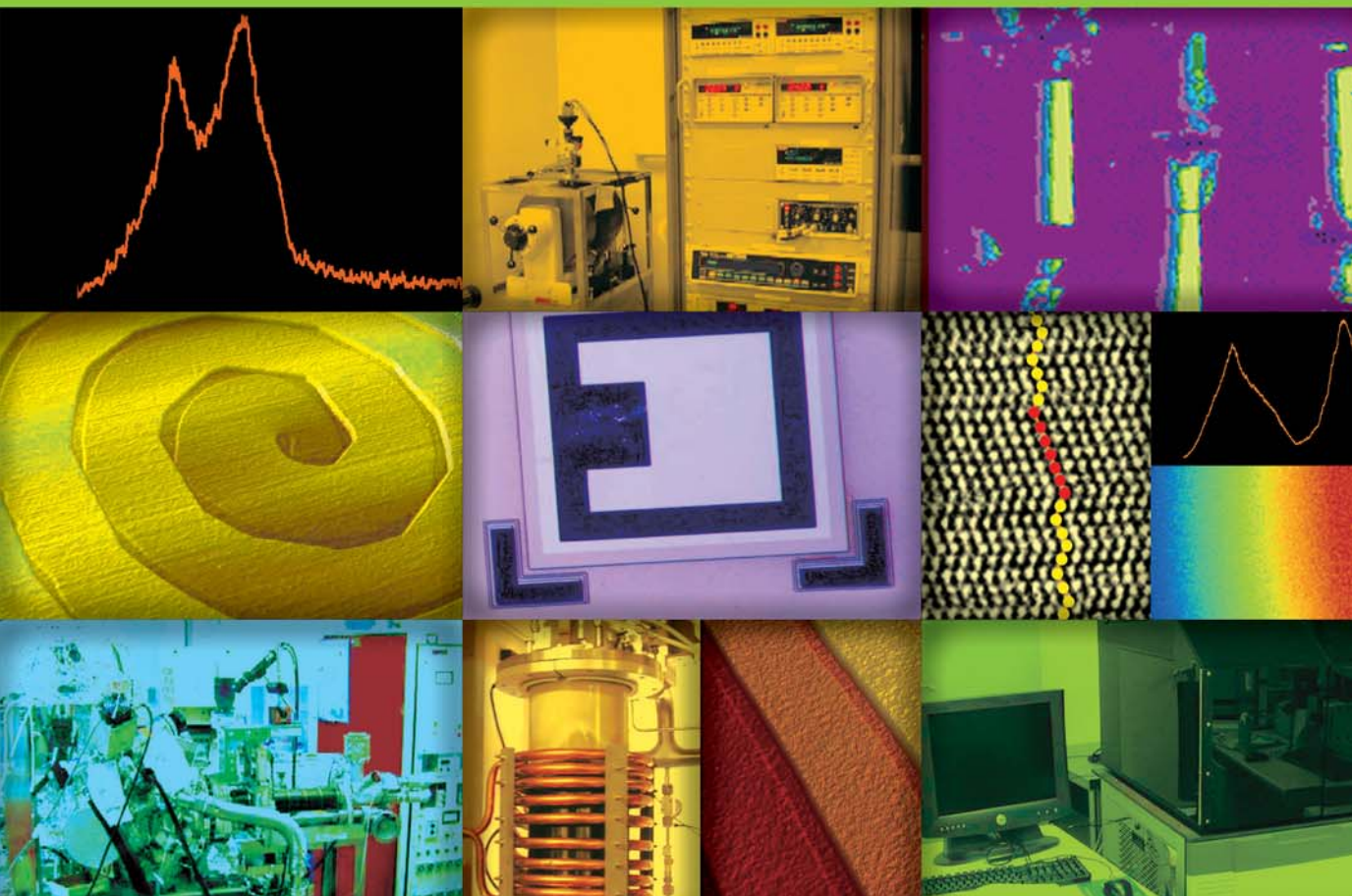


Siの限界を打破する SiC/GaN パワー・デバイスの普及が目前に!

ワイドギャップ 半導体の研究

SiC JFETで作るオーディオ・アンプ
PFC機能を備えたLLCコントローラIC PLC810PG





新しいワイドギャップ半導体が世界を変える

パワー・エレクトロニクス用半導体デバイスの重要性

須田 淳

Jun Suda

「半導体デバイスなしには現代社会は成り立たない」ということに異を唱える人はいないと思います。その例の一つ挙げてみてくださいと頼めば、多くの人が、「半導体集積回路(LSI)がなければ、コンピュータもインターネットも携帯電話も存在しえないから」と答えるのではないのでしょうか。確かにそのとおりです。

しかし、半導体は情報/通信分野に留まらず、エネルギーの分野でも大きな役割を果たしています。電力変換を担う半導体である「パワー半導体デバイス」です(半導体のエネルギー分野での貢献については、もちろん太陽電池と発光ダイオードにおいても非常に大きな役割を果たしていますが、ここでは割愛します。過去の『グリーン・エレクトロニクス』を参照)。

したがって、「パワー・デバイスなしには現代社会は成り立たない」と言っても過言ではありません。パワー・デバイスの進歩により、機器の高性能化や小型化、大幅な省エネルギー化が実現されているのです。

■ 新幹線

一番身近な例として、新幹線をあげたいと思います。ここに初代新幹線である0系新幹線と、最新式のN700系新幹線の比較があります。

図1に示すように東京-新大阪間の運転では、0系新幹線と同じ最高速度220 km/hで比較すると、N700系新幹線はなんと半分(51%)の電力で運転することが

できるのです。実際にはN700系は、最高速度270 km/hで運転していますが、それにもかかわらず0系よりも32%少ない電力で済んでいるのは驚異的と言えます。

車体の軽量化や空気抵抗の低減も省エネルギー化に一役買っていますが、大きな役割を果たしているのがパワー・エレクトロニクスです。

新幹線の架線には25 kVの交流(60 Hz)が供給されています。図2に0系新幹線の主回路の模式図を示します。当時は、半導体は整流器にのみ使われていました。AC 25 kVを変圧器で降圧し、ダイオード・ブリッジで整流して直流電動機を駆動していました。

速度の調整は、変圧器のタップの切り換えにより整流後の直流電圧を変化させることで行っていました。ブレーキには、電動機を発電機として運転する、発電ブレーキが使われていましたが、ブレーキ時に生じた電力は抵抗器で熱として放散していました。

一方、最新式のN700系の主回路を図3に示します。こちらには最先端のパワー・エレクトロニクス技術が投入されています。変圧器で1220 Vに降圧したあと、Si絶縁ゲート・バイポーラ・トランジスタ(IGBT)を用いた3レベル・コンバータで2400 Vの直流に変換し、Si IGBT電圧可変/周波数可変(VVVF)インバータで交流にして誘導電動機を駆動しています。

減速時には電動機を発電機として動かし、インバータ、コンバータの働きを逆にして、発電した電力を架線に返す回生ブレーキが行われています。インバータによる無駄のないモータの運転と、回生ブレーキの導入によるエネルギーの回収によって、トータルとして格段の省エネルギーが実現されたわけですね。

このようなパワー・エレクトロニクスが実現できたのは、高耐圧/大電流の高性能Si IGBTのお陰と言えます。

■ ワイドギャップ半導体デバイスの登場

このような素晴らしい半導体パワー・デバイスですが、現代社会が抱える深刻なエネルギー問題や、電気というエネルギーの利用形態が今後も伸び続けることなどから、より一層の進歩が期待されています。

電力消費量(東京-新大阪間)

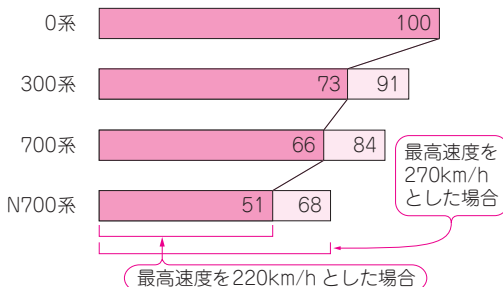


図1⁽⁸⁾ 新幹線の電力消費量の車種別の比較
数値は0系車両の220 km/h時の消費電力を100とした相対値

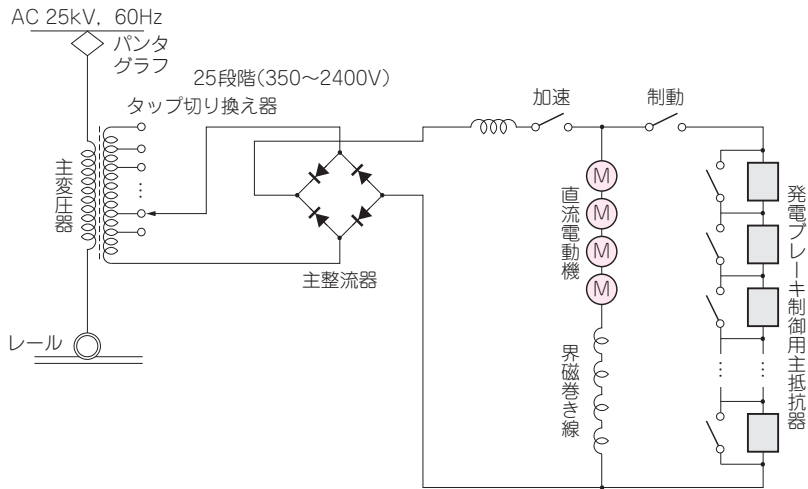


図2 0系新幹線の主回路の模式図

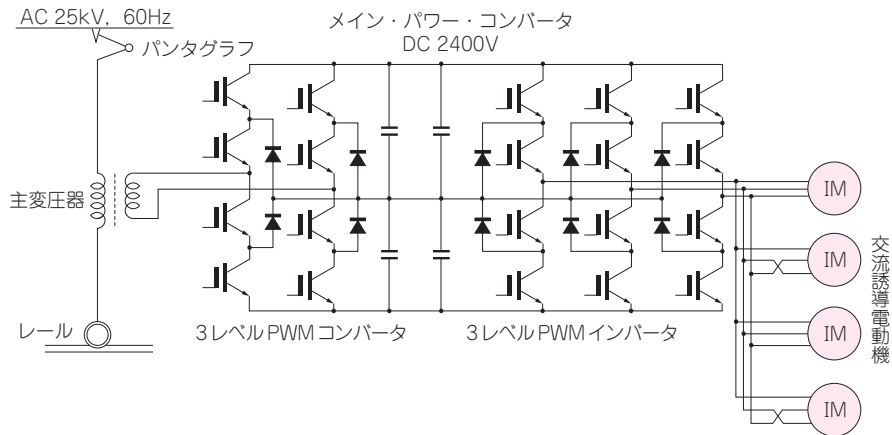


図3⁽⁹⁾ N700系新幹線の主回路の模式図

しかし、現在使用されている最先端のパワー・デバイスはケイ素(シリコン; Si)という半導体材料がもつ性能を、ほぼ限界まで引き出しており、Siの物性(物理的性質)の限界から大幅な発展は困難な状況です。

そんななかで、近年、大きな注目を集めているのが、Siに比べて禁制帯幅(バンド・ギャップ)の大きなワイド・バンド・ギャップ半導体デバイスです(略して「ワイドギャップ」と呼ぶ)。ワイドギャップ半導体はSiに比べてパワー・デバイス応用の観点で素晴らしい物性を有しており、大きなポテンシャルを秘めています。ワイドギャップ半導体を使えば、Siでは到底実現不可能な、低損失、高速スイッチング、高温動作が可能になります。長年の基礎研究により、ワイドギャップ半導体の基礎技術が徐々に確立されており、今後10年間に大きく花開くことが予測されます。

本特集では、パワー・デバイスの基本的な事項について説明したあと、パワー・デバイスの動作原理につ

いて説明し、その原理に基づき、なぜワイドギャップ半導体によって優れたパワー・デバイスが実現できるかを説明します。

最後に、ワイドギャップ半導体のなかで研究が進んでおり、非常に有望な材料である、炭化硅素(シリコン・カーバイド; SiC)と窒化ガリウム(ガリウム・ナイトライド; GaN)について、それぞれの材料の特徴、基礎研究の進展具合、具体的なデバイスの開発状況について紹介します。

■ 新しいデバイスが変える世界

ワイドギャップ半導体によってパワー・デバイスが大きな進化を遂げると、どのような世界が期待できるか予測してみましょう。

電力変換というと、エアコンや鉄道のインバータなど大きなものを考えてしまいますが、身近なところにも電力変換はあります。パソコンなどの電子機器の電

源部、ACアダプタです(図4)。

30年前は、電源と言えばトランスによる降圧、ダイオード・ブリッジによる整流、そしてシリーズ・レギュレータによる電圧調整の安定化電源が一般的でした。シリーズ・レギュレータは、目的の電圧よりも高い電圧の直流をトランジスタの電圧降下、つまりトランジスタでの電力消費で調整する仕組みですから、当然効率は低くなります。トランスは大きくて重いですし、レギュレータの放熱も考慮しなければなりませんでした。

その後、パワー・デバイスの進歩により、スイッチング電源が登場しました。大きなトランスが不要となり、効率も大幅に向上しています。これが現在です。

しかし、スイッチング電源の効率も今ひとつです。携帯電話やパソコンのACアダプタが非常に熱くなっ

ている、つまり大きな損失を出していることにお気づきだと思います。もちろん、効率を最優先に作れば良いものですが、部品点数が多くなり、スイッチング損失低減のため動作周波数も下げなければならず、大きなコイルやコンデンサが必要になってしまいます。

ワイドギャップ半導体パワー・デバイスができれば、スイッチング電源を小型化しながら損失も低減できるようになります。ノート・パソコン程度の電源容量であれば、コンセント・プラグもしくはノート・パソコン本体にACアダプタが内蔵できてしまうのではないかとされています。

パワー・デバイスの存在感があるのは、大きなモータを回すインバータです。モータ駆動の進歩は先ほど新幹線の例で述べたとおりです。新幹線の電力消費量が半分になっても、それでもなお、かなりの電力損失がパワー・デバイス内で発生しています。新幹線の開発でも、パワー・デバイスの冷却方式が大きな課題になっていたそうです。

ワイドギャップ半導体のパワー・デバイスが実現できれば、損失をさらに低減することが可能になり、省エネに貢献します。それだけではなく、損失(発熱)が小さいこと、高温でも動作するということから、冷却システムを大幅に簡素化することができます。

冷却システムはシステム全体で大きな体積、重量を占めており、また、冷却水ポンプやプロアなどは故障の原因となります。冷却システムの簡素化はトータル・コスト、サイズ、重量低減、保守費用低減に有効です。

特にハイブリッド自動車や電気自動車などの場合は、冷却システムの簡素化が、コスト低減や車重低減による燃費向上など、大きなメリットとなるので、ワイドギャップ半導体に対する期待は極めて高くなっています(図5)。

モータ駆動の究極の形として、モータ自体にインバータを内蔵し、モータには電源と制御信号のみを供給



図4 電源の昔、今、未来



図5 インバータ・モータの現在と未来



写真1⁽¹⁰⁾ SiCインバータ内蔵モータ・システムの外観
(三菱電機)

するということが考えられています(写真1)。インバータとモータの間には大電流を流すために太いケーブルが必要ですが、そのケーブルが不要になるわけです。モータ周辺は高温になっていますので、今のSiデバイスでは厳しいですが、高温動作が可能なワイドギャップ半導体なら十分に動作可能です。

このようにワイドギャップ半導体によりパワー・エレクトロニクスの夢は大きく広がります。ただ、これらを実現するためには、ワイドギャップ半導体パワー・デバイスだけではなく、新しいシステムの設計や回路方式、高温に耐えられる受動部品やパッケージなどの開発など、さまざまな技術開発が必要です。新しいビジネスの大きなチャンスでもあります。

本特集では、ワイドギャップ半導体パワー・デバイ

スの基本的な事項を丁寧に説明していきます。本特集が、技術者のみなさまのワイドギャップ半導体への理解についての一助になれば幸いです。各章は基本原理の理解を重視していますので、実際の回路設計上のポイントなどについては述べられていません。これらについては良書が多数出ていますので、そちらを参考にいただければ幸いです[文献(1)~(4)]。ワイドギャップ半導体に関する技術書として、文献(5)~(7)を挙げておきます。

◆参考・引用*文献◆

- (1) 稲葉 保; パワー MOSFET 活用の基礎と実際, 2004年11月, CQ出版社.
- (2) パワー・エレクトロニクス回路の設計, トランジスタ技術スペシャルNo.98, 2007年4月, CQ出版社.
- (3) 大野 榮一; パワーエレクトロニクス入門, 改訂4版, 2006年9月, オーム社.
- (4) 兄玉 浩憲 著, 関 康和 編纂; 世界を動かすパワー半導体, 2008年12月, 電気学会 IGBT 図書企画編集委員会.
- (5) 松波 弘之, 大谷 昇, 木本 恒暢, 中村 孝 編著; 半導体 SiC 技術と応用(第2版), 2003年3月, 日刊工業新聞社.
- (6) 荒井 和雄, 吉田 貞史 共編; SiC 素子の基礎と応用2003年3月, オーム社.
- (7) 高橋 清 監修, 長谷川 文夫, 吉川 明彦 編著; ワイドギャップ半導体・光デバイス, 2006年4月, 森北出版.
- (8)* JR 東海ホームページ(<http://n700.jp/know/06.html>)
- (9)* 井上 亮二, 坂本 守, 神田 淳; N700系新幹線車両用主回路システム, 富士時報, Vol.79, No.2, 2006, pp.110~117.
- (10)* 「SiCインバータ内蔵モーターシステム」を開発, 報道資料, 2012年3月8日, 三菱電機株.

コラム 次世代DVD実現のキー・デバイス…GaN紫色半導体レーザ・ダイオード

使用するレーザ光線の波長を780 nmの赤外線から650 nmの赤色に短波長化することにより、コンパクトディスク(CD)からDVDへと光記録メディアの大容量化が進みました。DVDの後継となる次世代DVDでは、さらなる短波長化が求められていました。

レーザ光線の集光スポット径は波長程度が限界となります。波長を半分にするれば、スポット面積は1/4、つまり記憶密度を4倍に向上させることができます。大容量化のネックは、短波長の半導体レーザが存在しないということでした。世界中で青色レーザを実現すべく研究が行われていました。

最初に現れたのが、波長変換素子によるレーザでした。赤外線レーザを非線形光学結晶に通して高調波を発生させる(波長を半分にする)というものです。ただし、この場合は赤外線レーザのパワーをかなり強くしないといけないことや、部品が半導体レーザ

と光学結晶の組み合わせとなりコストやサイズの問題がありました。1990年代には、ワイドギャップ半導体のZnSeが青緑色レーザの最有力候補で、ソニーや3Mなど多くの企業でレーザが試作され、あと一歩で実用化という状態になっていましたが、素子寿命の問題で足踏みしていました。

そこに登場したのが青色LEDで成功を取めたGaNです。GaNは結晶が強く、長寿命のレーザが過去の半導体レーザ開発の歴史と比較すると、あっという間にできてしまいました。しかも波長が青緑色ではなく、さらに短波長な(大容量化に適した)青紫色です。GaN青紫色半導体レーザの実現で、Blu-ray Disc(BD)が誕生しました(名前はブルーですが実際に使われているのは青紫色405 nmです)。GaNは照明だけでなく、光記録でも大きな役割を果たしたのです。

第1章



スイッチング素子としての応用面から見た パワー・エレクトロニクス用 半導体の性能指標

須田 淳
Jun Suda

この章では、パワー・エレクトロニクス用半導体(パワー・デバイス)のさまざまな性能指標と、実際のパワー・エレクトロニクスにおけるその意味(価値)について具体的に説明します。

パワー・デバイスの性能指標

パワー・デバイスのデータシートを見ると、さまざまな数値(性能指標)が書かれています。最も簡単なパワー・デバイスとしてダイオードを例に挙げて、その性能指標について考えてみます。

● ダイオードの性能指標

▶ 電気的特性

理想的なダイオードの電流-電圧特性を図1のようになります。つまり、順方向では無損失で電流を流し(0Ω)、逆方向ではいかなる電圧に対してもまったく電流を流さない($\infty\Omega$)というものです。

一方、現実のダイオードの特性は図2のようになります。順方向では、電圧降下が生じます。多くの製品では、順方向電圧降下ということで、定格電流 I_{max} における電圧降下 V_F の最大値が保証されています。

当然ですが、電圧降下が大きいほど、損失が大きくなります。デバイスがON状態のときの損失をオン損失や通電損失と呼びます。電圧降下をそのときの電流値で割った値をオン抵抗(R_{ON})と呼ぶこともあります。

図2に示すように、ダイオードの電流-電圧特性は、ある電圧(立ち上がり電圧と呼ぶこともある。Siの場合は $0.6\sim 0.8\text{V}$ 程度)まで電流はほとんど流れませんので、大電流ではオン抵抗の小さなデバイスでも、電流が小さいところではオン抵抗が大幅に増大するので注意が必要です。

▶ 耐圧特性

逆方向では、ある電圧で絶縁破壊が起こり、電流が流れてしまいます。この電圧のことを絶縁破壊電圧、降伏電圧、もしくは単に耐圧と呼びます。多くの製品では、絶縁破壊が起こる電圧より小さい電圧を耐圧と称しています。ダイオードでは耐圧 400V という製品でも、実際に測定すると 1000V くらいまで絶縁破壊しない製品もあります。どの程度余裕を見ているかは素子やメーカーにより大きく異なります。

ここでは、絶縁破壊が起こる電圧を耐圧と呼ぶことにします。

現実のダイオードでは、逆方向印加電圧が耐圧に満

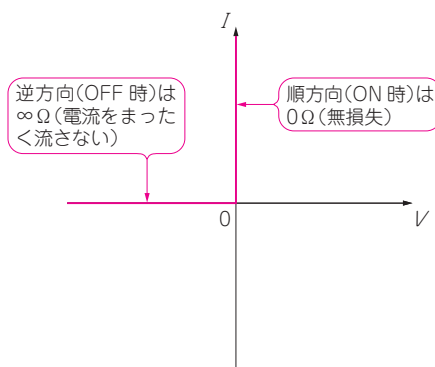


図1 理想ダイオードの電流-電圧特性

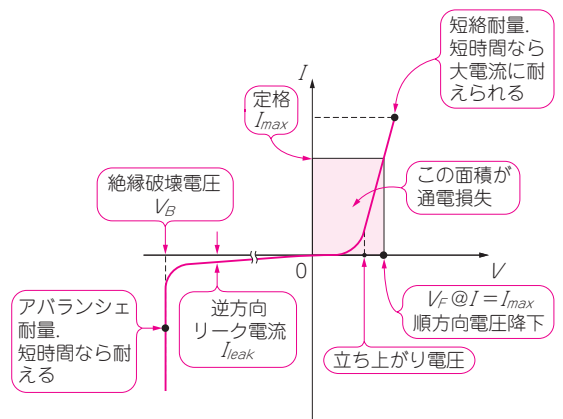


図2 現実のダイオードの電流-電圧特性(シリコンpn接合ダイオード)

たない領域でも理想的ではありません。わずかですがリーク電流が流れます。逆方向リークがあると、OFFの状態でも印加電圧×リーク電流ぶんの損失がデバイスで発生してしまいます。これをオフ損失と呼びます。

一般に、データシートではある逆方向電圧に対して、逆方向リーク電流の最大値が保証されています。

▶ 温度特性

パワー・デバイスの特性は温度に大きく依存します。一般に、温度上昇とともに逆方向リーク電流は増大します。動作可能温度は、素子の長期的寿命(一般に温度が高くなると劣化速度が急速に増大する)、パッケージの耐熱性など、さまざまな要因により決まります。多くの場合は、逆方向リーク電流が大きくなりすぎて、もはやOFF状態のデバイスをOFFと見なせないということが大きな要因となっています。

オン抵抗の温度依存性に関しては、デバイスの種類により大きく異なります。MOSFETやショットキー・バリア・ダイオードでは、半導体の直列抵抗が支配的であり、半導体のキャリア移動度は温度上昇とともに低下することから、オン抵抗は温度上昇とともに増大します。

オン抵抗の増大はデメリットですが、複数素子を並列にして大電流を流す場合は、オン抵抗の温度依存性による負帰還作用で、それぞれの素子に流れる電流が平均化されるのでメリットとなります。

▶ 過渡特性

過渡的な特性としては、スイッチング損失を決めるスイッチング特性が最も重要ですが、これは後ほど述べたいと思います。

素子を壊さないという意味で重要なのは、アバランシェ耐性と短絡耐性です。

アバランシェ耐性は、絶縁破壊が生じるような電圧が加わったとしても、あるエネルギーの範囲なら素子の劣化や破壊を起こさずに使えるという耐性です。一般には、パルス・エネルギー(電圧×電流×時間、単位はジュール [J])で示されます。

パワー・デバイスでは耐圧を上げるとオン抵抗が大きくなってしまいますので、オン抵抗を低減するために、耐圧を下げ、スイッチング時に瞬間的にかかる高電圧は、図2の絶縁破壊の部分で吸収させるような回路設計をする場合に重要な指標です。また、装置のトラブルにより瞬間的に高電圧が生じてもデバイスが破壊しないという安全マージンとも位置づけられます。

短絡耐性は、ケーブルの短絡などでON状態で定格電流を越える大電流が瞬間的に流れた場合、何Aで何μs耐えられるかというものです。安全回路は短絡を検知して、この時間以内に作動して電流を遮断する必要があります。

スイッチング・デバイスの性能指標

スイッチング・デバイスであるMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)やIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の場合も、ダイオードと基本的な考えかたは同じです。

● MOSFET

MOSFETの場合の I_D-V_{DS} 特性を図3に示します。

オン抵抗はON時の傾きですが、これはゲート電圧により変化します。ゲート電圧が大きいほど、MOS界面に誘起されるキャリアが増えるので抵抗は小さくなります。しかし、ゲート電圧を大きくしすぎるとMOS酸化膜の劣化につながるため、印加可能なゲート電圧の最大値が指定されています。

MOSFETの場合の耐圧は、ゲートがOFFのときにどのくらいの電圧を遮断できるかということになります。

● IGBT

IGBTの I_C-V_{CE} 特性を図4に示します。

IGBTの場合はダイオードと同じように立ち上がり電圧がありますので、オン抵抗というよりは、電流を指定してそのときの電圧降下でオン損失を議論することになります。

IGBTは高耐圧と低オン抵抗を両立させた大変優れた素子ですが、スイッチング速度がMOSFETに比べると遅いという欠点と、電流が小さい領域では見かけのオン抵抗が大きくなりオン損失の割合が増大してしまうという弱点があります。

200~300V以下ではMOSFETのオン抵抗は良好な

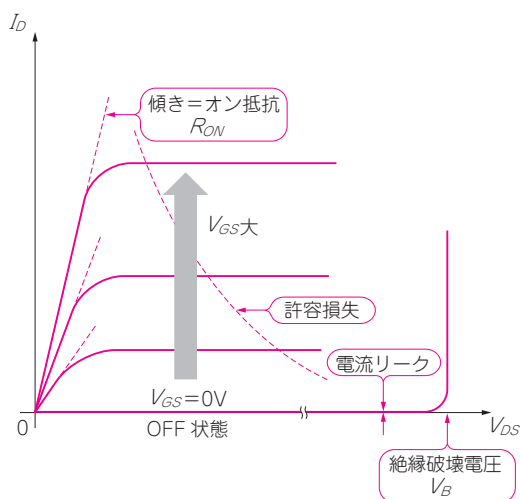


図3 MOSFETの I_D-V_{DS} 特性

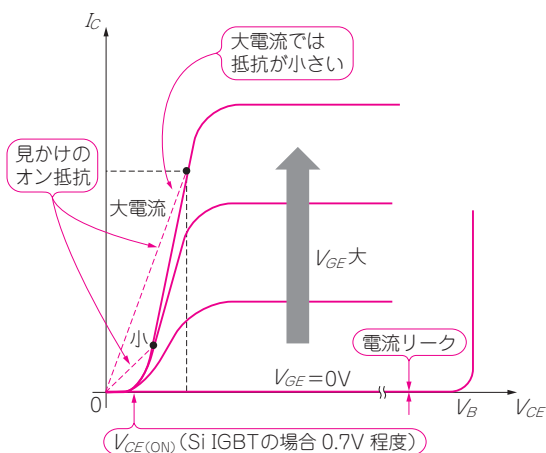


図4 IGBTの I_C - V_{CE} 特性

のでMOSFETが主に使われますが、それ以上の電圧では、スイッチング周波数や使用する電流値などを勘案してIGBTかMOSFETかを選択することになります。

簡単なパワー回路での性能指標の重要性の確認

図5にDCモータの駆動を行う基本回路を示します。これは、4個のトランジスタ(図ではMOSFET)のON/OFFの組み合わせで、図6に示すようにモータの停止、順回転、逆回転、制動を行うものです。回路の形状からHブリッジ回路と呼ばれます。

この回路を例にして、具体的にパワー・デバイスの性能指標の意味について考えてみましょう。

● 損失

MOSFETのON/OFFの組み合わせにもよりますが、MOSFETには電源電圧が定期的に加わります。例えば、図6(b)では、左下のMOSFETは電源電圧に対して確実にOFFにならなければなりません。MOSFETの耐圧は、電源電圧より十分に大きい必要があります。

モータ停止の状態では、すべてのMOSFETはOFFです。このときの電力消費は理想的にはゼロですが、前述のようにOFF状態のMOSFETにはわずかなリーク電流が流れます。電源電圧×漏れ電流の損失が、定常オフ損失として発生します。使用する温度範囲で、MOSFETのOFF時の漏れ電流が十分に小さいことが重要となってきます(通常の場合、定常オフ損失は十分に小さいはずです)。

モータを動かす場合、二つのMOSFETがON状態となり、モータに大きな電流が流れます。MOSFETのオン抵抗 $R_{DS(ON)}$ に応じて、 $2 \times R_{DS(ON)} \times I^2$ の定常オン損失が発生します。大電流であればあるほど、オン抵抗の低減は重要になってきます。

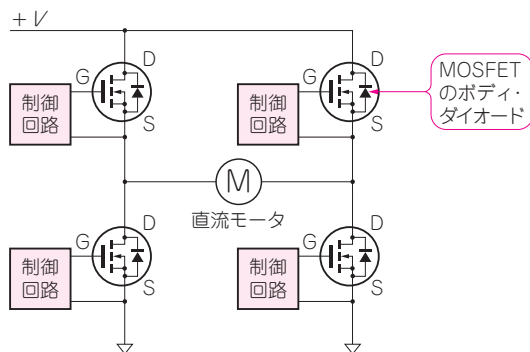


図5 DCモータの駆動を行うHブリッジ回路

● 発熱

MOSFETにおける損失は熱となり、MOSFETの温度を上昇させます。MOSFETの動作最高温度内に収まるように、放熱の設計が必要となります。

動作可能温度が高ければ、放熱設計が容易になり、放熱フィンの小型化、場合によっては省略や、回路を密集してコンパクトに設計できるなどのメリットが生じます。

一般的なMOSFETでは150℃程度が動作可能最高温度となっています。この温度はパッケージの温度ではなく、パッケージ内部の半導体チップ(pn接合)の温度ですので注意が必要です。

● ノーマリONとノーマリOFF

MOSFETにはノーマリONとノーマリOFFの種別があります。 $V_{GS} = 0V$ のときにON状態になっているものをノーマリON(ディプリーション型)、 V_{GS} に閾値電圧以上を印加したときにはじめてONになるものをノーマリOFF(エンハンスメント型)と呼びます。

制御回路のマイコンの停止や、制御回路電源のトラブルで制御回路が停止してすべてのMOSFETの V_{GS} が0Vになった場合、図5の回路でノーマリONのデバイスを使用していると電源が短絡されてしまい大問題です。したがって、パワー・デバイスではノーマリOFFのデバイスが主流となっています。

● スイッチングと逆起電力

これまで、定常状態を考えましたが、モータを止めるときにはONからOFFのスイッチング動作が生じます。モータやソレノイドなどの誘導性負荷の場合、スイッチOFF時にインダクタには逆起電力が発生します。逆起電力は電流を切る速度 dI/dt に比例しますので、ゲート電圧を急峻に変化させるほど大きな起電力が発生します [図7(a), (b)]。

MOSFETに電源電圧+逆起電力の耐圧をもたせることは大変ですので、電流をダイオードにより逃がし

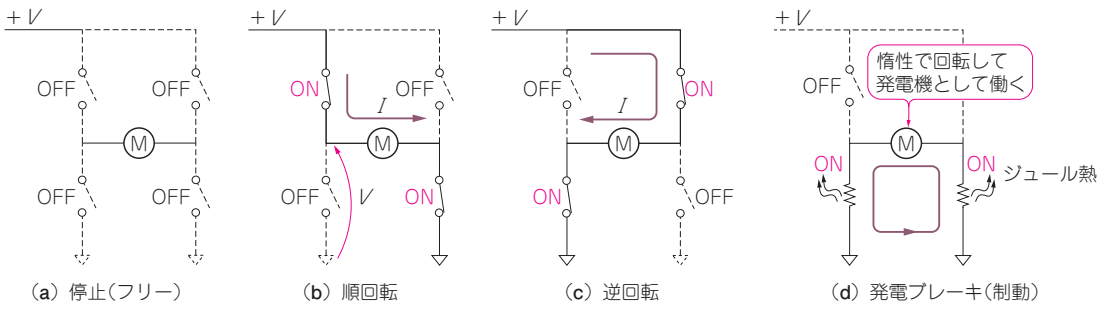


図6 Hブリッジ回路の四つの動作状態

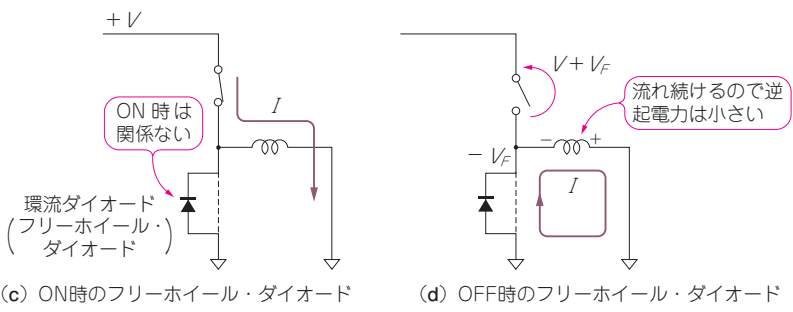
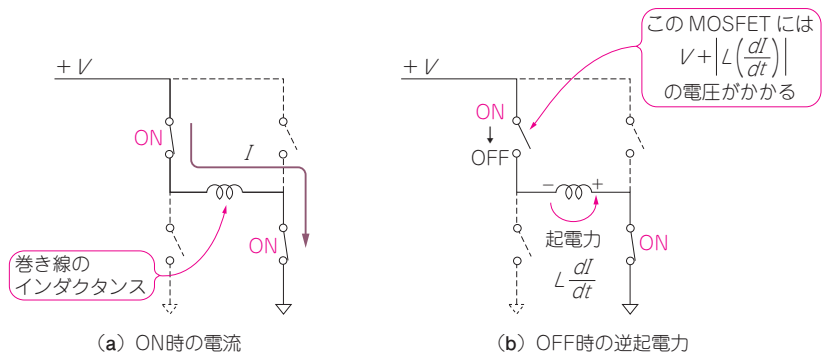


図7 Hブリッジのスイッチング動作

てやる必要があります。MOSFETの場合には、デバイスの構造上、ボディ・ダイオード(body diode)というpn接合ダイオードが付随します。このダイオードが電流を逃がす還流ダイオードの役割を果たしてくれます [図7(c), (d)]。

MOSFETのデータシートにはボディ・ダイオードの特性が併記されています。ただし、ボディ・ダイオードの性能が十分でない場合には、別途ダイオードを付加する必要があります。

一方、IGBTの場合にはボディ・ダイオードはありませんので、外部にダイオードを別途付加する必要が

あります。

**スイッチング損失が重要な
パワー回路の例**

先ほどはスイッチングを無視できるような例を挙げましたが、スイッチング電源やインバータなど、スイッチングを頻繁(数千Hz~数百kHz)に行うパワー・エレクトロニクス回路では、定常損失に加えてスイッチング損失が重要となります。

スイッチングの波形を元にして、スイッチング損失について考えてみましょう。

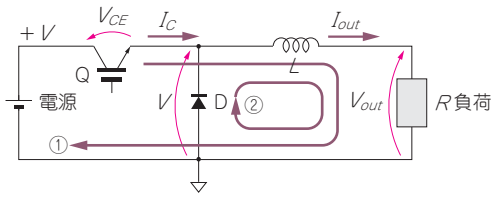


図8 降圧チョップ回路

● 降圧チョップの例

図8に降圧チョップの回路図を示します。降圧チョップはDC-DCコンバータの基本回路の一つです。トランジスタをONにし続けると、負荷には電源電圧がそのまま供給されます。トランジスタをON/OFFさせ、電源からの電流を断続させると、ONの時間の割合に応じて任意の中間的な電圧を供給することができます。

降圧チョップの動作を図8の回路図と図9の電流/電圧波形を用いて説明します。

トランジスタがONの状態では、図8の①で示す経路で電流が流れます。インダクタがありますので、電流は急には増えず、時間とともに増加することになります。電源から負荷に電力が供給されますが、同時にインダクタに磁気エネルギーが蓄えられます。トランジスタがOFFになると、インダクタに蓄えられたエネルギーにより電流が流れ続けることになります。トランジスタがOFFなので、ダイオードを通して図8の②の経路で電流が流れます。インダクタの磁気エネルギーが消費されるとともに電流が低下します。

トランジスタのON/OFFの割合(デューティ比)で、負荷に流れる電流値(結果として電圧)が制御されます。図8のトランジスタとダイオードで矩形波を発生させ、それをインダクタと負荷で形成されるLRフィルタで平滑化しているとも言えます。ON/OFFの周波数をLRのカットオフ周波数より十分に高くすることで、ほぼ直流とみなせる出力波形が得られます。

トランジスタに注目すると、スイッチングが頻繁に行われますので、トランジスタについては、定常損失に加えて、スイッチング損失についての検討が必要になってきます。

トランジスタ、ダイオードの特性が理想的な場合の回路の動作を図10に示します。ONからOFF、OFFからONに移移するときに、素子での損失が発生しますがわずかです。

しかし、実際にはpn接合ダイオードであれば、ONからOFFになるときは少数キャリアの蓄積のために逆回復特性で一時的に電流が流れます。トランジスタがIGBTであれば、キャリア蓄積時間のためOFFからONになるときに、 V_{CE} がすぐに $V_{CE(ON)}$ になりません。また、ONからOFFになるときに、蓄積した

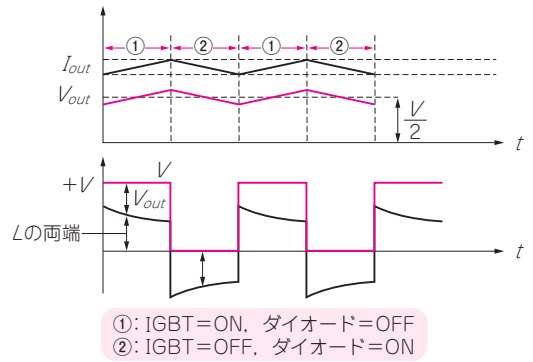


図9 降圧チョップのトランジスタの電流/電圧波形

少数キャリアのためにすぐにはゼロにならず、テイル電流がしばらく流れます。

すると電流電圧波形は図11のようになります。OFFからON、ONからOFFになるときに大きなスイッチング損失が生じます。場合によっては通電損失よりもスイッチング損失のほうが大きなこともあります。

● スwitchング損失を低減する方法

スイッチング損失低減のためには、いくつか方法があります。

一つは、高速なデバイスを使用することです。IGBTをMOSFET、pn接合ダイオードをショットキー・バリア・ダイオード(Schottky barrier diode: SBD)にすればスイッチング速度は大幅に向上します。しかし、MOSFETやSBDの場合には少数キャリアによる伝導度変調によるオン抵抗の低減がないので、オン抵抗が増大して、今度は通電損失が増大してしまいます。

別の方法としては、スイッチング周波数を下げることが考えられます。スイッチング損失は、スイッチングの回数、すなわち周波数に比例するからです。ただし、その場合は、平滑化のためのインダクタやキャパシタを大きなものにしなければなりません。コイルやコンデンサはパワー・エレクトロニクスで装置の中で大きな体積、価格を占めており、システム全体のサイズや価格がアップしてしまいます。

このトレードオフの関係は、パワー・エレクトロニクス技術者を悩ませてきたのですが、これはデバイスとしてSiパワー・デバイスのみを考えた場合のことです。

ワイドギャップ半導体を利用すれば、SiのIGBT並みか、それ以上の低オン抵抗をMOSFETで実現でき、SiのPINダイオード並みのことをショットキー・バリア・ダイオードで実現することができます。導通損失とスイッチング損失の両方を大きく低減することができます。

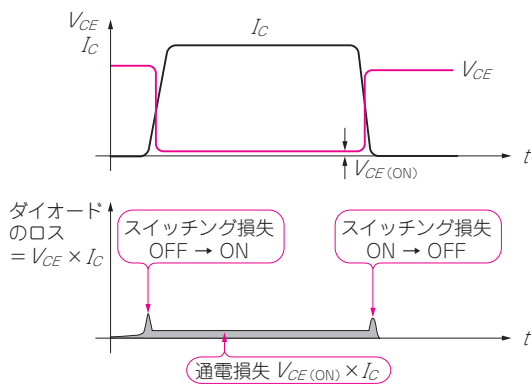


図10 理想的な場合の電流/電圧波形とスイッチング損失

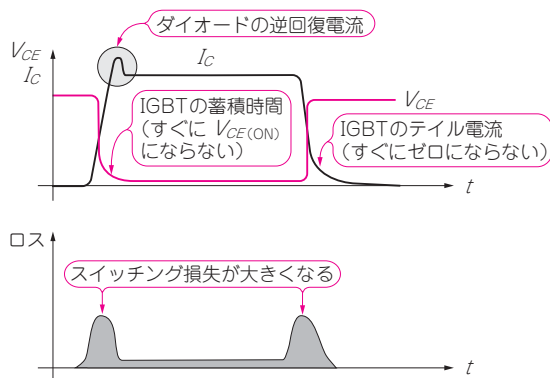


図11 現実の場合の電流/電圧波形とスイッチング損失

コラム スwitchングと増幅の違い

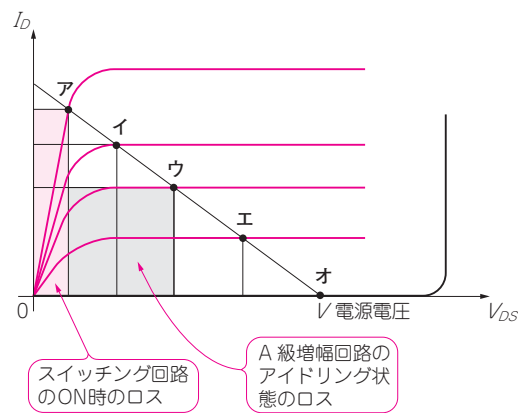
同じMOSFETでも、スイッチングで使うか増幅で使うかでは、使うところが大きく異なります。

トランジスタの I_D-V_D 特性を図Aに示します。スイッチング・デバイスでは、ONかOFFかで使いますので、動作点はアとオとなります。原点とア、原点とオで形成される長方形がデバイスにおける電力損失です。当然ながら、ほとんど損失が生じないところで使用しています。

この損失を最小にすべく、オン抵抗の低減、逆方向リーク電流の低減を目指したデバイスの研究開発が行われています。

一方、増幅で使う場合には、最も信号を忠実に増幅するA級増幅であれば、ウを中心にイ〜エの範囲を使用することになります。原点と動作点が作る長方形の面積は大きく、常にデバイスで大きな電力

損失が発生する使いかたとなります。損失という犠牲によって、忠実な信号増幅を実現しているわけです。



図A スwitchングと増幅でのロスの相違

見本

ISBN978-4-7898-4839-8

C3055 ¥2200E

CQ出版社

定価：本体2,200円（税別）



9784789848398



1923055022003

このPDFは、CQ出版社発売の「グリーン・エレクトロニクス No.9」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSPZ201208.htm>

購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>



グリーン・エレクトロニクス

Green Electronics Series