

# アプリケーション・ノート : AN-1070

## D級オーディオ・アンプの特性と MOSFETのパラメータの関係

Jorge Cerezo, International Rectifier

### 目次

|  | ページ |
|--|-----|
| 概要.....                                | 2   |
| はじめに.....                              | 2   |
| D級オーディオ・アンプにおけるMOSFETの主要な電気的パラメータ..... | 2   |
| ドレイン-ソース間降伏電圧: $BV_{DSS}$ .....        | 2   |
| ドレイン-ソース間の静的オン抵抗: $R_{DS(on)}$ .....   | 4   |
| ゲート電荷: $Q_g$ .....                     | 5   |
| ボディ・ダイオードの逆回復電荷: $Q_{rr}$ .....        | 8   |
| 内部ゲート抵抗: $R_{G(int)}$ .....            | 11  |
| MOSFETのパッケージ .....                     | 11  |
| 最大接合部温度: $T_j$ .....                   | 13  |
| IR社のデジタル・オーディオ用MOSFET .....            | 13  |
| まとめ.....                               | 14  |
| 参考文献.....                              | 14  |

このアプリケーション・ノートは、D級オーディオ・アンプの出力段のパワーMOSFETを選択するときに考慮すべき主要パラメータについて考察したものです。主要パラメータとアンプ特性、すなわち効率、EMI (電磁干渉) 雑音、THD (全高調波歪み) の関係も考察しました。さらに、IR社のデジタル・オーディオ用MOSFETの特徴と利点も説明しています。

## 概要

このアプリケーション・ノートでは、D級オーディオ・アンプの出力段に使う MOSFET を選択するときに考慮すべき主要パラメータについて説明します。効率、EMI（電磁干渉）雑音、THD（全高調波歪み）などのアンプ特性と、これらのパラメータとの関係についても考察します。さらに、インターナショナル・レクティファイアー（IR）社のD級オーディオ・アンプ用 MOSFET の特徴と利点についても紹介します。

## はじめに

D級オーディオ・アンプは、パルス幅変調器（スイッチング周波数は数百 kHz）、パワー・ブリッジ回路、低域通過フィルタから構成されるスイッチング・アンプです。この種のアンプは、非常に優れた特性であることが知られています。例えば、電力効率 90% 以上、THD 0.01% 未満、低 EMI 雑音などが挙げられます。D級オーディオ・アンプ理論の詳細については、アプリケーション・ノート "Class D Audio Amplifier Basics"（参考文献 4）を参照してください。

アンプの特性を向上するための重要な要素は、パワー・ブリッジ回路を構成するスイッチです。スイッチの電力損失、遅延時間、電圧と電流の過渡的なスパイク雑音を可能な限り小さくしなければなりません。このためには、電圧降下が小さく、オン/オフのスイッチングが高速で、寄生インダクタンスが小さいスイッチが必要です。

最適なスイッチング・デバイスは、MOSFET です。スイッチング速度が速いからです。MOSFET は多数キャリア・デバイスであり、IGBT（絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ）やバイポーラ・トランジスタ（参考文献 1）など他のデバイスに比べて、高速にスイッチングします。この結果、効率と直線性に優れたアンプを実現できます。

## D級オーディオ・アンプにおける MOSFET の主要な電気的パラメータ

他の用途と同様に、アンプの基本仕様に基づいて MOSFET を選択します。アンプの出力電力や負荷インピーダンス（例えば、8 負荷で 100W）、パワー・ブリッジ回路の構成（フルブリッジまたはハーフブリッジ）、変調係数（80% ~ 90%）といった情報が、MOSFET を選択する前に分かっているなければなりません。

### ドレイン-ソース間降伏電圧: $BV_{DSS}$

アンプの動作電圧によって MOSFET の定格電圧が決まります。ただし、寄生抵抗、寄生インダクタンスによって生じる MOSFET のスイッチング時のピーク電圧や電源変動のように回路設計に関係する要素も考慮しなければなりません。そうしないと、動作中に MOSFET がアバランシェ状態になり、アンプの特性を低下させることになります。

アンプの所望の出力電力、負荷インピーダンス、パワー・ブリッジの回路方式、変調係数、次に示すような回路に関するその他の要因（影響する係数として一般的に 10% ~ 50% が使われる）に対して、最小のドレイン-ソース間降伏電圧（耐圧） $BV_{DSS}$  が選択されます。

$$BV_{DSS \text{ min (full-bridge conf.)}} = \frac{(2 \times P_{OUT} \times P_{LOAD})^{1/2}}{M} + \text{回路に起因するその他の要因}$$

$$BV_{DSS \text{ min (half-bridge conf.)}} = \frac{2 \times (2 \times P_{OUT} \times P_{LOAD})^{1/2}}{M} + \text{回路に起因するその他の要因}$$

D級オーディオ・アンプのさまざまな条件に対する MOSFET の最小の定格電圧の例を表 1 に示します。

| Full-Bridge Configuration |                               |      |      |   |    |     |
|---------------------------|-------------------------------|------|------|---|----|-----|
|                           | BV <sub>DSS</sub> Minimum (V) |      |      | Corresponding IR MOSFET BV <sub>DSS</sub> (V) |    |     |
|                           | Load (Ohms)                   |      |      | Load (Ohms)                                   |    |     |
| Output Power (W)          | 4                             | 6    | 8    | 4   | 6  | 8   |
| 100                       | 36.6                          | 44.8 | 51.8 | 40  | 55 | 55  |
| 150                       | 44.8                          | 54.9 | 63.4 | 55  | 55 | 75  |
| 200                       | 51.8                          | 63.4 | 73.2 | 55  | 75 | 75  |
| 250                       | 57.9                          | 70.9 | 81.8 | 75  | 75 | 100 |

| Half-Bridge Configuration |                               |       |       |   |     |     |
|---------------------------|-------------------------------|-------|-------|---|-----|-----|
|                           | BV <sub>DSS</sub> Minimum (V) |       |       | Corresponding IR MOSFET BV <sub>DSS</sub> (V) |     |     |
|                           | Load (Ohms)                   |       |       | Load (Ohms)                                   |     |     |
| Output Power (W)          | 4                             | 6     | 8     | 4   | 6   | 8   |
| 100                       | 73.2                          | 89.7  | 103.5 | 75  | 100 | 150 |
| 150                       | 89.7                          | 109.8 | 126.8 | 100   | 150 | 150 |
| 200                       | 103.5                         | 126.8 | 146.4 | 150   | 150 | 150 |
| 250                       | 115.7                         | 141.8 | 163.7 | 150   | 150 | 200 |

Note 1. Modulation factor, M = 85%.

Note 2. Additional factor due to circuit related issues = 10%.

表1 D級オーディオ・アンプのさまざまな条件に対する MOSFET の最小の定格電圧

BV<sub>DSS</sub> はオン抵抗（内部抵抗：R<sub>DS(on)</sub>）などの他のパラメータに関係するため、可能な限り小さい BV<sub>DSS</sub> を選ぶことが重要です。BV<sub>DSS</sub> が大きいと、R<sub>DS(on)</sub> が大きくなり、MOSFET の電力損失も大きくなります。従って、これは「回路に関係する要因」の選択として考慮しなければなりません。

<結論> MOSFET の定格電圧はアンプの動作電圧に従って選択してください。動作中にアバランシェ状態にならないようにするため、十分に余裕のある定格電圧を選ぶことも重要です。

### ドレイン-ソース間の静的オン抵抗: $R_{DS(on)}$

アンプの効率は、MOSFET の全電力損失に関係しています。MOSFET の電力損失には、導通損失、スイッチング損失、ゲート電荷損失があります。この電力損失は、MOSFET の接合部の温度  $T_J$  とヒートシンク（冷却器）の大きさに影響します。電力損失が大きいと、 $T_J$  が高くなるため、ヒートシンクも大きくなります。

MOSFET の導通損失は、 $R_{DS(on)}$  に比例します。 $R_{DS(on)}$  はドレイン-ソース間の抵抗で、通常、データシートでは、標準ゲート MOSFET（参考文献 5）に対して温度 25℃、ゲート-ソース間電圧  $V_{GS} = 10V$  で規定されています。アンプ動作時の MOSFET の導通損失  $P_{CONDUCTION}$  は  $R_{DS(on)}$  とドレイン電流  $I_{D RMS}$  によって決まり、次式のように求められます。

$$P_{CONDUCTION} = (I_{D RMS})^2 \times R_{DS(on)}$$

$R_{DS(on)}$  は温度に依存し、 $T_J$  の上昇と共に大きくなります。熱暴走を防止するために、熱設計ではこの点に注意してください。MOSFET の最大接合部温度  $T_{Jmax}$  が、アンプの全動作状態にわたってデータシートに規定された値を超えないようにしなければなりません。従って、MOSFET の最大導通損失は、データシートに記載されている  $T_{Jmax}$  での  $R_{DS(on)}$  と  $I_{D RMS}$  の最大電流を使って、アンプの最大動作条件で計算してください。

<結論>  $R_{DS(on)}$  が小さいと、MOSFET の導通損失が小さくなるため、アンプの効率が良くなります（図 1）。

$R_{DS(on)}$  が小さい  $P_{CONDUCTION}$  が小さい 効率が良い

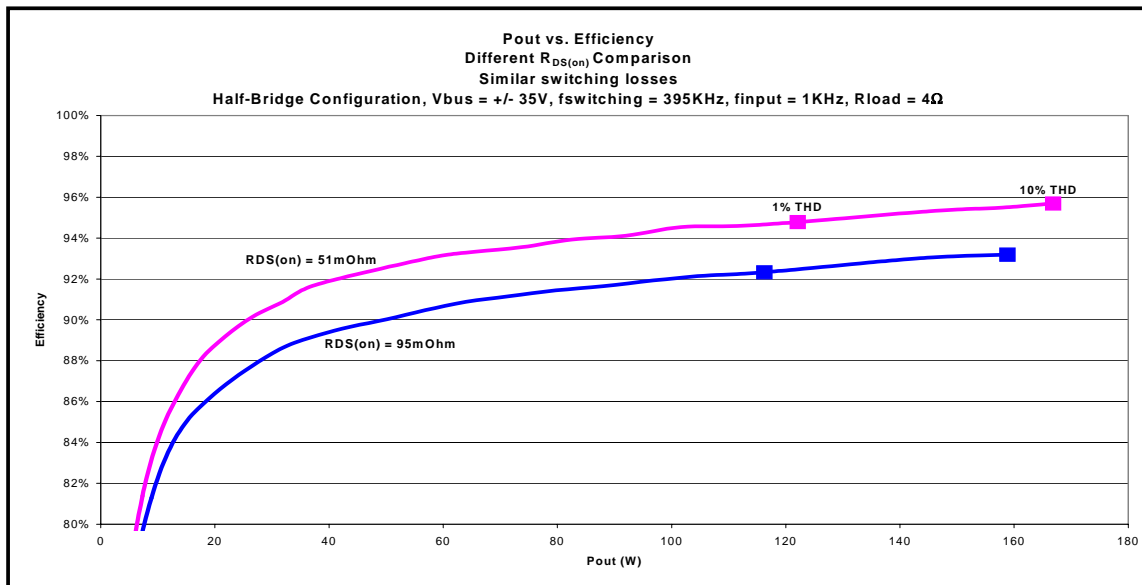


図1 MOSFET の異なる  $R_{DS(on)}$  に対するアンプの効率とスイッチング損失

### ゲート電荷: $Q_g$

MOSFETのゲート電荷  $Q_g$  は、MOSFETを完全にターン・オンするために必要なゲートの電荷量です。このパラメータは温度に依存せず、MOSFETの速度は、直接、 $Q_g$ に比例します。 $Q_g$ が小さくなると、スイッチングが高速になり、ゲート損失が小さくなります。この結果、スイッチング損失が低減し、効率が向上します。

MOSFETのスイッチング損失  $P_{TOTAL\ SWITCHING}$  は、次式で定義されます。

$$P_{TOTAL\ SWITCHING} = P_{SWITCHING} + P_{GATE}$$

スイッチング損失  $P_{TOTAL\ SWITCHING}$  は、図2に示すように、MOSFETのターン・オンとターン・オフのスイッチング時に発生します。スイッチング損失は、スイッチング・エネルギー  $E_{sw}$  にアンプのPWM (パルス幅変調) スwitching周波数  $f_{sw}$  を乗算して求められます。

$$P_{SWITCHING} = E_{sw} \times f_{sw}$$

スイッチング・エネルギー  $E_{sw}$  は、

$$E_{sw} = \int_0^t V_{DS}(t) \times I_D(t) dt$$

となります。ここで、 $t$ はスイッチング・パルスの長さです。

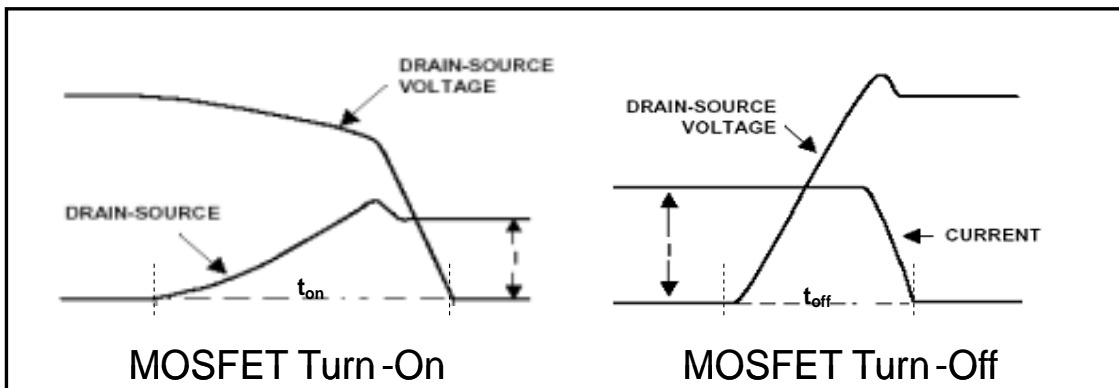


図2 MOSFETのターン・オン/ターン・オフ時の波形

許容できるスイッチング損失は、アンプの仕様と MOSFET のデータシートに記載されたパラメータを使って、次のように見積もることができます。

$$P_{\text{SWITCHING}} = [0.5 \times I_D \times V_{\text{bus}} \times (t_r + t_f) \times f_{\text{sw}}] + [0.5 \times C_{\text{oss}} \times V_{\text{bus}}^2 \times f_{\text{sw}}] + [K \times 0.5 \times Q_{\text{rr}} \times V_{\text{bus}} \times f_{\text{sw}}]$$

ここで、 $V_{\text{bus}}$  はアンプのバス電圧、 $t_r$  と  $t_f$  は MOSFET の立ち上がり時間と降下時間、 $C_{\text{oss}}$  は MOSFET の出力容量、 $Q_{\text{rr}}$  は MOSFET のボディ・ダイオード（内蔵ダイオード）の逆回復電荷、 $K$  は MOSFET の  $T_j$  および  $I_F$  や  $dI_F / dt$  などアンプ固有の条件に起因する要因です。

ゲート損失は、

$$P_{\text{GATE}} = 2 \times Q_g \times V_{\text{driver}} \times f_{\text{sw}}$$

と見積もれます。ここで  $V_{\text{driver}}$  はゲート駆動回路の電圧です。

アンプの直線性は、MOSFET のターン・オンやターン・オフの遅延時間などスイッチングのタイミング誤差に影響されます。すなわち、 $Q_g$  が大きいとアンプの直線性に影響することも示していません。ただし、MOSFET のスイッチングによって発生するタイミング誤差は、デッドタイムほど重要ではなく、正しいデッドタイム値を選択することによって大幅に削減できます（参考文献 4）。この関係を図 3 と図 4 に示しました。

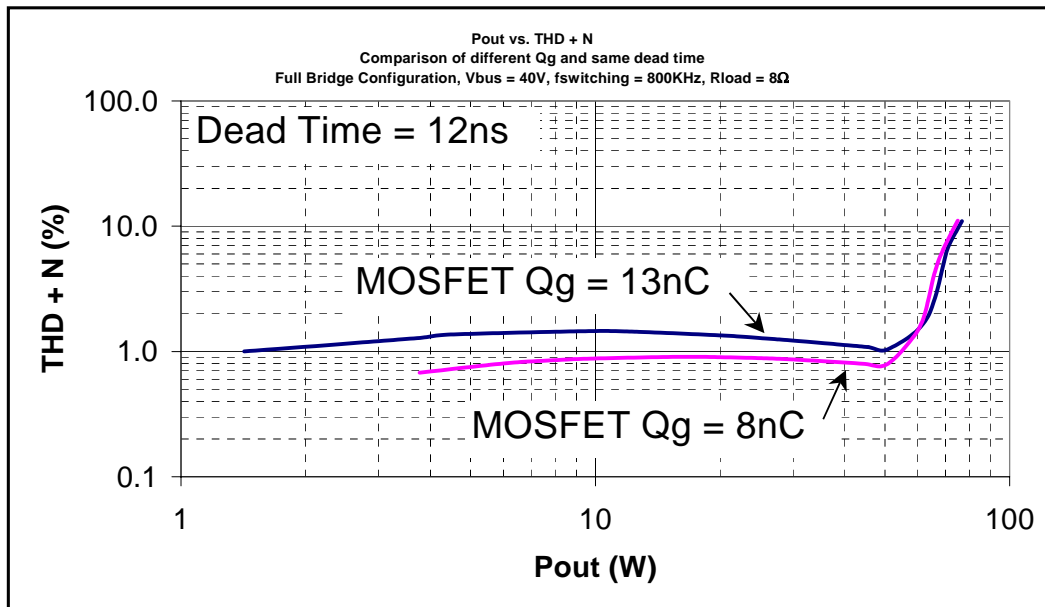


図3 デッドタイムが 12ns のときの MOSFET の  $Q_g$  とアンプの THD+N(全高調波歪み + 雑音)

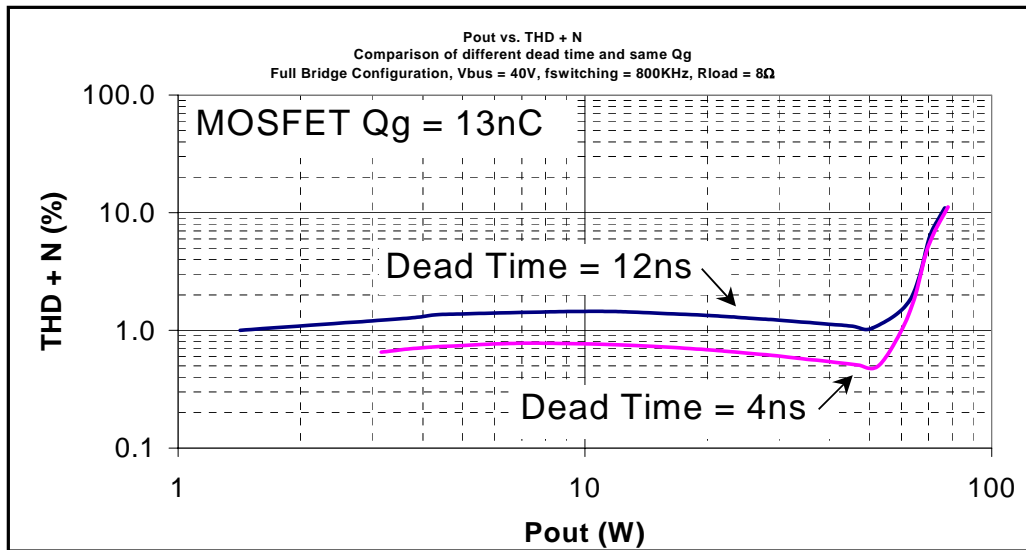


図4 MOSFET の  $Q_g$  が 13nC のときのデッドタイムとアンプの THD+N(全高調波歪み + 雑音)

<結論> MOSFET の  $Q_g$  はアンプの効率と直線性に影響します。ただし、 $Q_g$  はアンプの直線性よりも効率に強く影響します。デッドタイムを最適化することで直線性は改善できるため、主に MOSFET のスイッチング損失を小さくしてアンプの効率を改善するために  $Q_g$  を小さくしなければなりません(図5)。

$Q_g$  が小さい  $\Rightarrow$   $P_{\text{SWITCHING}}$  が小さい  $\Rightarrow$  効率が向上

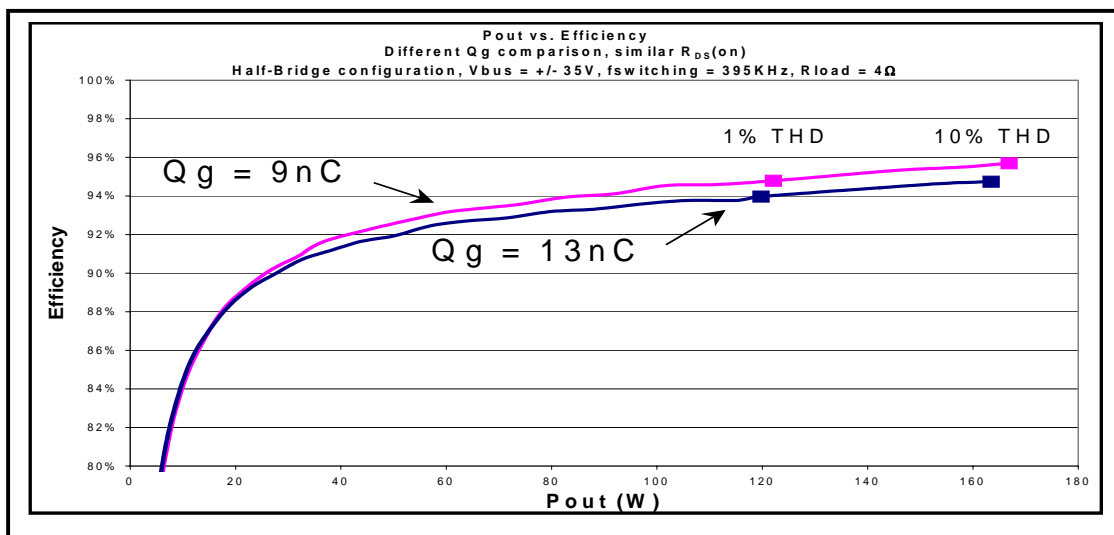


図5 MOSFET の異なる  $Q_g$  に対するアンプの効率

### ボディ・ダイオードの逆回復電荷: $Q_{rr}$

MOSFET の構造には本質的に逆方向のダイオードが含まれています。その逆方向からの回復特性がアンプの特性にも関係します。逆回復電荷  $Q_{rr}$  は、 $t_{rr}$  期間の  $I_{rr}$  で決まる面積として定義されます（図 5）。 $Q_{rr}$  は主に  $I_F$  と  $dI_F/dt$  によって決まります。これは温度に依存するパラメータであり、 $T_j$  の上昇と共に大きくなります。

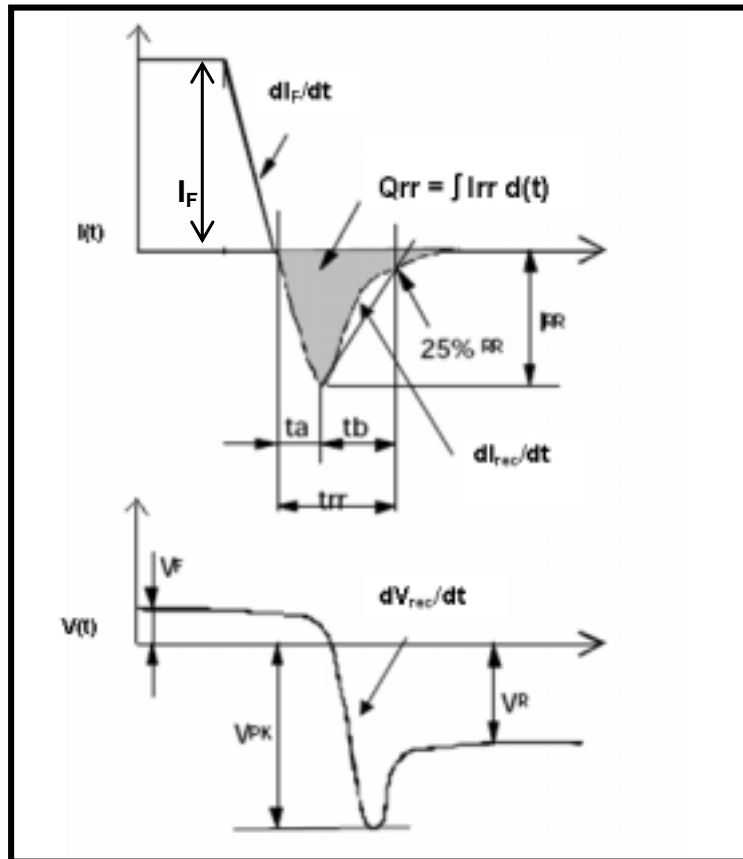


図6 標準的な MOSFET のボディ・ダイオードの逆回復波形

$Q_{rr}$  はアンプの効率と EMI 特性に影響します。効率との関係は、パワー・ブリッジの回路構成に起因します。動作時、転流電流後に、MOSFET のボディ・ダイオードで発生した逆回復電流がブリッジ回路の相補型 MOSFET にも流入して、電流の増加によってターン・オンのスイッチング損失を増加させます（図 7）。スイッチングの詳細は、アプリケーション・ノート "Using HEXFET III in PWM Inverters for Motor Drives and UPS Systems"（参考文献 2）を参照してください。



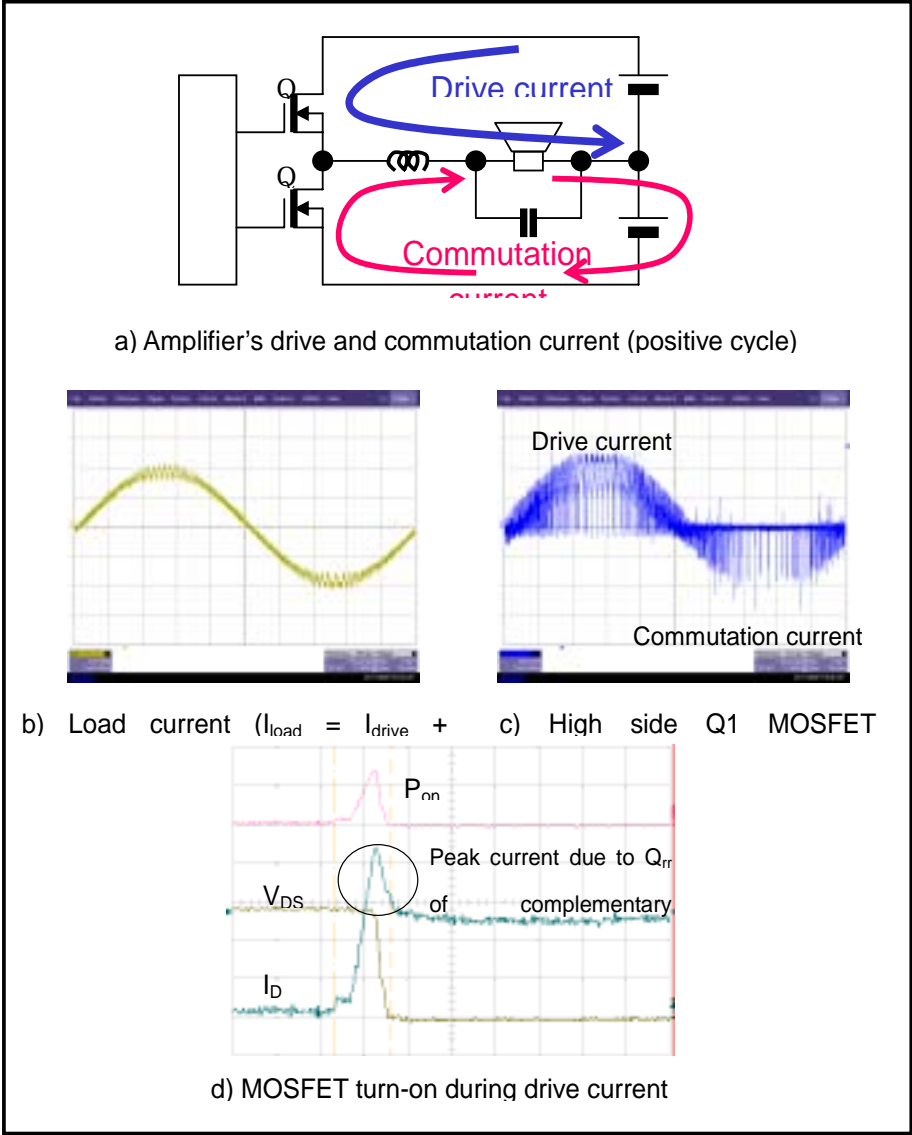


図7 駆動電流が流れている間の MOSFET のターン・オン波形

ただし、アンプの直線性と同様に、正しいデッドタイムを選択すると  $Q_{rr}$  が減少するので効率を改善できます。デッドタイムを小さくすると、転流電流がその大部分の時間、MOSFET のチャンネルに流入するようになり、MOSFET のボディ・ダイオードの電流パルス幅が小さくなるため、少数キャリア電荷と  $Q_{rr}$  が減少します。デッドタイムをさらに小さくすると、図 8 に示すように貫通電流が発生します。これは、パワー・ブリッジを構成する MOSFET にとって危険な状態であり、アンプの特性も低下させます（参考文献 4）。従って、デッドタイムを最適化すると  $Q_{rr}$  が小さくなるので、アンプの効率と直線性の改善に役立ちます（図 9）。

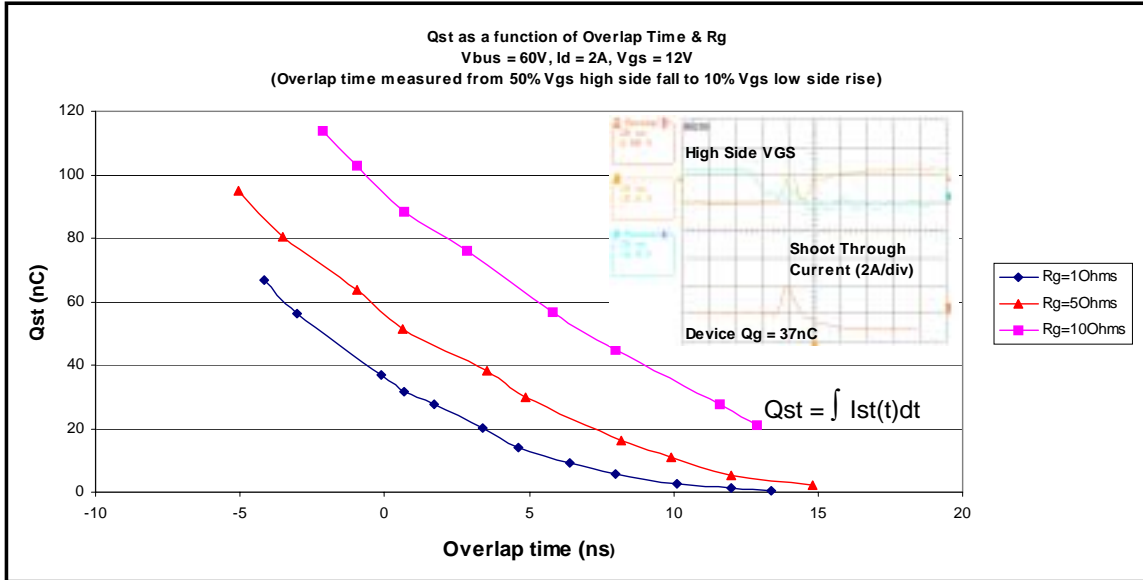


図8 デッドタイムに対する貫通電荷 ( $Q_{st} = \int I_{st}(t) dt$ ) の例

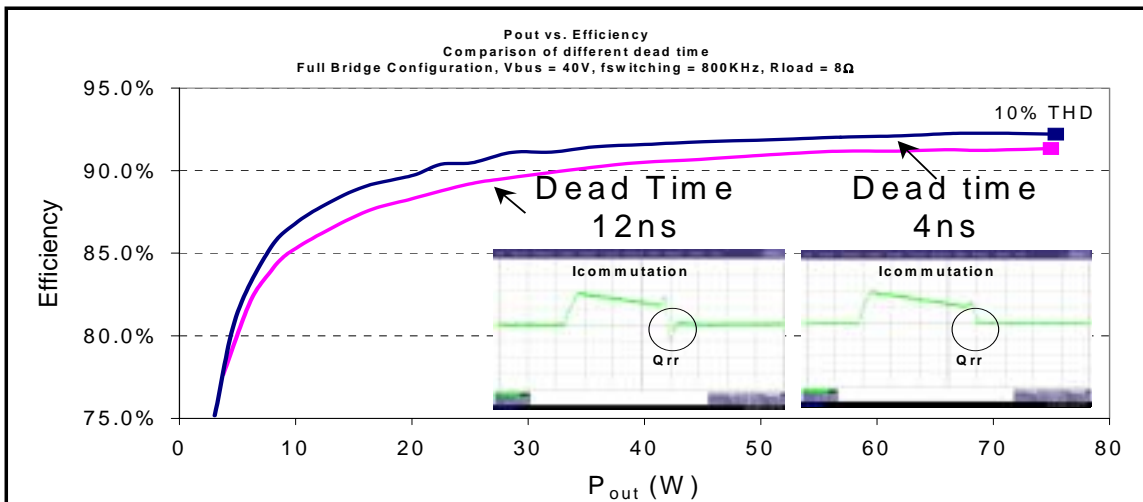


図9 デッドタイムに対するアンプの効率

$Q_{rr}$  はアンプの EMI 特性にも影響します。回復電流  $dI_{rec} / dt$  が大きいと（すなわち  $t_b$  が小さいと）、 $dV_{rec} / dt$  が大きくなり、アンプの回路の寄生インダクタンスと寄生容量によって、MOSFET 内に大きな高周波電流と過渡的なリングング電圧が発生し、放射と伝導による EMI 雑音が増加します。このため、過渡電圧を抑えて EMI 特性を改善するためには、小さくかつソフトな回復が基本です。

EMI 雑音と逆回復との関係は、技術資料 "Ultra-fast Recovery Diodes Meet Today Requirements for High Frequency Operations and Power Ratings in SMPS Applications"（参考文献 3）を参照してください。

<結論> 逆回復を小さくかつソフトにすると、MOSFET のスイッチング損失と過渡的な電流-電圧のリングングが小さくなるため、アンプの効率と EMI 特性が改善します。

$Q_{rr}$  を小さくソフトにする  $P_{SWITCHING}$  が小さくなる 効率と EMI 特性が改善する

### 内部ゲート抵抗: $R_{G(int)}$

内部ゲート抵抗  $R_{G(int)}$  は温度に依存するパラメータであり、温度の上昇と共に大きくなります。このパラメータは、MOSFET のオン/オフのスイッチング時間に影響します。 $R_{G(int)}$  が大きいと、全ゲート抵抗が大きくなり、ゲート電流が減少します（図 10）。これによって、スイッチング時間が長くなるため、MOSFET のスイッチング損失が増えます。さらに、 $R_{G(int)}$  の変動が大きいと、デッドタイムの制御に影響します。このため、アンプ特性の許容範囲に対して、パラメータ  $R_{G(int)}$  の分布を考慮しなければなりません。

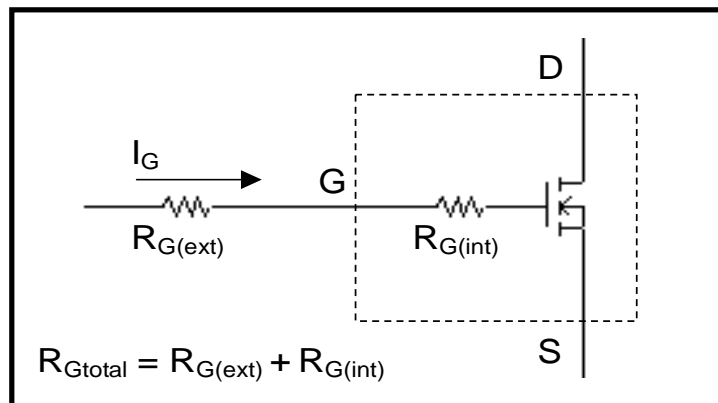


図 10 全ゲート抵抗  $R_{Gtotal} = R_{G(ext)} + R_{G(int)}$

### MOSFET のパッケージ

MOSFET のパッケージの選択は、アンプの特性とコストに大きな影響を与えるので特に重要です。大きさ、許容消費電力、電流容量、内部のインダクタンスと抵抗、電氣的絶縁性、実装の仕方などパッケージの特性は、プリント回路基板やヒートシンクの大きさ、アセンブリ工程、MOSFET の電氣的パラメータを決定するときに重要です。

MOSFET の特性でパッケージの熱抵抗  $R_{JC}$  の重要性はよく知られています。主に、 $R_{JC}$  が小さいと、動作時の MOSFET の接合部の温度  $T_J$  が下がり、MOSFET の信頼性と特性が向上します。

$$P_{max} = T_J / R_{JCmax}$$

この場合も、アンプの回路の寄生インダクタンスと寄生容量が EMI 特性に影響します。パッケージ内部のインダクタンス成分が EMI 雑音の発生に大きく影響します。同じ MOSFET の半導体チップを内蔵し、かつ内部インダクタンスが異なる 2 種類のパッケージ、すなわち IR 社独自の小型金属パッケージ DirectFET® (1nH 以下) と標準的なプラスチック・パッケージ TO-220 (約 12nH) の EMI 雑音の比較を図 11 に示します。この比較から、DirectFET の方が EMI 特性が優れていることが分かります。DirectFET の立ち上がり時間と降下時間を TO-220 に比べて約 3 倍に高速化しても、雑音は TO-220 よりも約 9dB 低くなっています。

<結論> パッケージを正しく選択すると、アンプの信頼性、特性、コストを改善できます。

評価条件：ハーフブリッジ構成、ヒートシンクなし、アンプのバス電圧  $V_{bus} = \pm 35V$ 、  
 スwitching 周波数  $f_{sw} = 395kHz$ 、出力電力  $P_{out} = 12.5W$ 、  
 負荷抵抗 = 4Ω、入力電圧 = 250mVrms の正弦波 (周波数 1kHz)。  
 注) 実験室はシールドされていません。

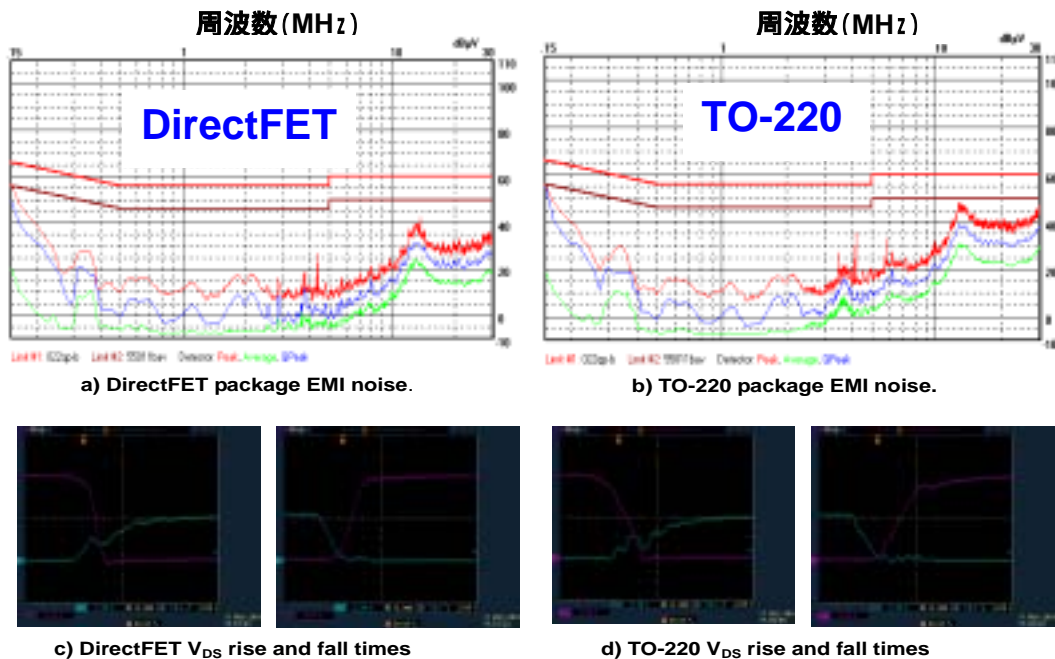


図 11 パッケージによるアンプの EMI 特性の比較  
 左図が DirectFET パッケージ、右図が TO-220 パッケージ

## 最大接合部温度: $T_J$

MOSFETの接合部温度の最大値  $T_{Jmax}$  はアンプの特性に直接関係しないパラメータですが、ヒートシンクの大きさの決定に重要なので特に強調します。デバイスの  $T_{Jmax}$  が高いと処理できる電力損失が増えるため、ヒートシンクの小型化が可能になります。アンプの小型化とコスト低減が図れます。

## IR社のデジタル・オーディオ用 MOSFET

IR社のデジタル・オーディオ用 MOSFET は、D級オーディオ・アンプ向けに特別に設計されたデバイスです。デバイスのパラメータは、アンプの特性を向上させようとして最適化されているため、アンプの仕様に合わせて正しいチップ・サイズ of MOSFET を選択してください。

前述のように、 $R_{DS(on)}$  と  $Q_g$  は MOSFET の電力損失を決める重要なパラメータです。これらのパラメータは MOSFET のチップ・サイズに関係しているため、お互いがトレードオフの関係になります。すなわち、MOSFET のチップ・サイズが大きいと  $R_{DS(on)}$  が小さく、 $Q_g$  が大きくなります。逆も真です。

チップ・サイズが大きい  $R_{DS(on)}$  が小さい、 $Q_g$  が大きい  
 $P_{CONDUCTION}$  が小さい、 $P_{SWITCHING}$  が大きい

チップ・サイズが小さい  $R_{DS(on)}$  が大きい、 $Q_g$  が小さい  
 $P_{CONDUCTION}$  が大きい、 $P_{SWITCHING}$  が小さい

<結論> 最適なチップ・サイズを選択することで、MOSFET の電力損失を減らすことができます。この例を図 12 に示します。

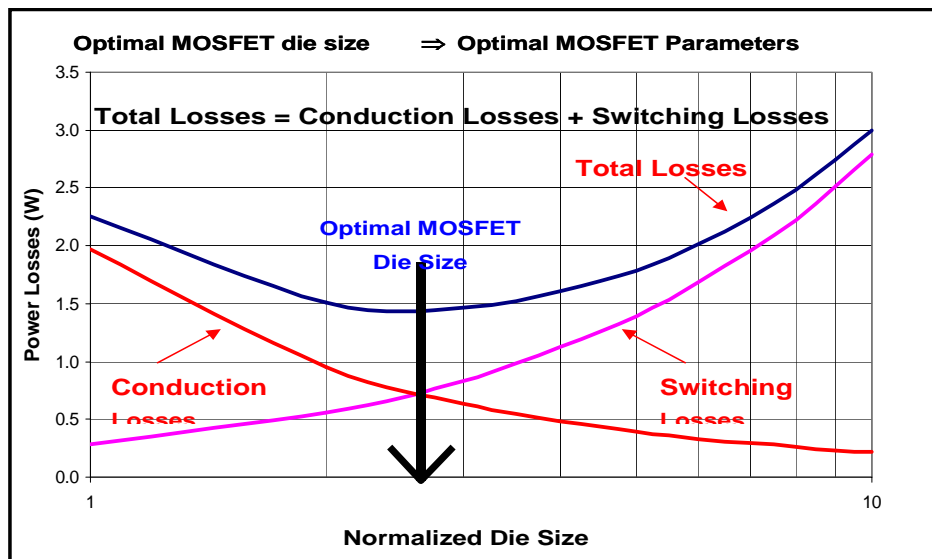


図 12 IR社のデジタル・オーディオ用 MOSFET のチップ・サイズと電力損失の関係

IR社のデジタル・オーディオ用 MOSFET では、最大  $R_{G(int)}$  が保証され、 $Q_{rr}$  が小さく、最大  $T_J$  が 175 まで保証されています。さらに、DirectFET のように最も効率良いパッケージを採用しています。これらを組み合わせた IR 社の MOSFET は、D 級オーディオ・アンプ向けの高効率で強固、高信頼性のデバイスになっています。

## まとめ

D 級オーディオ・アンプの特性、大きさ、コストに関する MOSFET の主要なパラメータには、ゲート-ソース間降伏電圧（耐圧） $BV_{DSS}$ 、オン抵抗  $R_{DS(on)}$ 、ゲート電荷  $Q_g$ 、逆回復電荷  $Q_{rr}$ 、内部ゲート抵抗  $R_{G(int)}$ 、接合部の最大温度  $T_{Jmax}$ 、そしてパッケージがあります。これらのパラメータを正しく選択すると、アンプの特性が向上し、小型化や低コスト化が可能になります。IR 社のデジタル・オーディオ用 MOSFET は、アンプ全体の最適な特性が得られるように、これらの主要パラメータを最適化したデバイスです。

## 参考文献

- 1 Barkhordarian V., “Power Mosfet Basics”, International Rectifier Application Note .
- 2 Grant D., “Using HEXFET III in PWM Inverters for Motor Drives and UPS Systems”, International Rectifier Application Note.
- 3 Guerra A., Andoh K. and Fimiani S. , “Ultra-fast Recovery Diodes Meet Today Requirements for High Frequency Operations and Power Ratings in SMPS Applications”, International Rectifier White Paper.
- 4 Honda J. and Adams J., “Class D Audio Amplifiers Basics”, International Rectifier Application Note.
- 5 Pearce R., Brown S. and Grant D., “Measuring HEXFET<sup>®</sup> Characteristics”, International Rectifier Application Note.

注) このアプリケーション・ノートの原文も含めて、上記参考文献はすべて米国 IR 社のホームページ (<http://www.irf.com>) にあります。

インターナショナル・レクティファイアー・ジャパン株式会社  
〒170-6051  
東京都豊島区東池袋 3-1-1、サンシャイン 60 51F  
営業部 TEL : 03-3983-0086 FAX : 03-3983-0642

©インターナショナル・レクティファイアー・ジャパン  
この文献の無断複製・転載を禁じます。