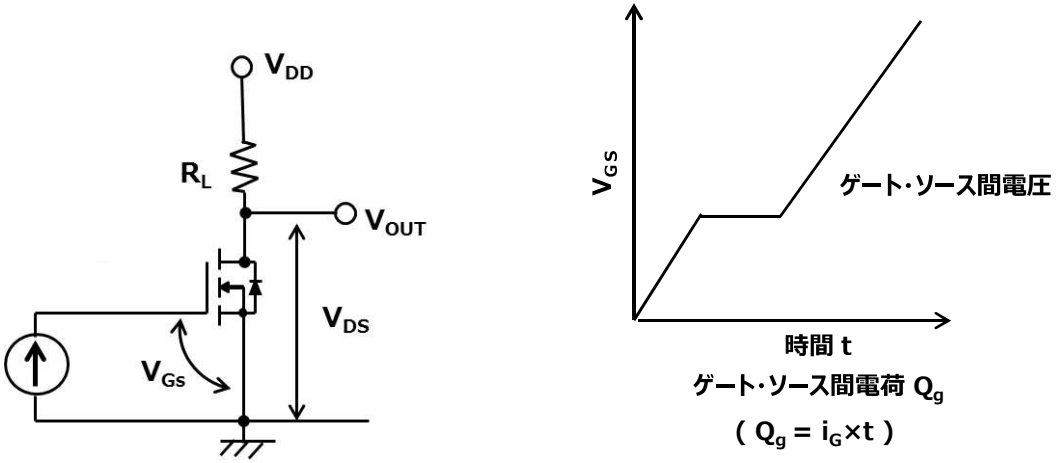


図 12　ゲート電荷

2.4.3. 出力電荷量（Q_{oss}）

Q_{OSS} はドレイン・ソース間の容量を充電するための電荷量です。Q=CV において MOSFET では C_{oss} は V_{DS} により変動するため実際には下記の式で表されます。

$$Q_{OSS} = \int_0^{V_{DS}} C(v)dv$$

C(v)は V_{DS} 依存性のある出力容量 C_{oss} の関数です。Q_{oss} はデータシートにある静電容量―V_{DS} 特性（図 1.7）において C_{oss}（出力容量）を V_{DS} で積分した値になります。Q_{oss} は、スイッチング電源などの応用において特に軽負荷時の効率に影響を及ぼします。

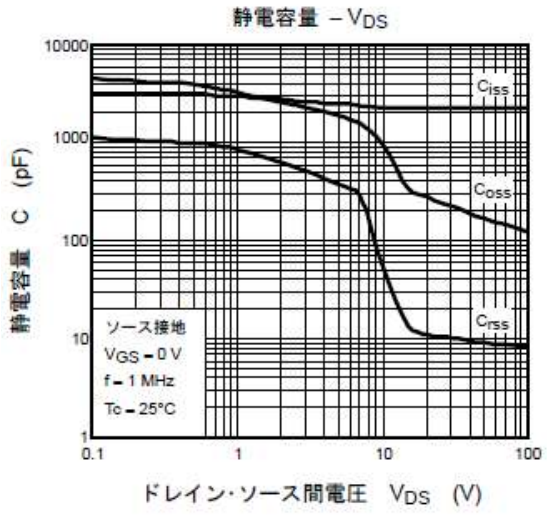


図 13　静電容量-VDS 特性

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.5. ソース・ドレイン間特性

表 7　ソース・ドレイン間特性項目

項目	記号	単位	説明
ドレイン逆電流(連続) ドレイン逆電流(パルス)	I_{DR} I_{DRP}	A	MOSFET のボディーダイオード順方向電流の許容される最大値です。
順方向電圧(ダイオード)	V_{DSF}	V	ボディーダイオードに順方向電流を流した時のドレイン・ソース間電圧です。
逆回復時間	t_{rr}	ns	指定の測定条件におけるボディーダイオードの逆回復動作において逆回復電流が消滅するまでの時間(t_{rr})及び電荷量(Q_{rr})です。その時のピーク電流値が I_{rr} です。
逆回復電荷量	Q_{rr}	μC	
ピーク逆回復電流	I_{rr}	A	
ダイオード dv/dt 耐量	dv/dt	V/ns	ダイオード逆回復時のドレイン・ソース間電圧変動に対する耐量です。

2.5.1. ボディーダイオード特性

MOSFET は、その構造上ソース・ドレイン間にダイオードが等価的に内蔵されます。このボディーダイオードの順方向電流 I_{DR}(連続)、I_{DRP} (パルス)は個別データシート上で定義されます。図 14 にボディーダイオードの電流特性を示します。逆方向降伏電圧の定格は、ドレイン・ソース間電圧定格 V_{DSS} と同じ規格となります。このダイオードの逆回復時間 t_{rr} に関し、図 15 に測定回路と波形例を示します。

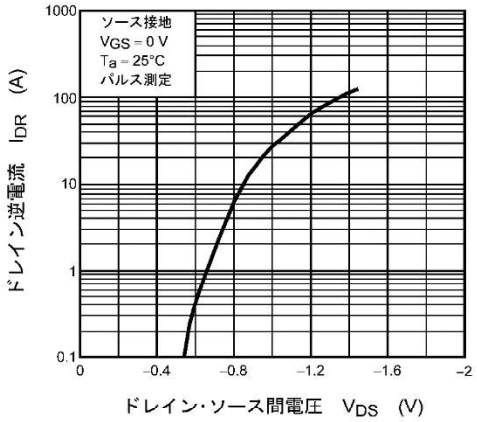


図 14　ボディーダイオードの電流特性

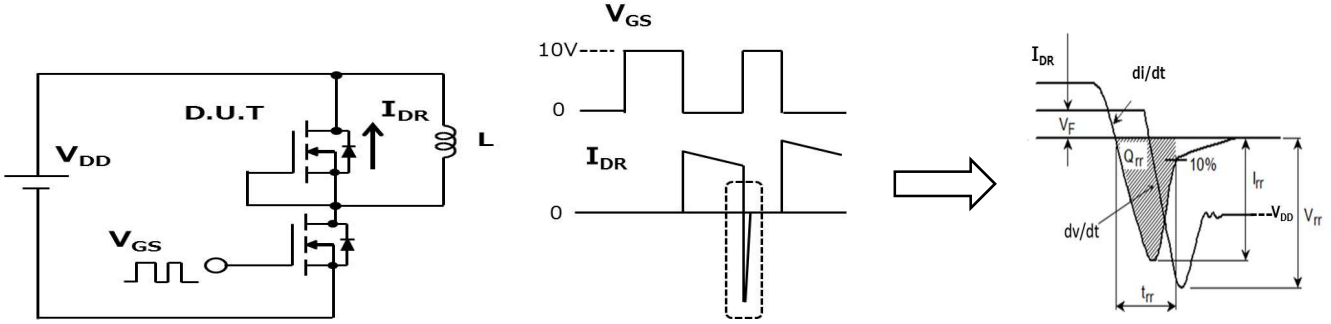


図 15　MOSFET のボディーダイオードの逆回復時間

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

2.5.2. ボディーダイオード dv/dt 特性

MOSFET のボディーダイオードに電流を流している状態で、逆方向に電圧を反転させるとボディーダイオードは逆回復動作に入り、ドレイン・ソース間の電圧が急激に上昇します。図 16 のように電圧変化：dv / dt により、MOSFET のドレイン・ゲートの PN 接合容量 C に、変位電流が流れ（i= C･（dv/dt））、この電流と抵抗 R_b により、電圧降下を発生し、この電圧が、寄生 NPN トランジスターをターンオンさせます。この時、ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} が高いと寄生 NPN トランジスターが 2 次降伏に入り、プロセスは異なりますが 2.3.4 の MOSFET の dv / dt と同様に素子を破壊する可能性があります。

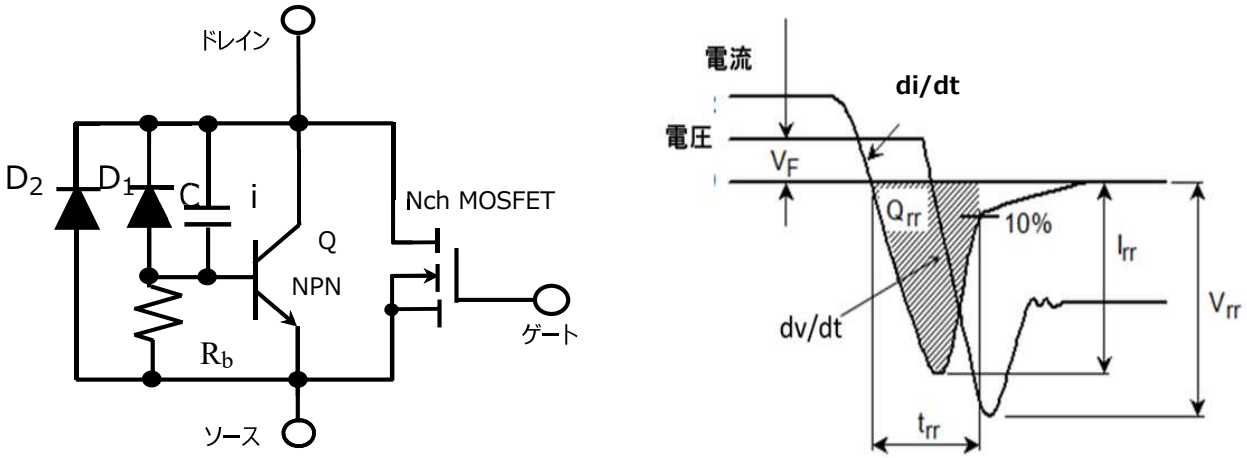


図 16　ボディーダイオードの等価回路及び逆回復時の波形

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

3. MOSFET の選び方

MOSFET を選ぶ場合、用途に応じて適切な定格、特性を持つ製品を選ぶ必要があります。

3.1. 電圧・電流定格

MOSFET 選択においてドレイン・ソース間電圧 V_{DSS}（定格）は重要です。定格以上の電圧が加わると MOSFET を破壊する可能性があります。素子の耐圧は実際の使用電圧に対して十分余裕をもって選ぶ必要がありますが、MOSFET は耐圧が高いほどオン抵抗 $R_{DS(ON)}$が高くなる傾向にあり、過剰に高耐圧の製品を選択すると素子導通時の損失を増やすことになります。サージ電圧が生じる場合、サージのピーク値に合わせて耐圧を選ぶとオン抵抗の大きい素子を選ぶことになります。そのため、サージ電圧が素子の定格を超えブレークダウン領域に入った場合のアバランシェ降伏電流やエネルギー耐量を保証することで対応している素子もあります。この製品を選ぶことで、より低耐圧で低オン抵抗の製品を選ぶことができます。

ドレイン電流 I_D の上限は一般にオン抵抗から決まります。MOSFET は $I_D^2 \times R_{DS(ON)}$にて求められる損失が許容損失だけでなく、実使用条件での発熱による温度上昇が動作温度範囲を超えないような素子を選択します。

3.2. V_{GS} 検討

素子を選択するうえで V_{GS} 条件も重要な項目になります。下記にドレイン電流、$R_{DS(ON)}$及びゲート電圧について述べます。

(1) MOSFET をスイッチング用途で使用する場合は線形領域（ピンチオフ電圧以下）で使用することでオン抵抗を低い状態（V_{DS} が低い領域）で使用できます。（図 1.1）オン抵抗を低い状態で使用することで損失を減らすことができます。また V_{GS} の値によって流し得る電流が制限されるため注意が必要です。

(2) MOSFET はゲート電圧がスレッシュホールド電圧（V_{th}）以上でオンになりなります。（図 1.2）V_{th} よりも十分高い V_{GS} を使用する必要があります。V_{GS} が高いほど $R_{DS(ON)}$が小さくなる傾向があります。また温度が高くなれば $R_{DS(ON)}$は大きくなります。（図 1.3）素子を低損失で使用するためには、必要とする電流において素子の抵抗値をできる限り小さくするように V_{GS} を大きく使用することが重要ですが（図 1.4）、逆に V_{GS} が大きいと高周波スイッチングにおける低負荷時にはドライブ損失の影響が大きいため最適なゲートドライブ電圧を考えることが重要です。

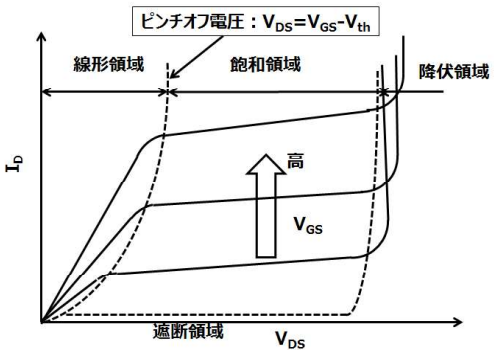


図 1.1 MOSFET の各状態の領域

(3) パワーMOSFET は、一般的に V_{GS}=10V でゲート駆動を推奨している製品が多いですが、低電圧駆動要求の 4.5V 対応可能製品もあります。セットの仕様に最適な製品を選択します。

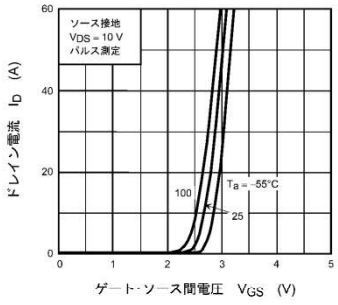


図 1.2 I_D-V_{GS} 特性

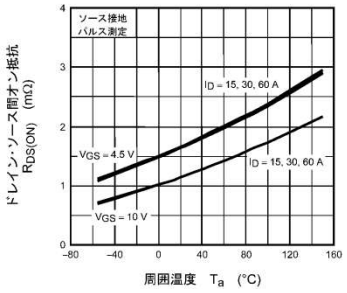


図 1.3 $R_{DS(ON)}$-温度特性

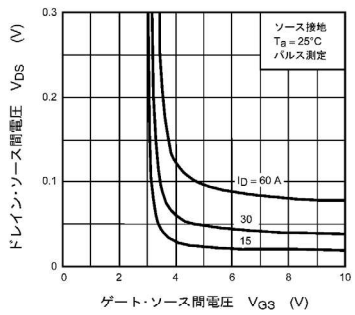


図 1.4 V_{DS}-V_{GS} 特性

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

3.3. スイッチング速度

高い周波数で素子をスイッチングさせる場合、素子のトータル損失にスイッチング損失が大きく影響するため、ハイスピードの素子を選択する必要があります。

パワーMOSFET のラインアップにおいて、低 $R_{DS(ON)}$、高速スイッチング型と分類されている場合は、用途に合わせて各々の製品群より選択してください。また、そのような分類が無い場合、ゲートドライブ回路の出力インピーダンスにより、必要とされるスイッチングスピードに調整する必要があります。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

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。

© 2022
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation