

電源にGaNパワー素子の適用始まる、トランスフォームがレイアウト／回路設計ノウハウを詳説

GaNパワートランジスタが遂に実用化段階に入った。これを使えば、電源の変換効率を高めると同時に、外形寸法を小さくできる。このメリットは極めて大きい。ただし、得られるのはメリットばかりではない。デメリットもある。それは、既存のSiパワーMOSFETと比較すると、電源回路設計の難易度が格段に高まってしまふことである。設計を誤れば、高いレベルの

電磁雑音(EMI)が放射されたり、電力損失が増えたり、最悪の場合はGaNパワートランジスタ自体が破壊されてしまう。

しかし、過度に恐れる必要はない。GaNパワートランジスタの特徴を把握し、それにふさわしい方法や手順で設計すれば大丈夫だ。その方法と手順とは、どのようなものなのか。以下で詳しく説明していく。

高性能なうえにノーマリ・オフを実現

設計手法／手順の説明をする前に、GaNパワートランジスタの特徴をおさらいしておこう。最大の特徴は、低いオン抵抗、高い耐圧、高速なスイッチング動作を同時に実現できる点にある。これらに加えて、電源を構成する場合に魅力的な特徴が3つある(表1)。1つはゲート電荷量(Qg)が小さいこと。2つめは出力容量(Coss)が少ないこと。3つめは逆回復電荷量(Qrr)が極めて小さいことである。

GaNパワートランジスタの課題だった『ノーマリ・オン問題』についてはすでに解決済みだ。一般に、GaNパワートランジスタ

は、HEMT構造を採用する。このため、何らかの工夫を凝らさない限り、ゲートに電圧を印加していない状態で電流が流れる『ノーマリ・オン』のデバイスになってしまう。これでは、電源に故障が発生したときに、電流が流れ続ける状態に陥る。電源は大きな電力を扱うため、とても危険だ。そこでトランスフォーム(以下、同社)は、GaNパワートランジスタと、低耐圧のSiパワーMOSFETをカスコード接続することで『ノーマリ・オフ』を実現し、問題を解決した。現在同社は、650V耐圧GaNパワートランジスタを合計で6品種製品化している(一部、600V耐圧品あり)。

	Parameters	意味	IPW65R041CED (インフィニオン)	TPH3205WS (トランスフォーム)
Static	V_{DS_min}	ドレイン-ソース間電圧	650V@25°C	600V (spike rating 750V)
	$R_{DS}(25^\circ\text{C})$	ドレイン-ソース間抵抗	37/41 mΩ	52/63 mΩ
	Qg	ゲート容量	300 nC	19 nC
	Qgd	ゲート-ドレイン間容量	165 nC	6 nC
Dynamic	$C_{o(er)}$	出力容量(エネルギー関連)	288 pF ^[1]	156 pF ^[2]
	$C_{o(tr)}$	出力容量(時間関連)	1485 pF ^[1]	247 pF ^[2]
Reverse Operation	Qrr	逆回復容量	1900 nC ^[3]	136 nC ^[3]
	trr	逆回復時間	250 ns ^[3]	30 ns ^[3]

表1. SiパワーMOSFETとGaNパワートランジスタの比較

既存のSiデバイス(SJ-MOSFET)とトランスフォームのGaN HEMTの特性を比較。
ゲート電荷、出力容量、リカバリ特性の改善により機器の[1] Driving Loss [2] Switching Loss [3] Reverse recovery Lossを低減
⇒ 高効率化、小型化が実現可能に。

[1] $V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0 - 400V$

[2] $V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0 - 480V$

[3] $V_{DS} = 480V, I_{DS} = 49.6A, di/dt = 100A/\mu s$

[4] $V_{DS} = 400V, I_{DS} = 24A, di/dt = 450A/\mu s$

寄生成分の影響が大きい

GaNパワートランジスタを使った電源の設計難易度が高い理由は、スイッチング速度が極めて高いことにある。SiパワーMOSFETと比較すると、 dv/dt は4倍以上、 di/dt は10倍以上に達する場合もある。「スイッチング電圧波形の立ち上がり時間はわずか7ns」(トランスフォーム・ジャパン、以下同)という。立ち上がり時間が短ければ、その分だけ高い周波数成分が含まれる。高周波成分が含まれていれば、寄生成分の影響を受けやすくなる。SiパワーMOSFETを使っていた従来ケースでは、寄生インダクタンスが10nHを超えることも少なくなかった。

しかし、GaNパワートランジスタを使う場合は、「2~3nHに

抑えなければならない」という。ソース-インダクタンスを流れるドレイン-ソース間電流(I_{DS})の変化によって、ゲート-ソース間電圧(V_{GS})が変調されてしまい大きなリンギングが発生する(図1、図2)。その結果、高いレベルのEMIが放射されたり、GaNパワートランジスタが破壊されたりする事態を招く。

だからといって、寄生インダクタンスは簡単に2~3nHに抑えられない。寄生インダクタンスは、1mm幅の配線を1mmひいただけで1nHになるからだ。

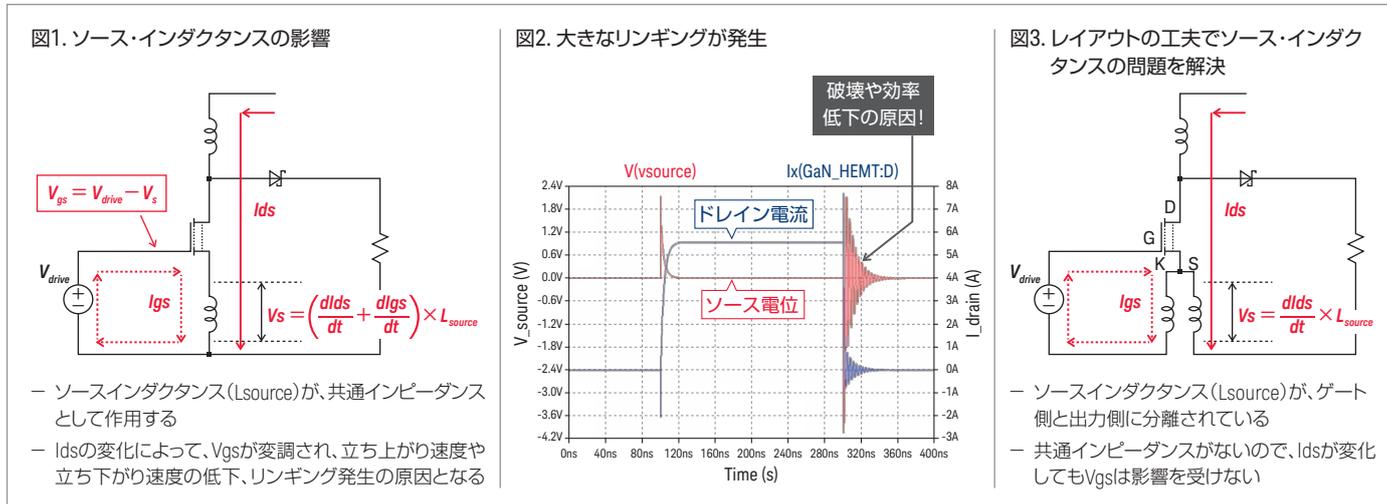
こうした寄生インダクタンスに関する問題に対して、同社は2つの対応策を提示している。

1つは、ソース・インダクタンスに関する問題の対応策だ。レイアウトの工夫で対応する。通常、GaNパワートランジスタのソース電極とグラウンドは、1つの信号配線で結ばれており、ここにゲート-ソース間電流(I_{gs})とドレイン-ソース間電流(I_{ds})の両方が流れ込む。従って、ソース・インダクタンスが共通インピーダンスとして機能するため、ドレイン-ソース間電流(I_{ds})の変化によってゲート-ソース間電圧(V_{gs})が変調されてしまうわけだ。

そこで同社は、ゲート-ソース間電流(I_{gs})が流れるゲート・ドライブ・ループと、ドレイン-ソース間電流(I_{ds})が流れるパワー・ループ

を分離するレイアウトを推奨している(図3)。大電流が流れる部分に共通インピーダンスが存在しないので、ドレイン-ソース間電流(I_{ds})が変化しても、ゲート-ソース間電圧(V_{gs})は影響を受けない。大きなリンギングの発生を防止できる。

もう1つは、ゲート駆動ICの電流能力を適切に選択してゲート信号にゲート抵抗(R_g)を不要にし、リンギング成分のみをカットするフェライトビーズを直列に挿入することである。ただし、フェライトビーズの選択には注意が必要である。インピーダンスが大きすぎると、信号波形が鈍りすぎてしまい、信号遅延が大きくなるからだ。



シミュレーションが有効

基板レイアウトや回路構成の工夫などで、GaNパワートランジスタが抱える問題を解決すれば、メリットだけを楽しむことができるようになる。ただし、工夫によって問題を解決できているのか、否か。この疑問の答えは、実際に電源を組み立てて測定してみなければ分からない。

しかし、回路シミュレータを使えば、設計段階で詳細に検証できる。同社では、回路シミュレータを使った検証作業をサポートするため、GaNパワートランジスタの回路モデルを無償提供しており、LTSpiceやPSpiceなどの回路シミュレータで利用できる。

しかし、GaNパワートランジスタのスイッチング動作は高速だ。回路シミュレータでの検証では、デバイスの回路モデルのほか、1GHzと高い周波数に対応した配線の分布定数モデルを含める必要がある。実行方法は2つある。1つは、直線やL字などの配線を表現するモデルを組み合わせて行う『簡易的な方法』。もう1つは、基板全体を電磁界解析してレイアウト・モデルを抽出し、回路/レイアウトの協調解析を実行する『高精度な方法』だ。

簡易的な方法でも、配線モデルを考慮しないケースに比べれば、かなり大きな効果が得られるが、高精度な方法を使えば、信頼性が極めて高い検証を実行できる。例えば、トランスフォームとキーサイト・テクノロジーは、GaNパワートランジスタを搭載した電源の回路/レイアウトの協調解析法の開発と、その解析精度の検証に共同で取り組んでおり、その中で実測結果と解析結果がかなり一致することを確認済みだ。しかし、高精度な方法を実行するには、深い知識と豊富なノウハウが必要になる。従って、「まずは簡易的な方法を採用して、高周波の影響を考慮した回路解析を実行することを推奨する」という。なお、高精度な方法は一般的なSPICEツールでは対応できない。例えば、キーサイト・テクノロジーが提供する『ADS』などの回路/電磁界シミュレータを採用する必要がある(図4)。

(表1、図1、2、3、共にトランスフォーム・ジャパン提供)

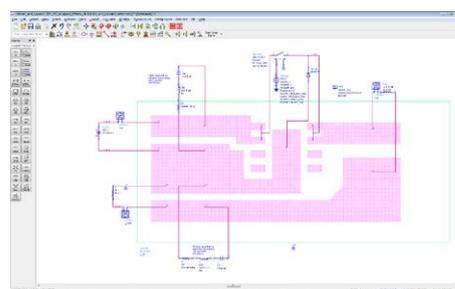


図4. 高周波の影響を考慮した設計を可能にする、回路/レイアウト協調シミュレーション例

トランスフォーム・ジャパン株式会社
〒222-0033 横浜市港北区新横浜2-5-15
新横浜センタービル9階
TEL 045-471-1370
Email contact@transphormjapan.com
ホームページ www.transphormusa.com

キーサイト・テクノロジー合同会社
本社〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1
TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)
Email contact_japan@keysight.com
ホームページ www.keysight.co.jp