

MOSゲートバイポーラトランジスタ(MBT)

橋本 理(はしもと おさむ)

上野 勝典(うえの かつのり)

西村 武義(にしむら たけよし)

① まえがき

近年、工作機械、エアコンディショナ、ロボットなどのモータドライブ用インバータやOA機器、医療機器などの無停電電源では、装置の高効率化、小型軽量化に加えて、低騒音化に対する要望が著しく高まっている。

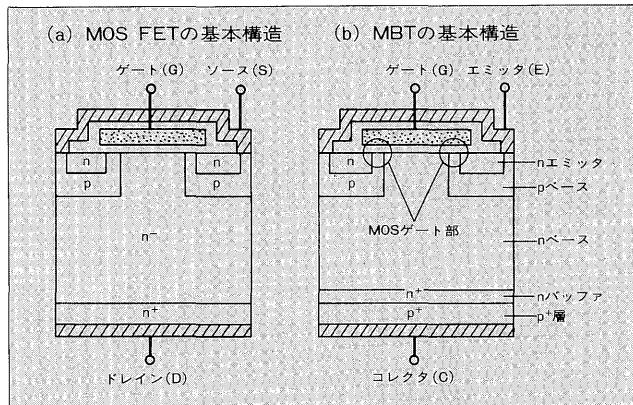
従来、この分野で多用されてきた半導体素子としては、バイポーラパワートランジスタやパワーMOS FETなどがある。バイポーラパワートランジスタは、1,000V以上の高耐圧で100A以上の大電流を通電できるが、スイッチング周波数は数kHzと低い。一方、パワーMOS FETは、スイッチング周波数は数十kHzから数百kHzと高い周波数で動作できるが、1,000V程度の高耐圧になると、通電できる電流は数Aと極めて小さい。

今回開発したMOSゲートバイポーラトランジスタ(富士電機呼称MBT)は、高耐圧、大電流を処理でき、しかも、スイッチング周波数はバイポーラパワートランジスタより高い数kHzから数十kHzまでの領域をカバーできる素子である。言うなれば、バイポーラパワートランジスタとパワーMOS FETの両方の特長を生かした新形複合素子である。以下に、MBTの構造、動作、設計、定格特性について概要を述べる。

② MBTの構造

図1に、今回開発したMBTの基本構造をMOS FETとの対比で示す。基本的には、MOS FETのドレイン側にp⁺層を1層設けた構造となっている。図1はMBTの単位構造を示しており、実素子では、この単位構造が多数個集積されている。MBTの各端子の名称を、図1に示すようにゲート(G)、エミッタ(E)、及びコレクタ(C)とする。本MBTは絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)と同等の構造を有しており、IGT、COMFET、及びバイポーラ形MOS FETと呼ばれる素子と同じである。

図1 MOS FETとMBTの構造比較



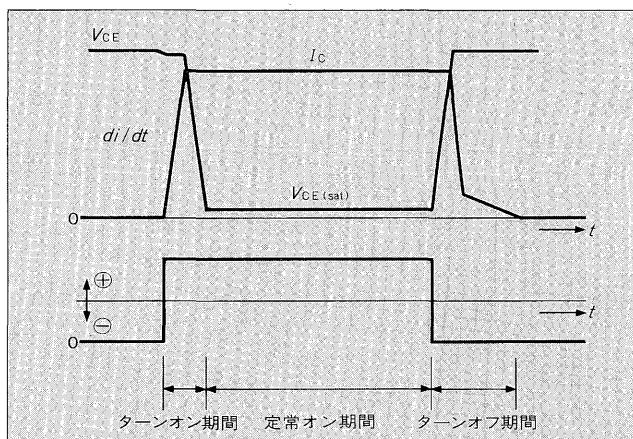
③ MBTの動作

MBTの動作を図2に示すようにターンオン期間、定常オン期間、及びターンオフ期間に区分して、誘導性負荷回路(図3)の場合について説明する。

3.1 ターンオン期間 [図4(a)]

図4(a)に示すように、エミッタ(E)をアース電位とし、コ

図2 MBTの動作区分



橋本 理

昭和43年入社。電力用半導体素子の研究・開発に從事。現在、(株)富士電機総合研究所電子デバイス研究所主任研究員。



上野 勝典

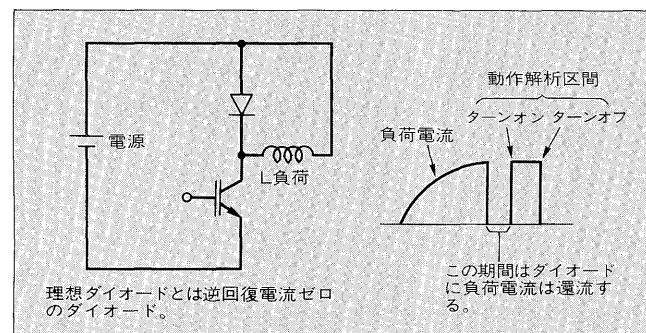
昭和57年入社。電力用半導体素子の研究・開発に從事。現在、(株)富士電機総合研究所電子デバイス研究所。



西村 武義

昭和59年入社。半導体素子の開発・製造に從事。現在、松本工場パワーデバイス部。

図3 誘導性負荷回路

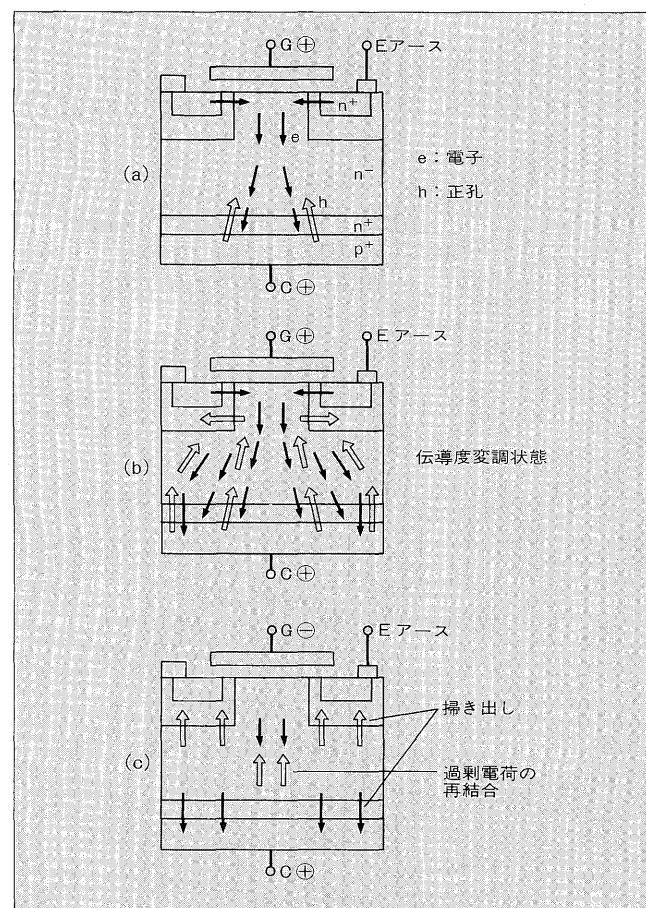


レクタ(C)に正の電圧を印加している状態で、ゲート(G)に正の電圧を印加すると、MOSゲート部にチャネルが形成され、nエミッタから電子がnベース層に注入される。nベース層に蓄積した電子により、コレクタ側のp⁺層からnベース層への正孔の注入が始まり、nベース層の電子と正孔の濃度は急激に増大し、伝導度変調状態を誘起する。そのため、コレクタ電流は急激に上昇し、負荷電流値に達する。その時点から、コレクタ-エミッタ間電圧が急激に減少し、数Vの極めて低い電圧となる。この期間がターンオン期間である。

3.2 定常オン期間 [図4(b)]

nベース層での伝導度変調が十分な状態で起き、大きな負荷電流を流しても、数Vと小さなコレクタ-エミッタ間

図4 MBTの動作説明図



電圧 ($V_{CE(sat)}$) が維持されている期間を定常オン期間と称する。

3.3 ターンオフ期間 [図4(c)]

次に、ゲートを零又はエミッタに対して負の電圧になると、チャネルが消滅し、nエミッタからの電子の注入が停止する。nベース層に蓄積した電子と正孔は外部電源から印加されるコレクタ-エミッタ間電圧 (V_{CE}) の上昇により、正孔はエミッタ側に、電子はコレクタ側に掃き出され、インダクタンスの効果も加わり、負荷電流が流れ続ける。この期間は蓄積時間となり、コレクタ電流の減少は見られない。

MBTのコレクタ-エミッタ間電圧が外部電圧に到達した時点で掃き出し電流は停止し、コレクタ電流は急激に減少する。この期間が下降時間である。

残存するnベース層の電子と正孔の過剰電荷は再結合により減少して行き、電子と正孔の濃度は熱平衡状態に達する。この期間がティール時間となる。これら三つの期間を合わせてターンオフ期間という。

4 MBTの設計

先に述べたように、MBTはバイポーラパワートランジスタと同等以上の電流、電圧定格を有し、スイッチング周波数はバイポーラパワートランジスタより高い領域をねらいとした素子である。

したがって、MBTは次の特長を有することが望まれる。

- (1) スイッチング時間、スイッチング損失が小さいこと。
- (2) 定常オン電圧(コレクタ-エミッタ間飽和電圧)、定常オン損失が小さいこと。
- (3) 負荷短絡耐量が大きいこと(安全動作領域が広いこと)。

素子設計において上記(1)~(3)を実現するため、下記の工夫を施した。

(a) スイッチング特性とコレクタ-エミッタ間飽和電圧のトレードオフを改善するために、ゲート間隔、チャネル長、nベース層厚み、nバッファ層の濃度、p⁺層の濃度の最適化に加えてライフタイムキラー導入の最適条件の決定を行った。

(b) 負荷短絡耐量を上げるために、ラッチアップ現象が起きない構造とした。ラッチアップ現象とは、大電流が流れたとき、寄生サイリスタが動作してターンオフ能力が失われる現象である。これに対しては、pベースの深さと濃度の最適化及びnエミッタの深さと横寸法の縮小化により解決した。これにより、図5に示すように、ターンオフ時に流入するnエミッタ直下のpベース中を流れる正孔電流によって生じる電位降下を極力小さく抑え、寄生サイリスタのターンオン現象を防止した。

以上の工夫により、600V/25A、600V/50A、1,200V/25Aの定格を有するラッチアップ現象のないMBTを製品

図5 ターンオフ時のラッチアップ現象

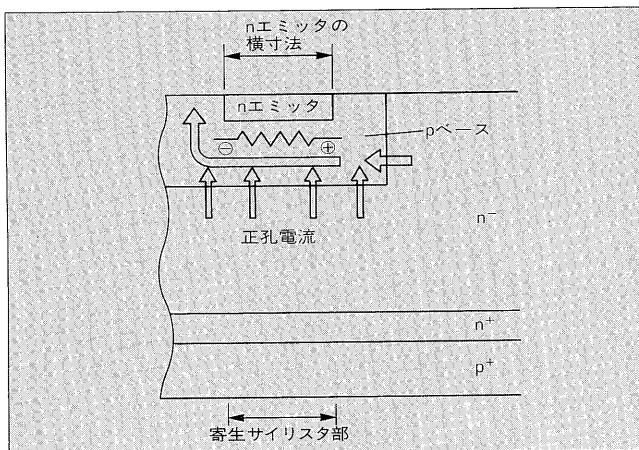
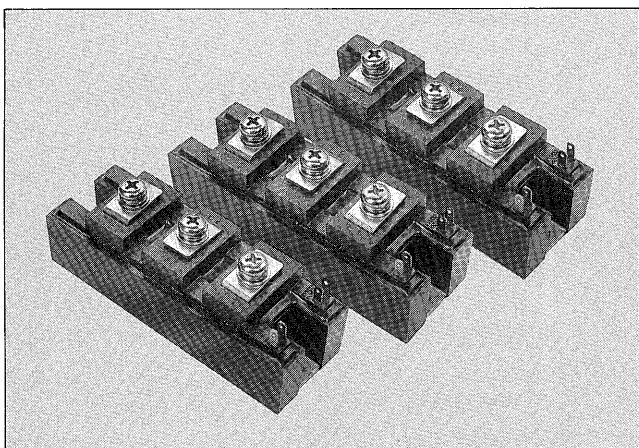


図6 MBTの外観



化することができた。図6にその外観を示す。

次にその電気的定格及び特性について述べる。

5 MBTの定格と特性

表1に、今回開発した600V/25A, 600V/50A, 1,200V/25Aの3機種の主要な定格と特性を示す。

各種パラメータ依存性は、1,200V/25A MBTを例にとって紹介する。

5.1 ターンオン特性

ターンオン時の di/dt - コレクタ電流の関係を図7に示す。 $I_c=25A$ において di/dt は $200A/\mu s$ 以上の値をもつている。

図8にターンオン損失 - ゲート抵抗の関係を示す。ゲート抵抗を大きくすると、ターンオン損失が増大するため、適用に当たってはゲート抵抗の選定に注意する必要がある。

5.2 順方向特性

図9にコレクタ - エミッタ間飽和電圧 ($V_{CE(sat)}$) - コレクタ電流 (I_c) の関係をゲート電圧 (V_{GE}) をパラメータとして示す。ゲート電圧の増加によりコレクタ電流は増大するが、コレクタ電流がある値以上の高い領域では飽和する

表1 主要定格特性

項目	単位	600V 25A	600V 50A	1,200V 25A
コレクタ - エミッタ間降伏電圧	V	600	600	1,200
ゲート - エミッタ間電圧	V	± 20	± 20	± 20
コレクタ電流	A	25	50	25
ゲートしきい値電圧	V	3~6	3~6	3~6
コレクタ - エミッタ間飽和電圧	V	4	4	4
ターンオフ時間	μs	1.0	1.0	1.0
接合温度	°C	150	150	150

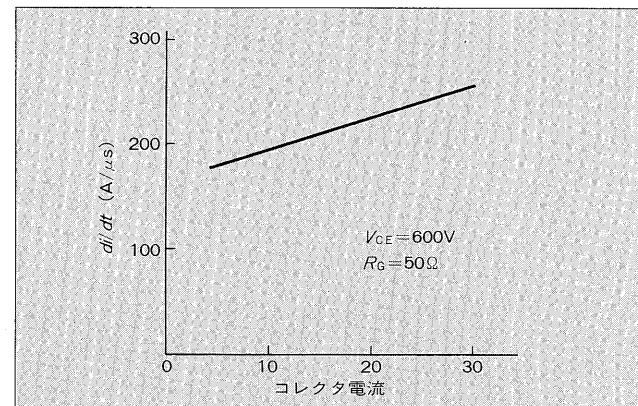
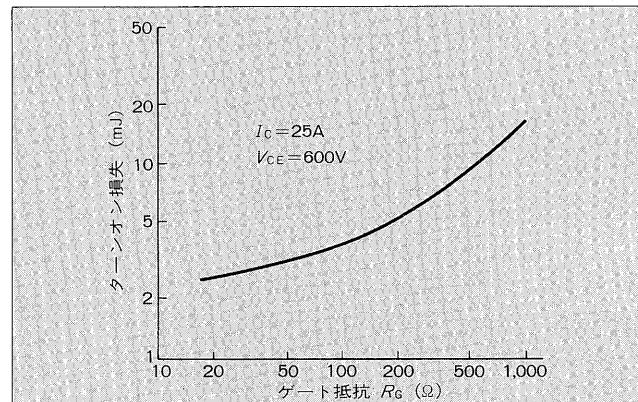
図7 ターンオン時の di/dt 

図8 ターンオン損失とゲート抵抗の関係



特性をもつ。 $V_{GE}=15V$, $I_c=25A$ の条件では $V_{CE(sat)}=3.5V$ である。

図10にコレクタ電流 (I_c) - ゲート電圧 (V_{GE}) の関係をケース温度 (T_c) をパラメータとして示す。ケース温度を高くするとコレクタ電流は流れにくくなる。

図11に負荷短絡耐量を試験したときの電圧・電流波形を示す。

$V_{GE}=15V$, $V_{CE}=800V$, $I_c=300A$ の条件で通電パルス幅 = $10\mu s$ を確保している。

5.3 ターンオフ特性

図12に、ターンオフ時間 (t_{off}) とコレクタ - エミッタ間飽和電圧 ($V_{CE(sat)}$) の関係を示す。設計パラメータの最適化により、 $V_{CE(sat)}=3.5V$ で $t_{off}=0.7\mu s$ を確保している。

図9 コレクタ電圧 - コレクタ電流の関係

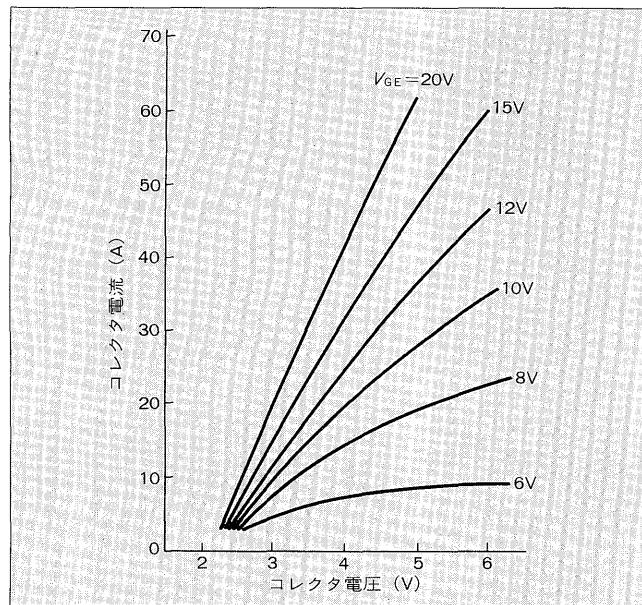


図10 コレクタ電流 - ゲート電圧の関係

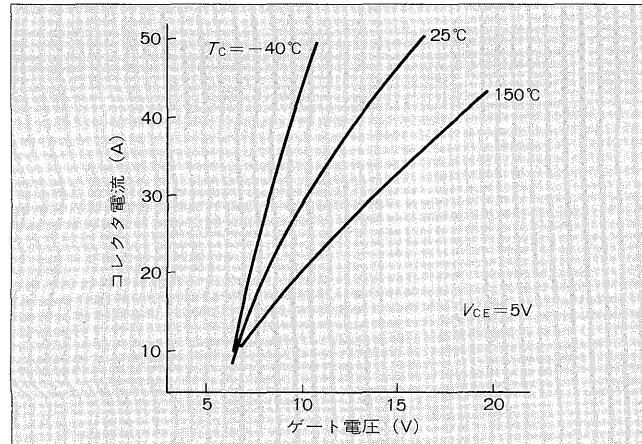


図11 負荷短絡耐量試験時の電圧・電流波形

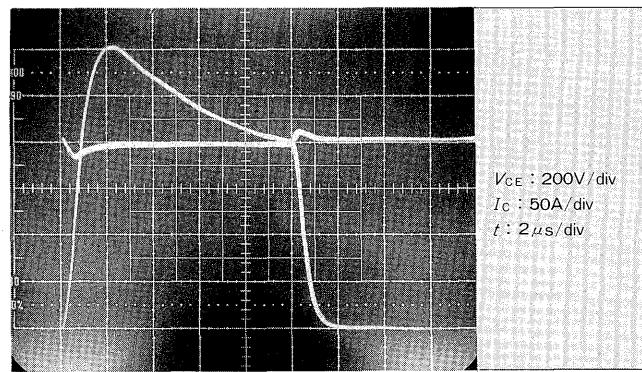


図13にターンオフ損失 (E_{off}) とコレクタ電流 (I_C) の関係を示す。

$I_C = 25\text{A}$ のとき、 $E_{off} = 3\text{mW}$ 以下となる。

図14に、 $I_C = 25\text{A}$ 通電した時のターンオフ波形を示す。

図12 ターンオフ時間とコレクタ - エミッタ間飽和電圧の関係

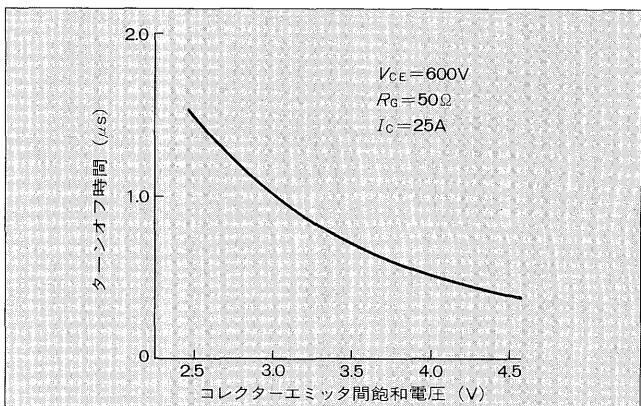


図13 ターンオフ損失とコレクタ電流の関係

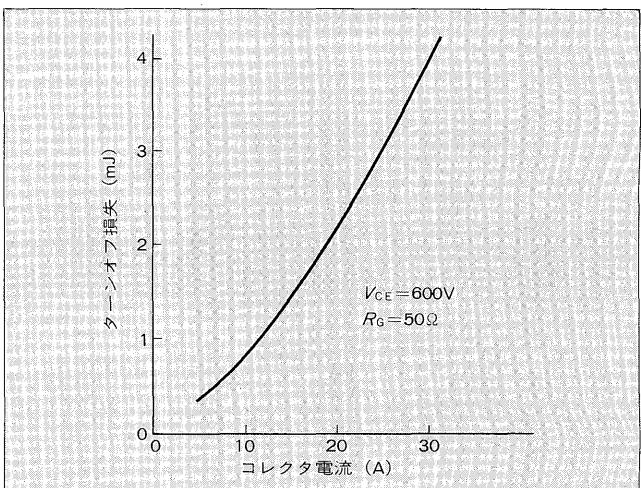
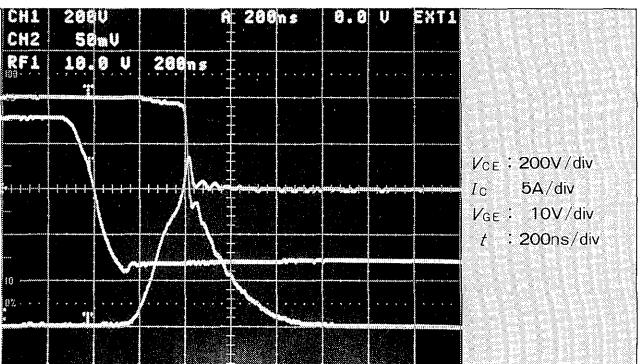


図14 MBTのターンオフ波形



⑥ あとがき

今回開発した本 MBT は各種設計パラメータの最適化により、バイポーラパワートランジスタと同等の電圧、電流定格を有しながら、バイポーラパワートランジスタより高いスイッチング周波数で使用できる新複合素子である。

本 MBT は、各種 PWM インバータの低騒音化やスイッチング電源の小形軽量化に寄与し、今後、系列拡大により、各種変換装置への幅広い適用が期待されている。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。