

第1章 インフィニオンのCoolMOS™

本文書では、インフィニオンが市場をリードしてきたパワーデバイスについて、選び方や使い方のポイントを解説します。まずは、インフィニオンを代表する高効率・高耐压MOSFET 製品の一つであるCoolMOS™ についてご紹介します。

Siの理論限界を超えたCoolMOS™

CoolMOS™ は、インフィニオンが世界で初めて量産化したSuper Junction (SJ) 構造のMOSFET です。高耐压と低オン抵抗を両立し、サーバや通信機器、産業機器の電源、ソーラ・インバータやEV/HEV、最近ではLED 照明や薄型TV などの家電機器、各種ACアダプタまで幅広く使われています。

産業機器や家電機器で最も多く用いられる600V 耐压を中心に、現在は500V ～ 900V 耐压を製品化しています。

MOSFET は、1980 ～ 1990 年代に低オン抵抗化、高速化、高信頼化などの改良が進められ、代表的なパワーデバイスとして発展してきました。ただし、シンプルな構造をもつ従来型のMOSFET は、耐压がnエピ層のドリフト抵抗で決まり、高耐压化と低オン抵抗化には相反する関係があります。1990 年代後半には、耐压とオン抵抗の関係がSi 半導体の理論限界（いわゆるシリコン・リミット）に近づき、さらなる高性能化が難しくなってきました。

SJ 構造は、n 型領域とp 型領域を交互に並べることによって、従来のように逆電圧を縦方向だけで受けるのではなく、縦方向と横方向に分散できます。そのため、耐压を保ちながらn 型の不純物濃度を高め、大幅な低オン抵抗化を可能にしています。そのかわり、製造プロセスが複雑になるだけでなく、n 型とp 型の不純物濃度を高精度に制御しなければならないなど、量産化には大きな困難がありました。

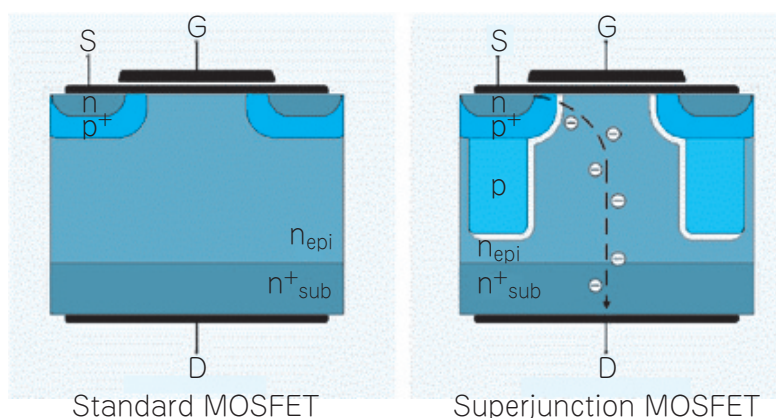


図1. 従来のMOSFETとSJ型MOSFET

インフィニオン（当時はSiemensの半導体部門）ではそれらの困難を克服して、1998 年に第1 世代の製品S5 シリーズを発売しました。S5 は、600V 耐压と低オン抵抗を両立した画期的な製品でしたが、スイッチング損失の低減は十分ではありませんでした。インフィニオンではCoolMOS™ のさらなる改良を進め、2000年にC2シリーズ（第2 世代）、2001 年にC3シリーズ（第3 世代）を発表しました。

このC3 シリーズは、その後の高効率・高耐圧MOSFET の性能の指標となった製品です。耐圧が上がってもオン抵抗は高くないので、600V 耐圧ではSi の理論限界をはるかに凌ぐ低オン抵抗を実現しています。

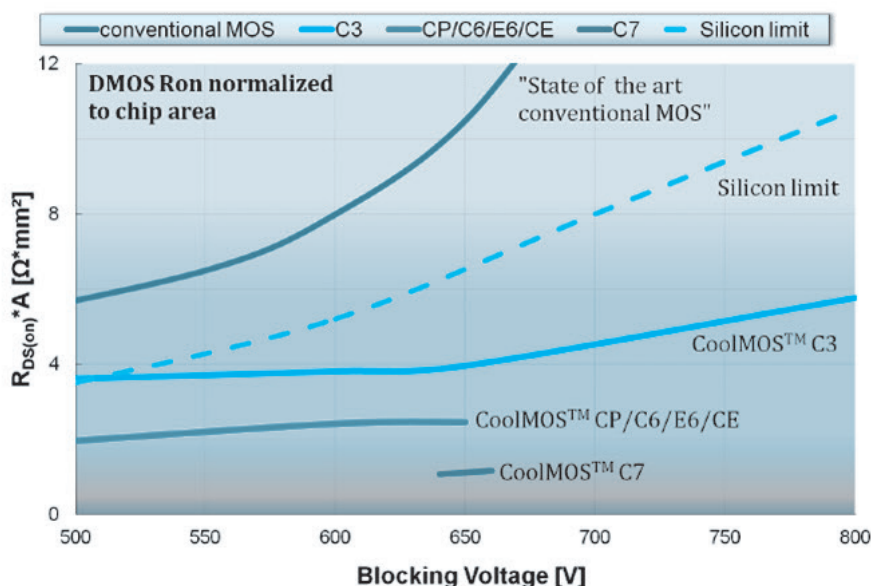


図2. 従来型MOSFET、C3シリーズ、Si理論限界の性能比較図

CoolMOS™ のさらなる発展

CoolMOS™ は高耐圧と高効率を両立した高性能MOSFET ですが、SJ 構造のためコストが高く、また特性にも扱いにくい点があったのは確かです。そこで、インフィニオンは、その後のCoolMOS™ 製品では、最高性能を追求したハイエンド製品（Power DensityカテゴリとBest in Class カテゴリ）と、使いやすさや低コストを追求した製品（Price/Performance カテゴリ）の二つの方向で製品開発を進めています。

最高性能を追求した製品としては、2005 年にCP シリーズ（第5 世代）、2013 年にC7 シリーズ（第7 世代）を発売しています。いずれも、従来のシリーズに比べて単位面積当たりのオン抵抗をさらに1/2 に低減するなど、画期的な高性能化を実現しています。

一方、使いやすさや低コストを追求した製品としては、2004 年に発売したCFDシリーズ、2009 年に発売したC6/E6シリーズ（第6世代）、2011年に発売したCFD2シリーズ、2012年に発売したCEシリーズなどがあります。

さらに、CPの高性能とC6の使いやすさの両立を目指したP6 シリーズなど、次々に新製品が投入されCoolMOS™ は産業機器から民生機器まで幅広い分野で世の中の省電力化に大きく貢献しています。

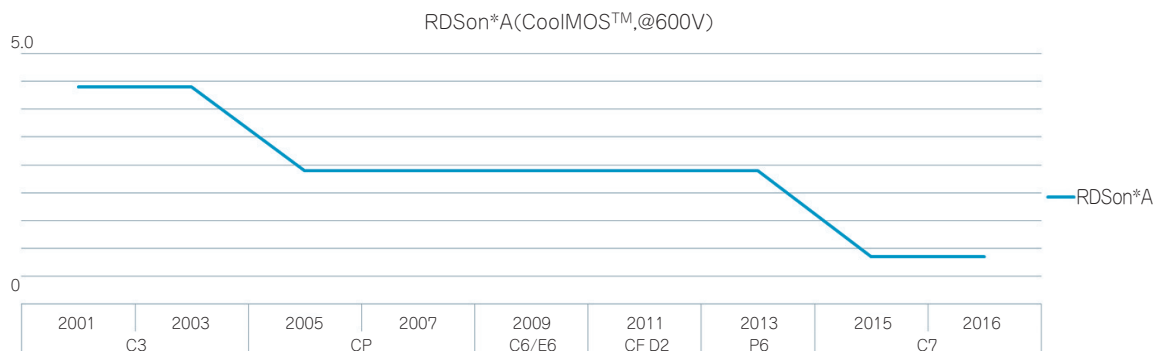


図3. オン抵抗を低減し画期的な高性能化を実現

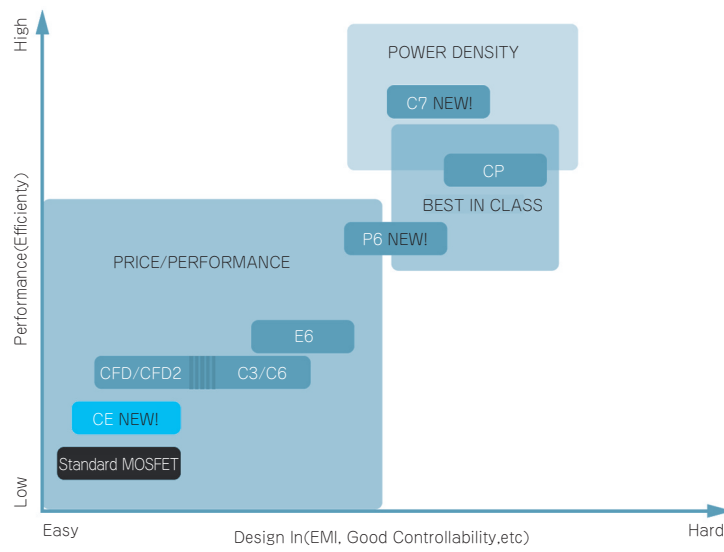


図4. CoolMOS™ 各シリーズの製品位置づけ

第2章 常に最高を目指すハイエンドのCoolMOS™

1998年に登場して以来、インフィニオンのCoolMOS™は、シリコンの限界を超える高効率MOSFETとして市場をリードしてきました。そして、最高性能を追求し続けるハイエンド製品と、使いやすさや低コストを重視した製品を世の中に送り出してきました。今回は、ハイエンド製品であるPower Densityカテゴリ、Best in ClassカテゴリのCoolMOS™について特徴や使い方をご紹介します。

クラス最高性能を目指してきたハイエンド製品

CoolMOS™は、Super Junction (SJ) の採用で高耐圧と低オン抵抗を両立し、シリコンの理論的限界を超える画期的な超高効率を実現した製品です。インフィニオンでは、常に時代の先端をゆく最高性能を追求した製品を作ってきました。基本的な考え方は、オン抵抗 $R_{DS(on)}$ とゲートチャージ Q_g を徹底して低減することにより、導通損失とスイッチング損失の両方を大幅に減らすことです。

たとえば、単位面積あたりの $R_{DS(on)}$ は、2001年発表のC3シリーズでも $39\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ ときわめて小さい値ですが、2005年発表のCPシリーズでは $25\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ 、さらに2013年発表のC7シリーズでは $10\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ と、新しいハイエンド製品の発表ごとにさらに半減させてきました。それによって導通損失は大きく低減され、同じパッケージならきわめて高効率、低発熱にできますし、また同じ特性の回路をより小型パッケージ、高密度実装で実現することができます。

同じように、 Q_g についてもC3からCP、C7へと進むごとに、大幅な低減を実現してきました。それによってスイッチング損失も大きく低減され、同じ周波数ならきわめて高効率、低発熱にできますし、また周波数を高めることによって受動部品の小型化や、高密度実装を実現できます。

このように最高性能を追求することによって、C3、CP、C7はそれぞれの時代のシリコンMOSFETの最高性能を大きく書き換え、新しい性能基準を打ち立てた製品となってきました。

なお、C3は2001年の発売当初は最高性能のシリーズでしたが、その後さらに高性能のCPや、C3と同等の性能でより使いやすさをアップしたC6/E6シリーズが登場したため、現在ではハイエンドのシリーズとは呼べません。

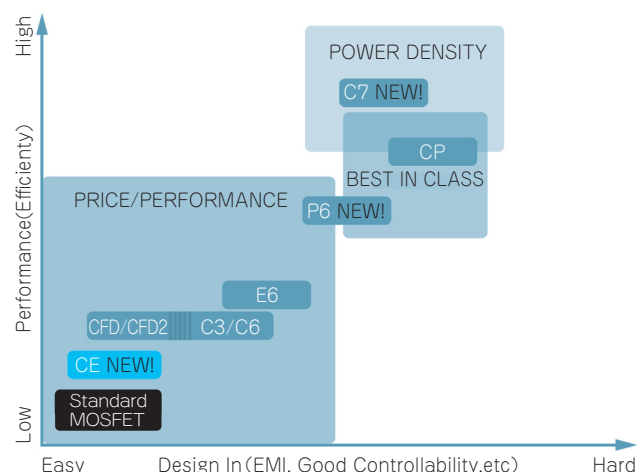


図1. CoolMOS™ 各シリーズ製品の位置づけ

用途はやや限られ、使い方にも難しい面がある

ただし、そのためにこれらのハイエンド製品は用途が限定され、使い方にも難しい面があることは否定できません。

たとえば、スイッチング特性がきわめて急峻なため、連続モード PFC やブーストコンバータに最適ですが、ソフトスイッチングが要求される用途には適しません。また、放射ノイズが大きいことから、特に高速スイッチングを必要としない用途では使いにくさがあります。さらに、ボディ・ダイオードの特性が低く、ダイオードを使いたい用途にも適していません。(600V C7 を除く)

これらの点で、ハイエンド製品の C3、CP、C7 は、用途や目的がぴったり合えば最高の強みを発揮する製品ですが、万能の強みをもつわけではありません。その点を理解して使い分けることが大切です。

高性能と万能性を追求したP6

ハイエンド製品の主力がC3（第3世代）からCP（第5世代）に代わった後、C3 の性能を生かしつつ、より使いやすさを指向したC6、E6など第6 世代のシリーズが作られてきました。これらは、Price/Performanceカテゴリの製品として、次章で紹介します。

その中で、2013 年に発表されたP6は、CPの性能とC6/E6の使いやすさを両立するCoolMOS™の最新シリーズの一つで、Best in Class カテゴリにもPrice/Performanceカテゴリにも数えられるものです。

ハードスイッチングからソフトスイッチングまで、PFCからPWMまで、高速から低速、高負荷から低負荷など幅広い条件で、誰にでも使いやすく簡単に高効率を実現できるシリーズとなっています。

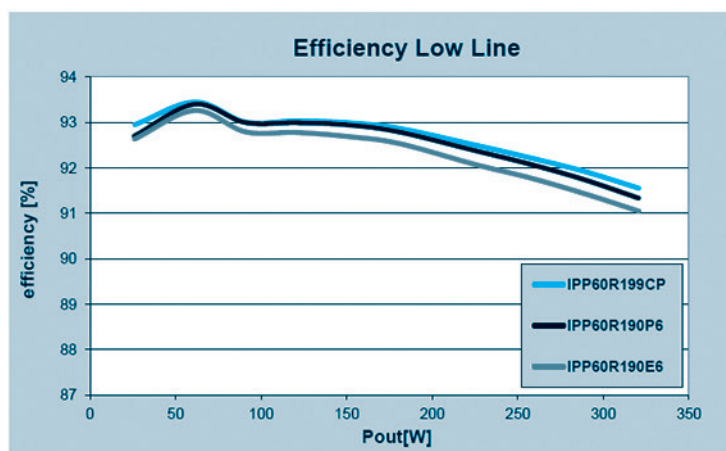


図2. P6シリーズの効率 P6はE6より高効率を得られ、CPに匹敵する

シリコンの最高性能を大きく更新したC7シリーズ

2013年に発表したC7シリーズは、製造プロセスを革新することによって、再びシリコンの最高性能を大きく更新した製品です。きわめて高い電力密度が得られることから、新しいPower Densityカテゴリに位置付けています。

たとえば、耐圧650V C7シリーズでは、単位面積あたりのオン抵抗 ($R_{DS(on)}$) を $10\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ とCPの1/2以下に、ゲートチャージ (Q_g) を 93nC とCPの2/3以下に、出力キャパシタンス蓄積エネルギー (E_{OSS}) を $12.6\mu\text{J}$ とCPの1/2以下に抑え、シリコンMOSFETの新しい性能基準を打ち立てました。この性能は次世代GaN製品にも匹敵し、コストパフォーマンスを考えれば、当分はシリコンMOSFETの時代が続くと考えられます。

また、コンピュータ電源ユニットの電力効率規格80PLUSにおいて、最上級のチタンレベルを実現可能な超高効

率の製品と言えます。サーバ/基地局の高性能電源、ソーラコンバータなどに最適です。

C7の高速性をさらに生かすため、従来の3ピンTO-247 パッケージに加えて、4ピンTO-247-4 パッケージも追加しました。これは、パッケージ内部のソース部から2本のソース端子を出して、ケルビン接続を可能にするものです。シグナルグラウンドとパワーグラウンドを分離することにより、ソース～ GND配線の寄生インダクタンスを効果的に低減し、より高速で高効率の実装を実現できます。

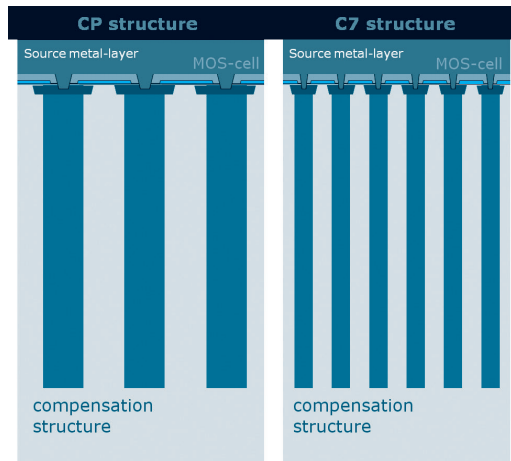


図3. C7シリーズとCPシリーズの構造

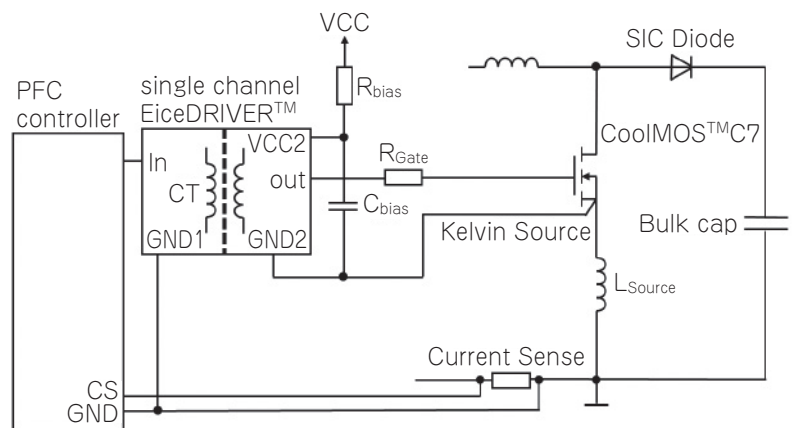


図4. ケルビン接続

今後、インフィニオンの最新シリーズでは、最高性能を追求したC7、高性能と万能性の両立を追求したP6をハイエンド製品の主力と位置付けていきます。

第3章 使いやすさや低コストを追求した CoolMOS™ 製品

インフィニオンの CoolMOS™ は、低オン抵抗と高速スイッチングを徹底して低減して、クラス最高の性能をもつ MOSFET を実現してきました。それらのハイエンド製品は、立ち上がり急峻で放射ノイズが大きいことや、ボディ・ダイオードの逆回復特性が低いなどの点で、用途や使い方に注意が必要でした。そこで、インフィニオンではハイエンド製品に加えて、使いやすさや低コストを重視した Price/Performance カテゴリの製品もラインアップしています。本章では、これらについて特徴や使い方をご紹介します。

ボディ・ダイオードを高速化した CFD、CFD2

使いやすさを重視した CoolMOS™ として最初に登場した製品は、ボディ・ダイオードを高速化した CFD です。MOSFET は、構造的にドレイン・ソース間にボディ・ダイオードが形成されます。このボディ・ダイオードは、ハーフ・ブリッジ構成やフル・ブリッジ構成のソフト・スイッチング回路ではフリーホイール・ダイオードとして利用できますが、MOSFET に比べて低速という問題があります。

ボディ・ダイオードでは、ターン・オフ時の逆回復電荷 Q_{rr} が大きいと、逆回復時間 t_{rr} が長く、ピーク逆回復電流 I_{rrm} も大きくなってしまいます。フリーホイール・ダイオードとして利用した場合、スイッチング時の損失、素子へのダメージ、発生する放射ノイズが大きくなります。

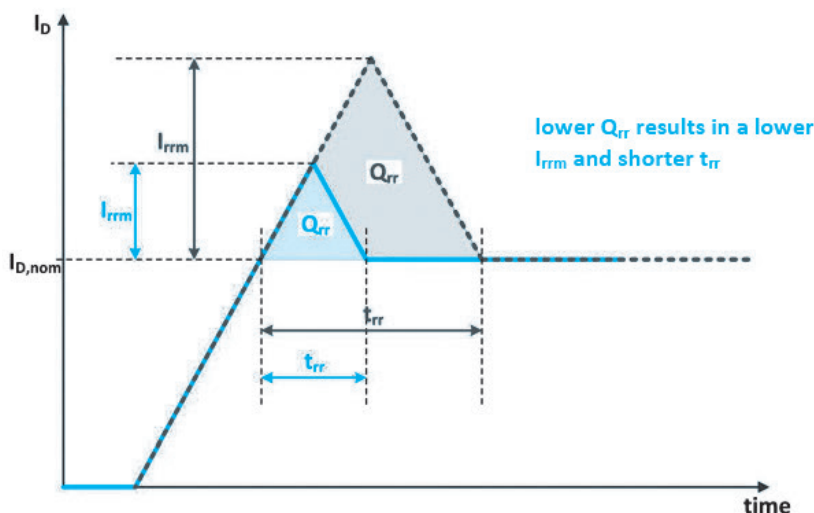


図1. 逆回復特性

2001 年に発表された C3 は、当時としては画期的な低オン抵抗と高速スイッチングが特徴で、SJ (Super Junction) の良さを世の中に広めた製品でした。ただし、ボディ・ダイオードは低速だったため、ソフトスイッチングの用途に使用するには、高速リカバリ可能な外付けダイオードの追加が必要でした。

2004 年に発表された CFD は、C3 をベースにボディ・ダイオードを高速化した製品で、ソフトスイッチングの

用途に使いやすい製品となっています。

2009 年に C3 の改良・後継製品として発表された C6/E6 では、ボディ・ダイオードの特性も改善されて、ハードスイッチングにもソフトスイッチングにも使用できます。ただし、さらに高速なボディ・ダイオードを求めるニーズもありました。

2011 年に発表された CFD2 は、C6/E6 をベースにボディ・ダイオードを高速化した製品です。CFD の改良・後継製品とも呼べます。

CFD や CFD2 は、ZVS 位相シフト・フル・ブリッジや、LLC 共振ハーフ・ブリッジのようなソフトスイッチング方式のコンバータ回路に適しています。

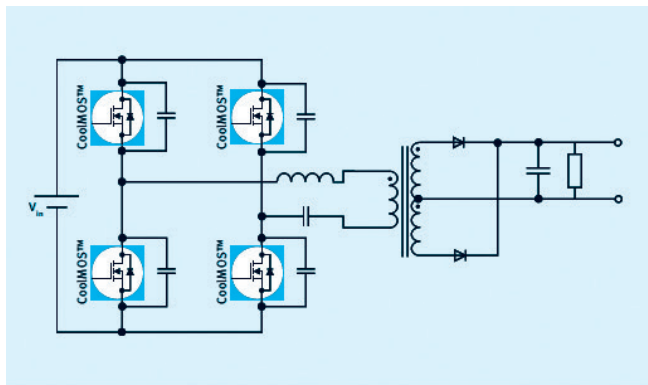


図2. ソフト・スイッチング回路の例：ZVS位相シフト・フル・ブリッジ

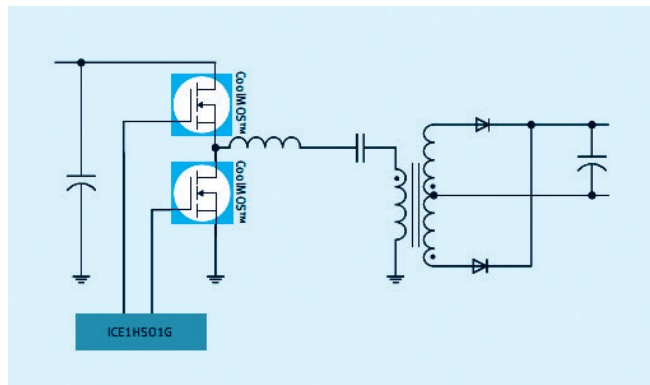


図3. ソフト・スイッチング回路の例：LLC共振ハーフ・ブリッジ

さらに、従来の CoolMOS™ では耐压 600V が標準的だったのに対して、CFD2 は耐压 650V を標準として余裕をもたせています。安全性のマーゲンが要求される用途、たとえばソーラ・インバータ、高圧 DC-DC コンバータなどの用途に広く用いられています。

また、CFD2 をベースに車載向け製品の CFDA も作られています。CFDA は、HID (高輝度放電) ランプのバラスト、EV/HEV のチャージャなどに広く用いられています。

C3の置き換え、後継をねらったC6/E6

2005 年に発表された CP は、クラス最高の超低オン抵抗、超高速スイッチングを可能にしたハイエンド製品ですが、C3 よりさらに di/dt 、 dv/dt が急峻になるなど、使い方も難しくなっています。そのため、CP の登場後も C3 は使い続けられてきました。

2009 年に発表された C6/E6 は、C3 の性能と用途をカバーし、さらに使いやすさと低コストを追及した後継製品です。内蔵ゲート抵抗を適正化することによって di/dt 、 dv/dt を最適化したことが大きな特徴です。動作の安定化や放射ノイズの低減により、回路設計や基板設計を容易にしています。

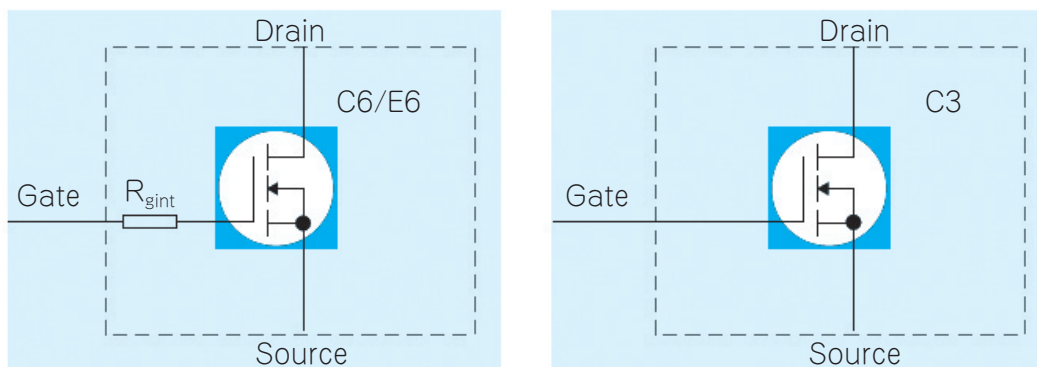


図4. C6/E6とC3の内部構造の比較：C6/E6は最適化されたゲート抵抗 R_{gint} を内蔵

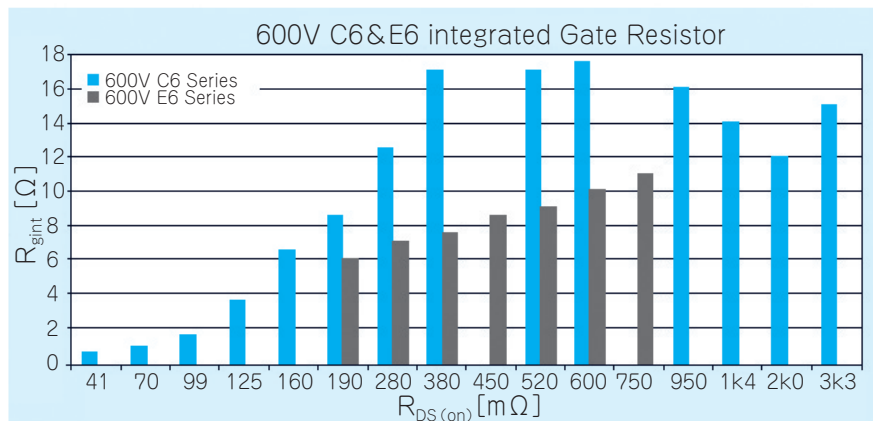


図5. C6とE6の内蔵ゲート抵抗の値

また、ボディ・ダイオードの特性を改善したこと、低負荷時の効率を向上させたことなども C6/E6 の特徴です。

C6 と E6 は MOSFET 部分は同じですが、内蔵ゲート抵抗の値に違いがあります。E6 は特に DCM(不連続モード) 向けとして、内蔵ゲート抵抗の値を小さくしています。

C6/E6 は、製造プロセスの改良で C3 より低コストにできます。ハードスイッチングからソフトスイッチングまで幅広い用途に使いやすい特性をもち、Price/Performance カテゴリーの中心的な製品と言えるでしょう。

CPの高性能とC6/E6の使いやすさを両立したP6

P6 については前章で紹介しましたが、CP の高性能と C6/E6 の使いやすさを両立した CoolMOS™ の最新シリーズの一つです。CP の新世代版に位置付けられ、Best in Class カテゴリーにも Price/Performance カテゴリーにも分類できます。

CoolMOS™ の用途を低コスト機器に拡大したCE

CE は、これまで以上に使いやすさと低コストを追求した CoolMOS™ の最新シリーズの一つです。

低オン抵抗、高速スイッチング、出力容量の蓄積エネルギー削減など、SJ (Super Junction) の良さはそのまま受け継いでいます。ボディ・ダイオードの耐久性、低負荷時に高効率などの特徴もあり、コスト要求の厳しい家電機器、PC 用電源モジュール、照明機器などに最適です。耐圧は 500V、600V、650V、800V と幅広いラインナップを用意し、AC100V ~ 240V の PFC やフライバック回路に好適です。

この CE の登場によって、CoolMOS™ の用途は、従来スタンダード MOSFET を用いていた低コスト機器にまで大きく拡大したと言えます。

本書では3章にわたって、インフィニオンの CoolMOS™ について紹介してきました。ハイエンドからローエンドまでさまざまな製品がラインナップされていますので、それぞれの特徴を理解してぜひ活用いただきたいと思います。

Published by
Infineon Technologies

© 2016 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.

Please note!

THIS DOCUMENT IS FOR INFORMATION PURPOSES ONLY AND ANY INFORMATION GIVEN HEREIN SHALL IN NO EVENT BE REGARDED AS A WARRANTY, GUARANTEE OR DESCRIPTION OF ANY FUNCTIONALITY, CONDITIONS AND/OR QUALITY OF OUR PRODUCTS OR ANY SUITABILITY FOR A PARTICULAR PURPOSE. WITH REGARD TO THE TECHNICAL SPECIFICATIONS OF OUR PRODUCTS, WE KINDLY ASK YOU TO REFER TO THE RELEVANT PRODUCT DATA SHEETS PROVIDED BY US. OUR CUSTOMERS AND THEIR TECHNICAL DEPARTMENTS ARE REQUIRED TO EVALUATE THE SUITABILITY OF OUR PRODUCTS FOR THE INTENDED APPLICATION.

WE RESERVE THE RIGHT TO CHANGE THIS DOCUMENT AND/OR THE INFORMATION GIVEN HEREIN AT ANY TIME.

Additional information

For further information on technologies, our products, the application of our products, delivery terms and conditions and/or prices please contact your nearest Infineon Technologies office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements, our products may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies office.

Except as otherwise explicitly approved by us in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, our products may not be used in any life endangering applications, including but not limited to medical, nuclear, military, life critical or any other applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can result in personal injury.