

電子注入促進型トランジスタ (IEGT)

Injection Enhanced Gate Transistor (IEGT)

北川 光彦
M. Kitagawa

小倉 常雄
T. Ogura

松田 秀雄
H. Matsuda

未来に向かって快適な生活を維持するためには、電力の発生から、モータなどの電力末端負荷のインバータドライブ化まで考慮した、高効率な電力利用を可能にするパワーエレクトロニクスシステムがきわめて重要である。そのためには、パワー半導体素子がシステムの要請に応じて、自在なスイッチング動作をすることが必要で、キ一部品であるパワー半導体素子の損失の低減や、MOS ゲート化によるスイッチング特性の改善が不可欠である。しかし、4 kV 以上の素子耐圧の領域で、従来の GTO (Gate Turn-Off thyristor) を置き換えられる MOS ゲート駆動のパワー半導体素子の実現は困難であった。このような高耐圧・大電力の領域で使用可能な素子として、電子注入促進型トランジスタ (IEGT) を開発した。

IEGT は当社オリジナルの素子で、通電時の損失が少なく、MOS 駆動で確実にターンオン/ターンオフできるパワー半導体素子の条件を十分に満たし、パワーエレクトロニクス装置分野のキーデバイスとして期待される。

To ensure comfortable life in the future, power electronics systems must attain higher efficiency in all fields from power generation to motor control circuits. In order to attain high efficiency in power electronics systems, power semiconductor devices that have a low on-state voltage drop and quick switching characteristics for the MOS gate drive are essential.

However, it has been difficult to replace GTOs with MOS gate devices at blocking voltages exceeding 4 kV. The injection enhanced gate transistor (IEGT) is therefore proposed for use at such high voltages and high currents.

This paper explains the basic principle of the IEGT in relation to the equivalent circuit, and key technologies that enable the IEGT to be realized.

1 まえがき

エネルギー消費の増大による大気中の CO₂ 量の増加など環境問題が深刻化している。クリーンなエネルギーである電力の需要は、中国などアジア地域の経済成長とともに、今後世界規模で増大し、21 世紀の中ごろには現在の 2 倍以上になると予測されている。化石燃料の高騰予測とも相まって、非化石燃料化と新電源などの電力の分散利用化の拡大も予測されている。これらに対応するため、電力の安定供給・効率的運用および電力を利用消費する側での有効利用と省エネルギーが世界規模で重要な課題となっている。

これらの課題解決がパワーエレクトロニクス (PE) システムの重要な役割であり、そのキーとなる部品がパワー半導体素子である。PE システムが効率的に運用され、かつ有効に活用されるためには、パワー半導体素子がシステムの要請に応じて、自在なスイッチング動作をしなければならない。近年急速に需要が拡大した各種インバータシステムとそれに使われる MOSFET (MOS 型電界効果トランジスタ) や IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) などの電圧駆動型の自己消弧型パワー半導体素子は、これらの要請に合致した素子である。

しかし、IGBT は高耐圧領域ではサイリスタや GTO と比

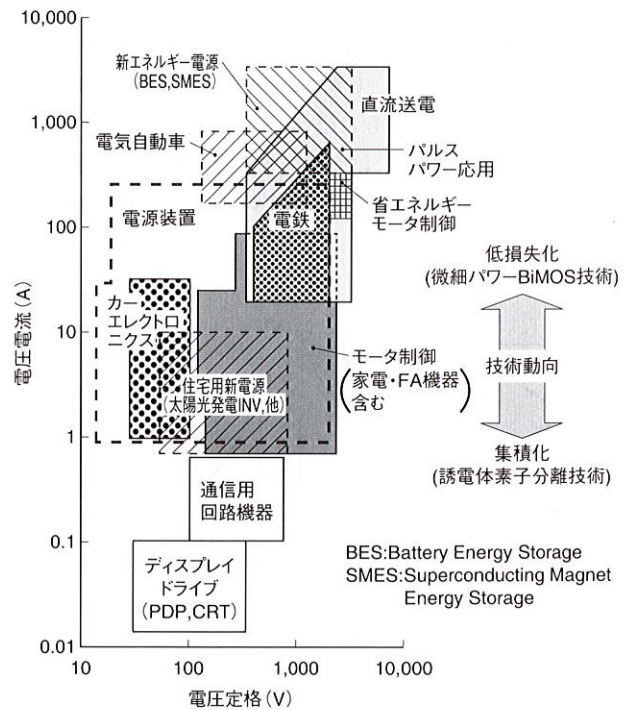


図 1. パワー半導体素子の守備範囲と技術動向 パワー半導体素子の守備範囲を素子の電流定格 (縦軸) と電圧定格 (横軸) 中で示した。中容量以上の領域が IEGT 適用が期待される分野である。

Ratings and technological trends of power semiconductor devices

較するとオン電圧の増大が著しく、4 kV 級以上では実用的な素子を作ることは困難とみられていた。この困難を解決して、高電圧・大電流パワー半導体素子の電圧駆動化を可能にしたのが電子注入促進型トランジスタ (IEGT) の技術である⁽¹⁾。

図 1 に、パワー半導体素子の応用分野と技術動向を示す。電圧定格 1,000 V 以上の領域が IEGT 適用が期待される中心分野である⁽²⁾。ここでは、IEGT の基本的な技術について述べる。

2 高耐压パワー半導体素子に要求される特性

パワー半導体素子では、高抵抗ベース層のオン抵抗をいかに小さくするかが重要になる。このオン抵抗の大部分は高抵抗ベース層の抵抗で決まり、オン状態のキャリアの蓄積が大きく影響する。この点、高抵抗ベース層のカソード側からアノード側まで全体にわたりキャリア蓄積が可能なサイリスタが理想的な構造で、pin ダイオードとほぼ同じ低いオン抵抗が実現できる。

図 2 に、この pin ダイオードと IGBT のおのおのの素子断面、等価回路とオン状態で高抵抗ベース層に蓄積されたキャリア分布を示す。pin ダイオードでは、オン状態でアノードから注入された正孔は、カソード側の n エミッタ層によって直接カソード電極に抜けることができない。また、カソード側から注入された電子は、アノード側の p エミッタによってアノード電極に直接抜けることができない。このため、高抵抗ベース層全体にキャリアプラズマが蓄積され、低オン抵抗が得られる。しかし、サイリスタや pin ダイオードはオン電圧が低くても自己ターンオフ能力がない。

それに反して、IGBT はターンオフ能力と広い安全動作領域を合わせもつが、pin ダイオードの場合とは対照的に、オ

ン状態でアノード側から注入された正孔は p ベース層を通り直接カソード電極へ流れる。このため、高抵抗ベース層のカソード側に効果的にキャリアを蓄積することができないので、オン抵抗が高く、高耐压化してこのベース層を広げるとオン電圧が急激に増大するという問題があった。IGBT では、図 2 中の等価回路で示した npn と pnp トランジスタはラッチアップしないように設計する必要がある。このため、ラッチアップさせるサイリスタのようにカソード側に多数のキャリアプラズマを蓄積するのは困難である。MOS ゲートで制御するサイリスタの試作例はあるが、高耐压トランジスタで飽和電圧をサイリスタ並みに低くすることは困難な課題とみられていた。

トランジスタとして非ラッチアップ状態を維持しながら、サイリスタと類似のキャリア分布をオン状態で実現することを可能にした技術を 3 章で述べる。

3 IEGT

図 3 に、IEGT の基本コンセプトと等価回路の例を示す⁽³⁾。キーになったのは、独特なトレンチゲート構造により生ずる電子注入促進効果である。この効果により、トランジスタとして非ラッチアップ状態を維持しながら、オン状態で高抵抗ベース層の制御電極側に高濃度のキャリアプラズマを蓄積することが可能になった。図 4 は、IEGT の注入促進効果の素子順方向電圧降下に与える影響を示している。この技術によって、これまで解決不可能にみえた前述の障害、トランジスタとサイリスタの壁を取り払い、双方の特徴、すなわち MOS トランジスタの制御の容易さと、スイッチング時の広い安全動作領域を残したまま、4.5 kV 耐圧素子でもサイリスタ並みの低いオン抵抗を実現することが可能になった。図 5 は、シミュレーションにより求めた、同じベ

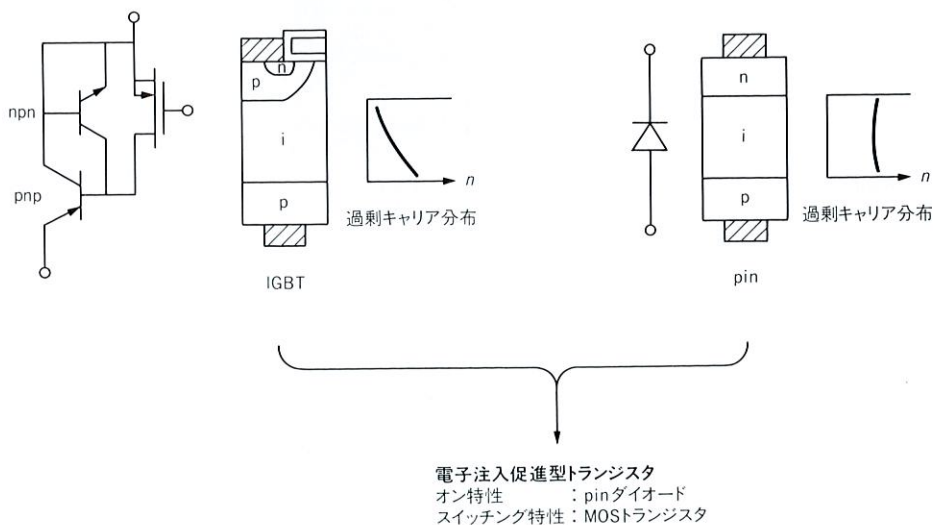


図 2. パワー半導体素子に要求される特性 IGBT, pin ダイオードの素子断面とオン状態で高抵抗ベース層に蓄積されるキャリア分布と等価回路を示す。

Required characteristics of power semiconductor device

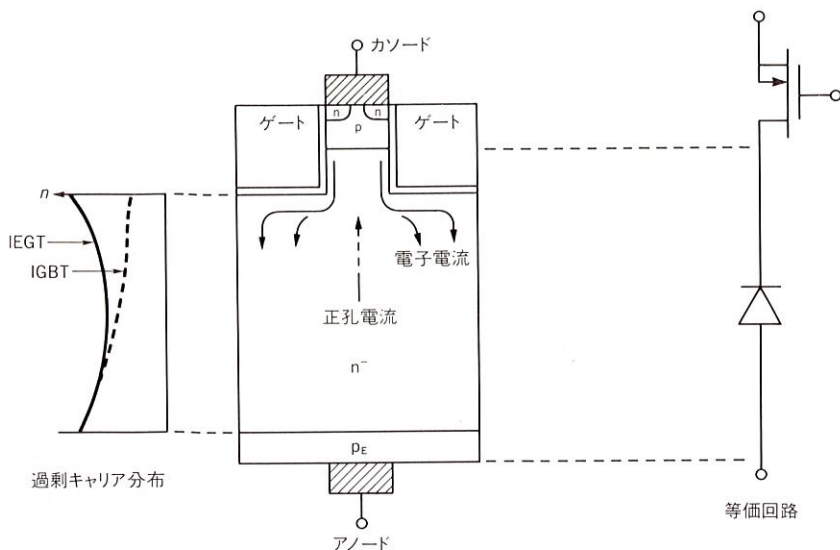


図3. IEGTの基本コンセプトと等価回路の例
素子の断面と、オン状態の高抵抗ベース層に蓄積されるキャリア分布と等価回路の例を示す。

Basic concept of IEGT, and example of equivalent circuit

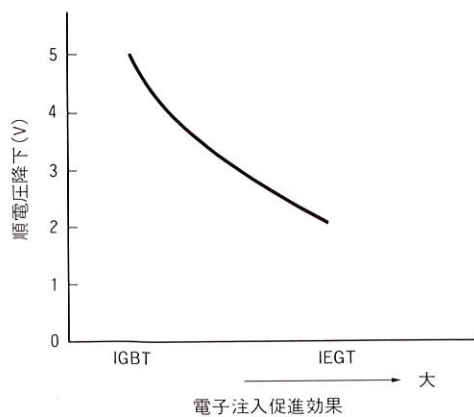


図4. カソード側の電子注入効率がオン電圧に与える影響 IEGTのオン電圧(縦軸)とカソード側電子注入効率(横軸)の関係を示したもので、4.5 kV 耐圧素子でもサイリスタ並みの低いオン抵抗を実現できる。一番左側が IGBT に相当する。

Degree of electron injection enhanced gate effect vs. on-state voltage drop

ース厚 (450 μm) をもつ GTO と IEGT の順方向電流電圧特性である。

オン状態の高抵抗ベース層中のキャリア分布に注目すると、IEGTの等価回路は図3に示したようなMOSFETとダイオードが直列に接続した型になる⁽³⁾。この等価回路でダイオードのオン抵抗に比べてMOSFETの抵抗が無視できるような場合、すなわち450 μm 以上の高抵抗ベース層(n^-)をもつIEGTの場合、そのオン電圧はダイオードのオン電圧にほぼ等しくなる。IEGTのトレンチゲート構造はオン状態で、高い電子注入効率をもつ n^+ 拡散エミッタ層の働きをする⁽³⁾。

MOSゲートの注入促進効果を素子設計に導入することにより、従来のトレードオフの制約から脱出した。IEGTでは

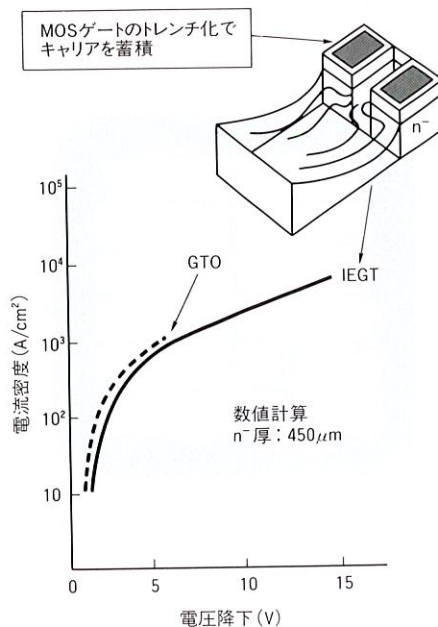


図5. 4.5 kV IEGTの電流電圧特性 450 μm 以上の高抵抗ベース層をもつIEGTの場合、オン電圧はダイオードのオン電圧にほぼ等しくなる。

Current-voltage waveform of 4.5 kV IEGT

ゲート電極のあるカソード側にキャリアを蓄積できるので、ターンオフ時のキャリアの排出が容易になるという特性も兼ね備える。

4 IEGT を可能にした重要技術

従来の伝統的なパワー半導体素子であるサイリスタ、GTR_{TM}(ジャイアントトランジスタ)、GTOなどの製造プロセスには、GaやAlなどによる60~100 μm の深い主接合の

形成、金拡散によるキャリアライフタイム制御、タングステン板へのアロイ、サンドブラストを用いたベベル形状による接合終端構造の形成など、この分野に特有な技術があるが、微細化に必要な浅い拡散層をもつデバイスになじむプロセスではなかった。GTOのnバッファ構造やアロイフリー構造^{(4),(5),(6)}などの新しい技術を開発する一方で、IGBTの実用化によりパワー素子への微細加工技術の適用が進展し、高耐圧化も進められつつある。

IEGTでは、デバイスシミュレーションによるキャリア分布やその挙動の解析技術をはじめ、電子の注入促進効果を可能にする微細埋込みトレンチゲート、数ミクロンの主接合でも4kV以上の素子耐圧を可能にするリサーフ構造⁽⁷⁾、高歩留まりMOSプロセス、荷電粒子による局所ライフタイム制御⁽⁸⁾、高信頼性アロイフリーパッケージなどの新しい要素技術を駆使することによって、従来のパワー半導体素子では実現できなかった、理想的な高抵抗ベース層中のキ

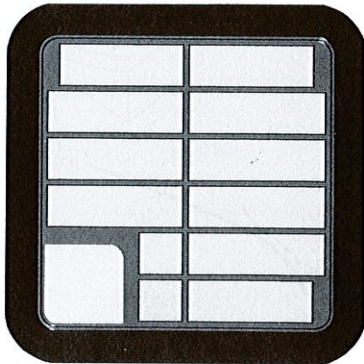


図6. 4.5 kV IEGT 試作チップの例 チップのカソード側を示した写真である。

Fabricated 4.5 kV IEGT chip

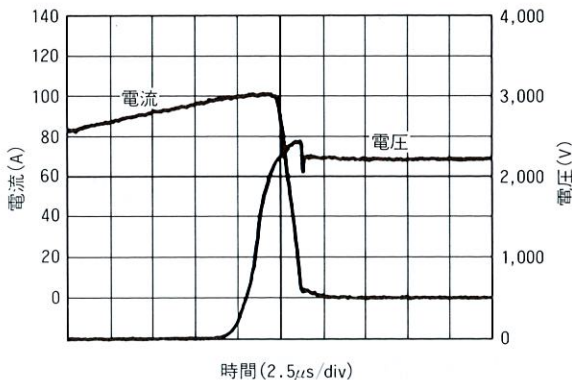


図7. 4.5 kV IEGT のターンオフ波形 100 A の電流を電源電圧 2,250 V で遮断したときの波形で、□ 12.7 mm までのチップ試作が可能となる。

Turn-off waveform of 4.5 kV IEGT

ャリア分布をもつ素子の実現が可能になった。

□ 12.7 mm の IEGT のチップを図6に示す。図7は、チップのターンオフ波形の一例である。□ 12.7 mm のチップを並列接続することによって、1,000 A 以上の電流の遮断を確認している。これを最近開発された圧接型 IGBT と同様なパッケージに組み込むことによって IEGT の大電流化が可能である⁽⁹⁾。

5 あとがき

IEGT は、当社のオリジナルな発想から生まれた素子である。この新型素子は、通電時の損失が少なく、MOS 駆動で確実にターンオン/ターンオフできるというパワー半導体素子に期待されていた条件を十分に満たすもので、従来のサイリスタなどが使われている大電力の分野などで使用する素子を実現することができる。

図6に示したように、4.5 kV 級の単位チップを試作して基本的な性能を確認しつつあり、大電流化に向けた検討を進めている。PE 装置分野の中核となるキーデバイスとして成長するためには、ユーザシステムでの評価結果を反映することが重要であり、製品化に向けた注力を進めてユーザシステムの期待に答えられるようにしたい。

文 献

- (1) M. Kitagawa, et al: IEEE IEDM Technical Digest, p.679 (1993)
- (2) 竹内 南: 平成4年電気学会全国大会, シンポジウム S.8-2
- (3) M. Kitagawa, et al: SSDM Extend Abstracts, p.760 (1994)
- (4) 北川光彦, 他: 高耐圧 GTO, 東芝レビュー, 43, 4, p.332 (1988)
- (5) 岩崎政美, 他: 高耐圧・大容量 GTO と光トリカサイリスタ, 東芝レビュー, 52, 2, pp.51-54 (1997)
- (6) 松田秀雄: 日経マイクロデバイス, 54, 10, p.107 (1989)
- (7) M. Kitagawa, et al: Jpn. J. Appl. Phys. 35 Pt.1, No.12 (1996)
- (8) 大澤明彦: 電気学会研究会資料, EDD-95-67 (1995)
- (9) 日吉道明, 他: 2.5 kV 平型 IGBT および応用技術, 東芝レビュー, 52, 2, pp.43-46 (1997)



北川 光彦 Mitsuhiro Kitagawa

個別半導体事業部大型電力素子技術部主務。
大型電力素子の開発に従事。
Discrete Semiconductor Div.



小倉 常雄 Tsuneo Ogura

研究開発センター 材料・デバイス研究所主任研究員。
大型電力素子の開発に従事。
Materials & Devices Research Labs.



松田 秀雄 Hideo Matsuda

個別半導体事業部大型電力素子技術部課長。
大型電力素子の開発に従事。
Discrete Semiconductor Div.