GN003 Application Note

高速GaN E-HEMTの測定技術

March 08, 2022

GaN Systems Inc.

目次

概要

- 測定技術の重要性

GaN E-HEMTスイッチングテスト測定技術

- 短いループが重要
- ローサイド電圧プローブ
- ハイサイドフローティング電圧プローブ
- 高速GaN E-HEMTの電流検出

ダブルパルススイッチングテスト

- ダブルパルススイッチテストのセットアップ
- 400V / 30Aハードスイッチングターンオンおよびターンオフテスト結果

スイッチングエネルギーEon / Eoff測定

- VGS、VDS、IDSプロービングテクニックによる測定精度の向上
- GaN E-HEMTのスイッチング損失分布
- EQOSS測定例
- 400V / 30A Eon / Eoffテスト結果

まとめ

付録：帯域幅要件

目次

概要

- 測定技術の重要性

GaN E-HEMTスイッチングテスト測定技術

- 短いループが重要
- ローサイド電圧プローブ
- ハイサイドフローティング電圧プローブ
- 高速GaN E-HEMTの電流検出

ダブルパルススイッチングテスト

- ダブルパルススイッチテストのセットアップ
- 400V / 30Aハードスイッチングターンオンおよびターンオフテスト結果

スイッチングエネルギーEon / Eoff測定

- VGS、VDS、IDSプロービングテクニックによる測定精度の向上
- GaN E-HEMTのスイッチング損失分布
- EQOSS測定例
- 400V / 30A Eon / Eoffテスト結果

まとめ

付録：帯域幅要件

概要 – アプリケーションノート GN003

GaN E-HEMTは、SiおよびSiC MOSFETよりも著しくスイッチングが高速です.
このアプリケーションノートでは、設計者が最適化された設計を実現できるように、
高速のGaN E-HEMTの性能を正確に特性評価する方法について詳しく説明します.

主に、GaNデバイスを、正確に、適切に、その電流および電圧を測定する手法について述べます.

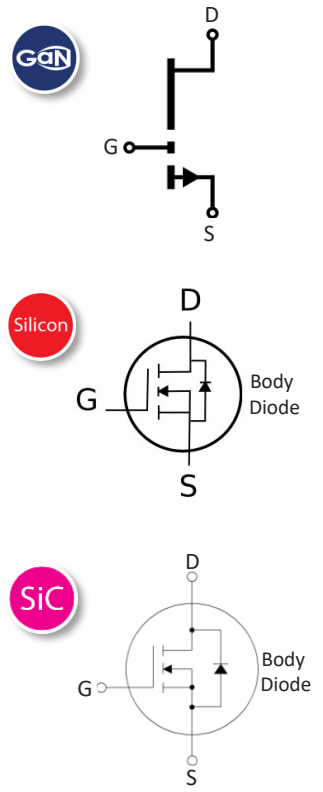
テスト結果の例として、ダブルパルススイッチングテストの測定を行い、
ハードスイッチングのターンオンとターンオフの特性を示しています.
また、Eon/Eoff測定を行い、テスト結果を用いてスイッチング損失分布を示しています.

測定技術の重要性

GaN SystemsのE-HEMTは、寄生成分が非常に少ないので、非常に短い遅延、非常に高速、非常に高い周波数で動作し、同等のSiおよびSiCトランジスタよりも高い効率で動作します.

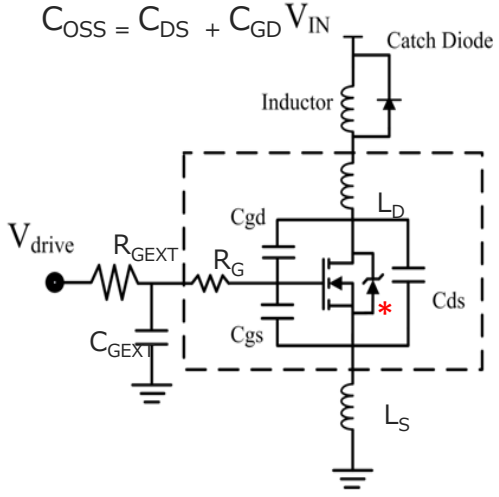
適切な注意を怠ると、GaNデバイスのパラメータに影響するテスト機器や測定技術による寄生要素により、誤った測定結果を引き起こす可能性があります.

デバイスシンボル



リアルモデル

固有や外部寄生要素を含む



* GaN E-HEMTは
ボディダイオードがない

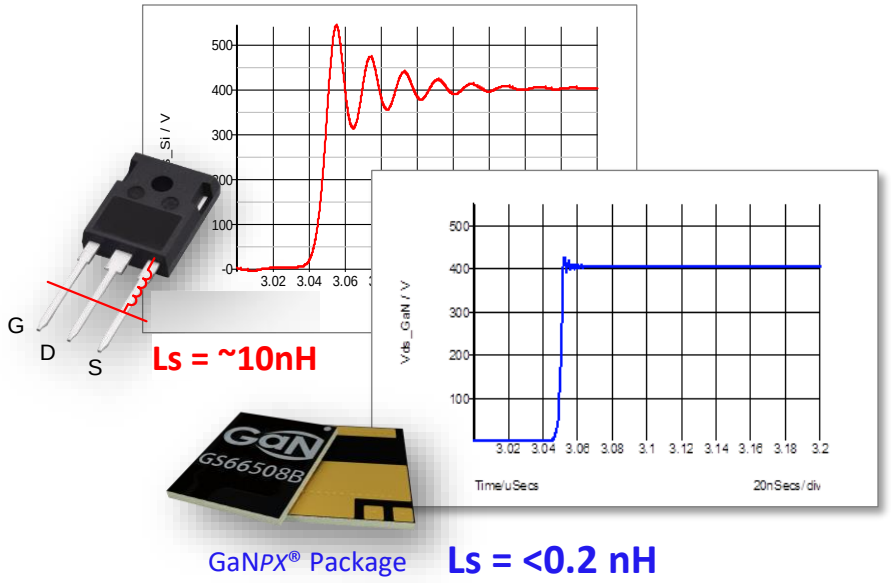
スイッチング性能に影響するデバイスパラメータ

パラメータ	影響	GaN 650V/30A/50mΩ GS66508B	Silicon 650V/33A/65mΩ IPB65R065C7	SiC 900V/35A/65mΩ C3M0065090J
Qg (nC)	スイッチング速度 & スイッチング周波数	5.8	64	30
Coss (pF)		64	48	60
tdelay(on) / tdelay(off) (ns)		4.1 / 8.0	7 / 72	9 / 16
t_rise / t_fall (ns)		3.7 / 5.2	14 / 7	10 / 6
Eon / Eoff (μJ)	効率	47.5 / 8 (Vds 400V/Ids 15A)	Not listed	39 / 17 (Vds 400V/Ids 20A)
Eoss (μJ)		8	8	16
Qrr (μC)		0	10	131
trr (ns)		0	800	16

短いループが重要–適切なプロービング手法

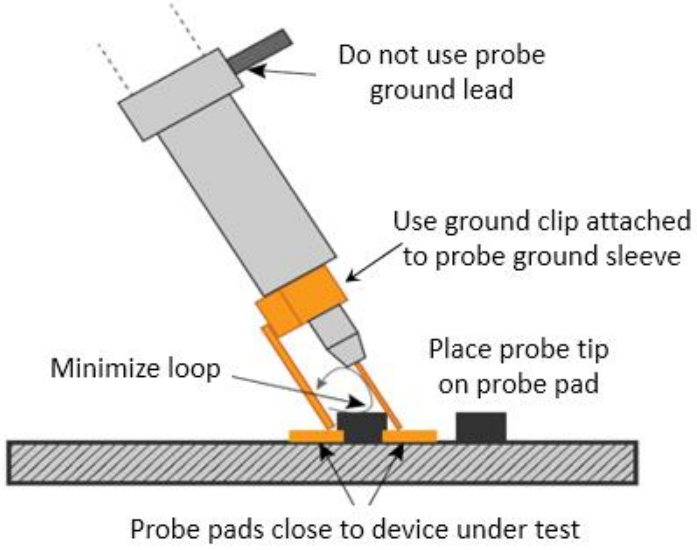
GaNPX® ショートループで設定 → 測定で長いループを避ける

GaNPX®パッケージは、超低ソースインダクタンスに設計されており、GaN E-HEMTの高速スイッチング機能を十分に活用できます。GaNPX®パッケージは、リンギングとEMIを最小限に抑えながら、高速でクリーンな高周波スイッチングを可能にします。



プローブのグランド線が長いと、測定ループに不要なインダクタンスが生じます。これにより、信号の立ち上がりエッジと立ち下がりエッジにオーバーシュートやリンギングが発生します。

プローブのグランドループの長さは、立ち上がり/立ち下がり時間に影響するため、長さを最小限に抑えることは、高速のGaN E-HEMTにとって重要です。

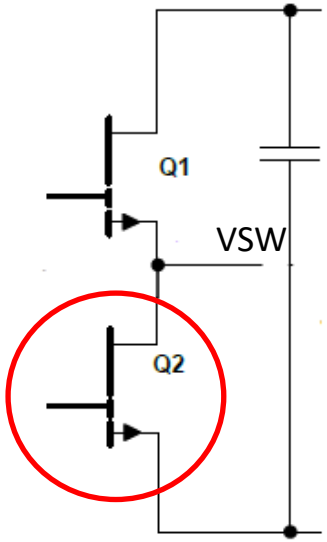


正確な測定結果を得るには短い接地クリップの付いたスコーププローブを推奨します。

ローサイド電圧プローブ

ローサイド電圧

- パッシブの高帯域幅プローブを使用します
- （300MHz B/W以上を推奨）
- グランド線は短くする必要があります
- PCBテストポイント：プローブの取り付けに
  2つのメッキスルーホール（PTH）を用意するか、
  2本のワイヤーをはんだ付けし、短いループをつくります.



ローサイド
DUT

GS66508B評価ボード上の
ローサイドVGS / VDS測定

ローサイドVGSのプローブ

ハイサイドフローティング電圧プローブ

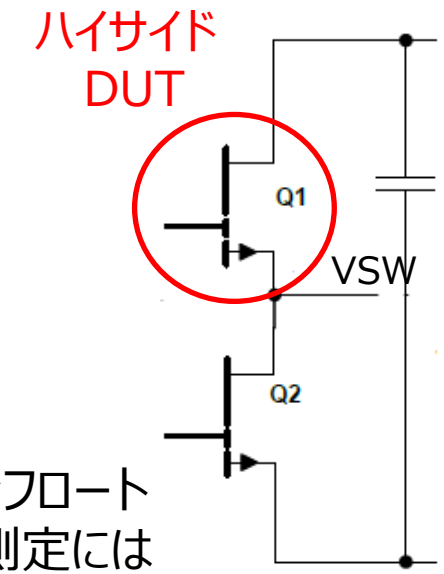
ハイサイドフローティング信号

HV差動プローブ

- 重要な仕様：帯域幅、CMRR、入力インピーダンス

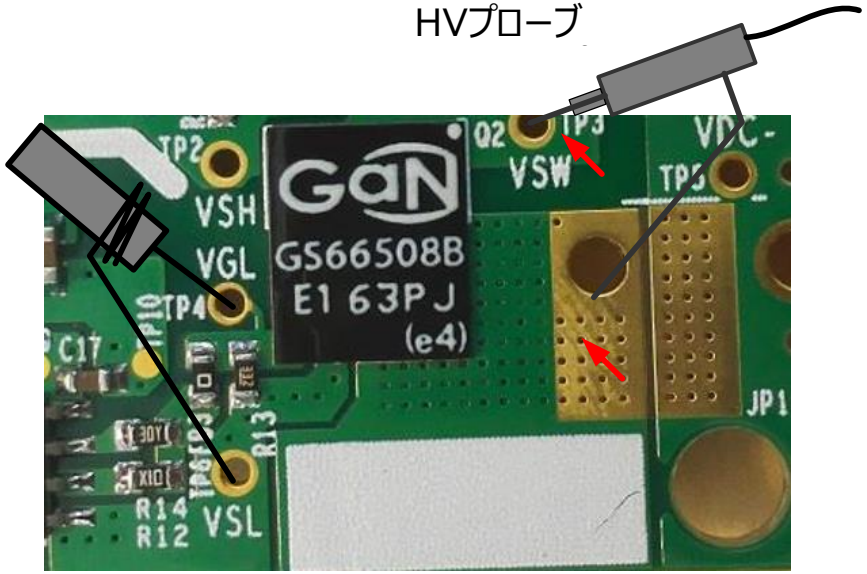
  例：PMKバンブルビーHVプローブ：

  400 MHz、875 ps立ち上がり/立ち下がり、4 pF入力



GS66508B評価ボード上の
ハイサイドV_{GS} / V_{DS}測定

スイッチングノード用の
HVプローブ



絶縁トランスを使用して、オシロスコープのグランドをフロートさせることは、dv/dtが高いGaN E-HEMT電圧測定には**推奨されません。**

- 電源周波数用に設計された絶縁トランスは、高いdv/dt信号に対して容量結合し完全に絶縁されていません.
- 潜在的なグランドループとコモンモードノイズ

オシロスコープのMATH関数を使用してEonやEoffを計算する場合の考慮事項 （E = Id * V_{DS}）

- 標準の高帯域幅パッシブプローブを使用できます
- 通常、精度は低くなります

高速GaN E-HEMTの電流検出

	電流シャント抵抗	電流トランス	ロゴスキーコイル電流プローブ
長所	• 精度がよい • 高帯域幅	• 絶縁出力	• 挿入インダクタンスが小さい • 絶縁出力 • サイズ小さい
短所	• サイズが大きい • ループインダクタンスが増える	• サイズが大きい • ループインダクタンスが増える • 低帯域幅	• 低帯域幅 • スイッチングロス測定には適さない
ベストユース	• Eon/Eoff 測定	• 高帯域幅が不要なアプリケーション	• 高電流測定 例 ダブルパルステスト
装置	**T&M Research同軸電流シャント** • SDN-414-10(0.1Ω、2GHz帯域幅) • 低インダクタンス用SSDNシリーズ SDNシリーズ 	**Pearson 2877 電流モニタ** • 1V/A 出力 • 200MHz/100A 	**PEM CWT Ultra Mini** • 9.2Hz-30MHz, 300A

目次

概要

- 測定技術の重要性

GaN E-HEMTスイッチングテスト測定技術

- 短いループが重要
- ローサイド電圧プローブ
- ハイサイドフローティング電圧プローブ
- 高速GaN E-HEMTの電流検出

ダブルパルススイッチングテスト

- ダブルパルススイッチテストのセットアップ
- 400V / 30Aハードスイッチングターンオンおよびターンオフテスト結果

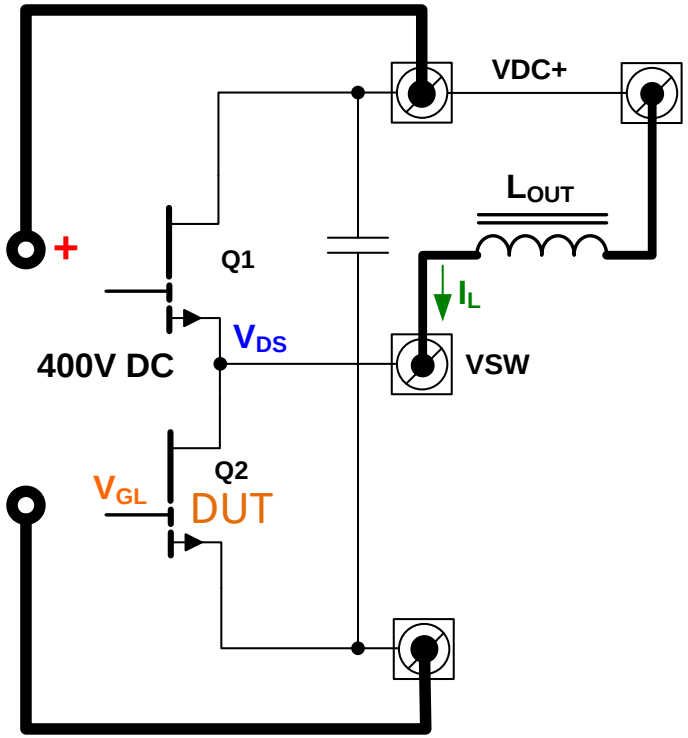
スイッチングエネルギーEon / Eoff測定

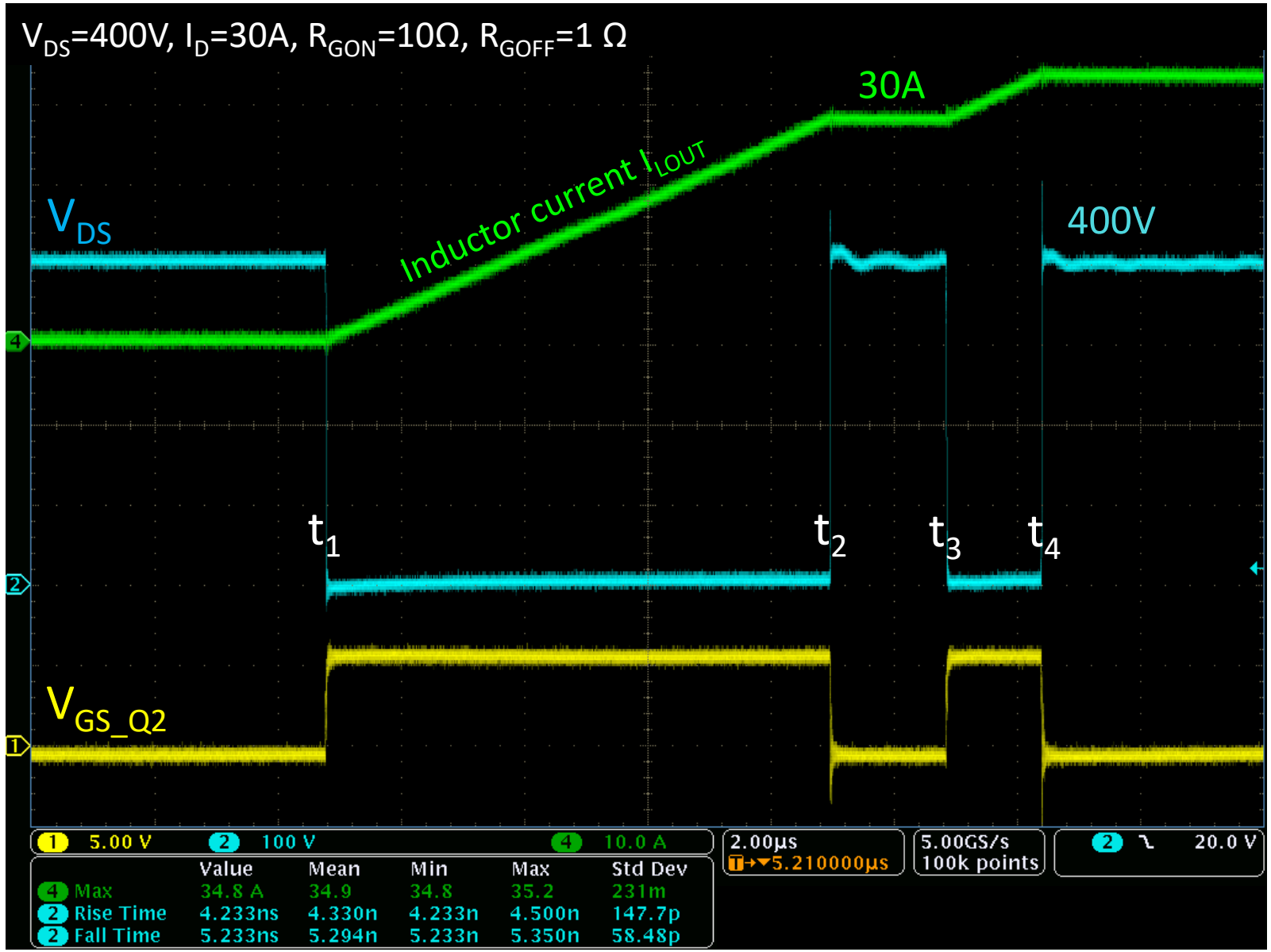
- VGS、VDS、IDSプロービングテクニックによる測定精度の向上
- GaN E-HEMTのスイッチング損失分布
- EQOSS測定例
- 400V / 30A Eon / Eoffテスト結果

まとめ

付録：帯域幅要件

ダブルパルススイッチングテストの波形例





t1：DUT ターンオン インダクタに所定値まで（ここでは30A）電流を流します

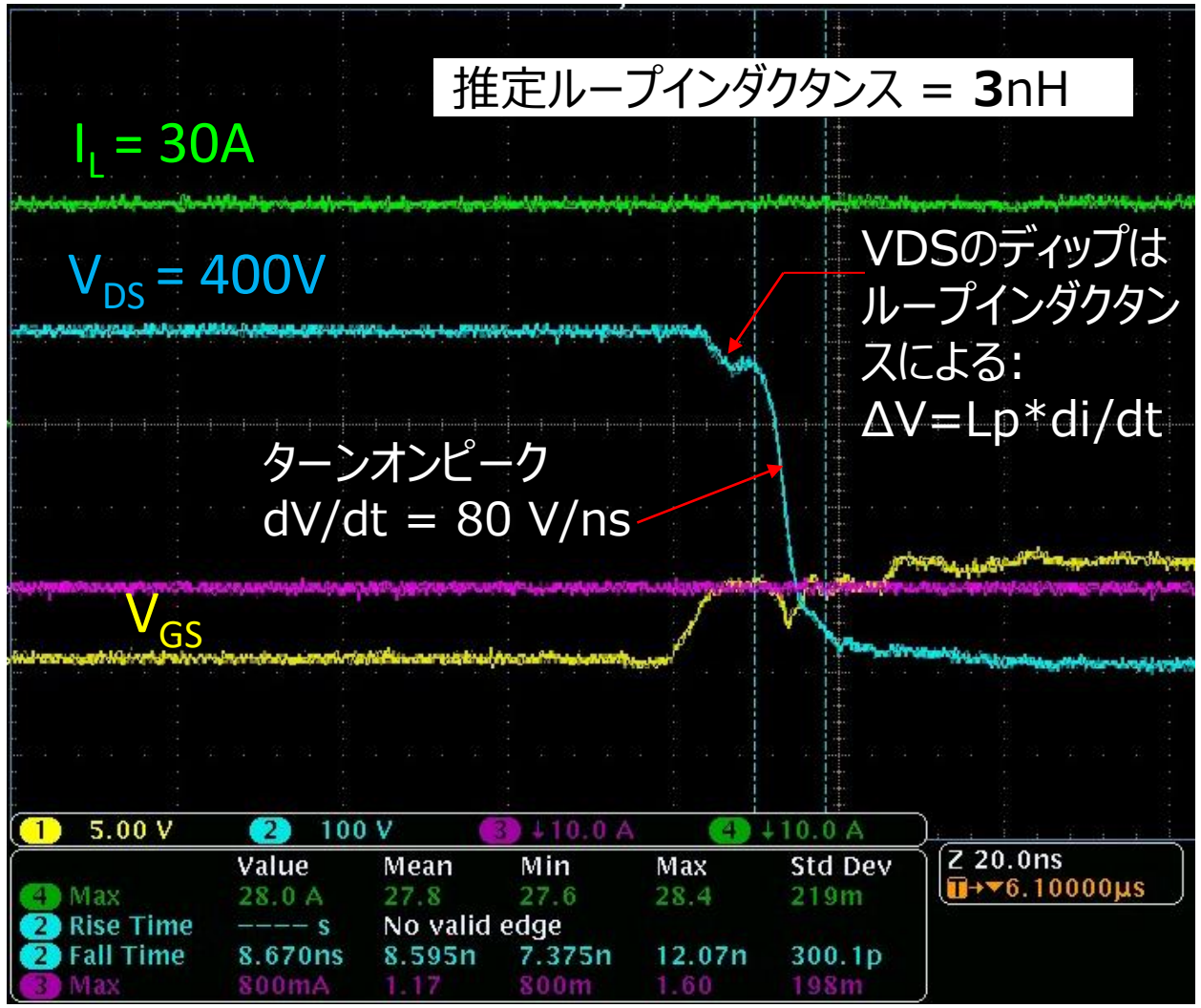
t2：**DUT ターンオフ→測定 dV/dt, t_{rise}**
Q1のインダクタの回生電流がQ1に流れます

t3：**DUT ターンオン→測定 dV/dt, t_{fall}**

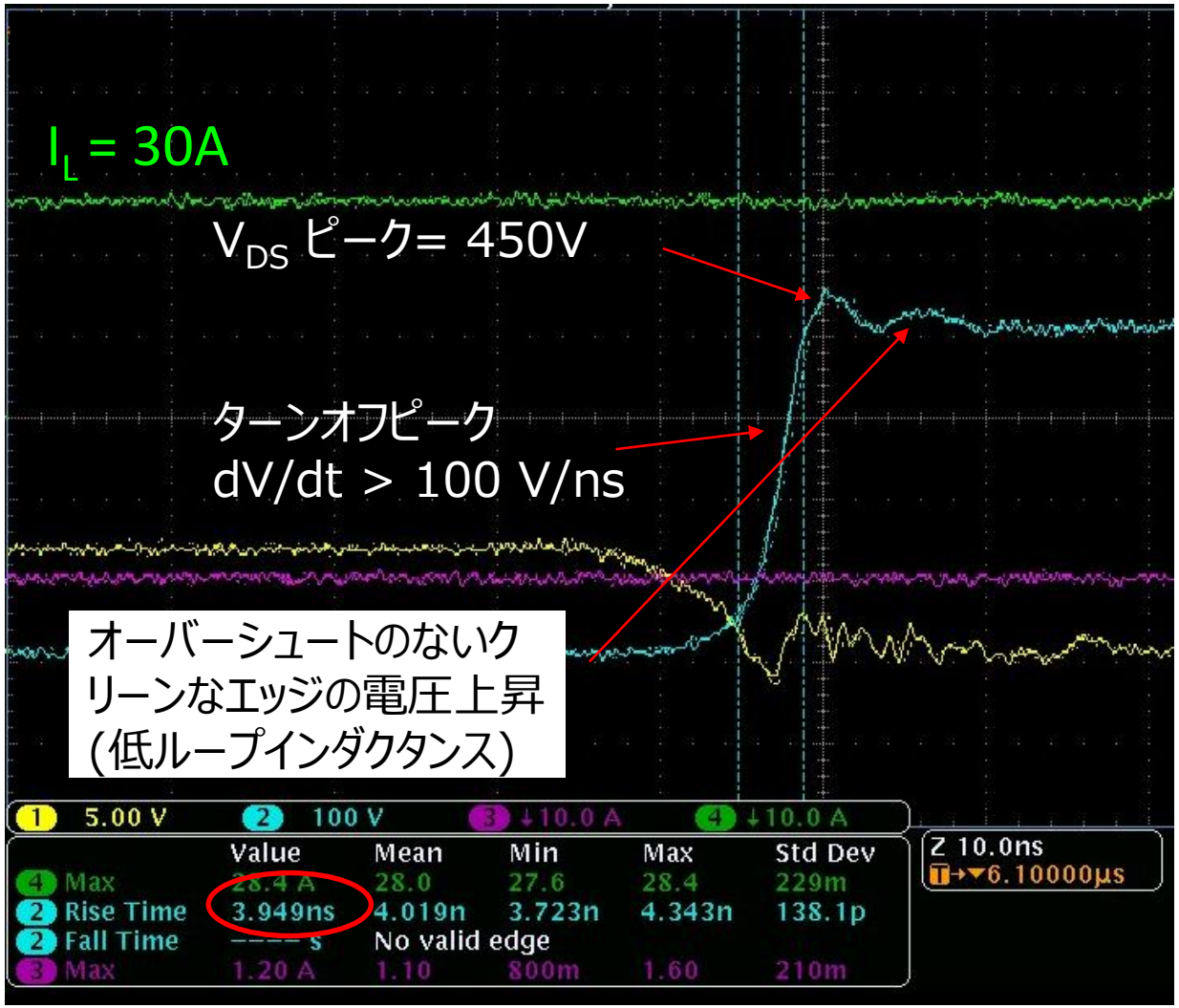
t4：DUT ターンオフ

GS66508* ダブルパルス スイッチングテスト

V_{DS}=400V, I_D=30A ハードスイッチング　ターンオン



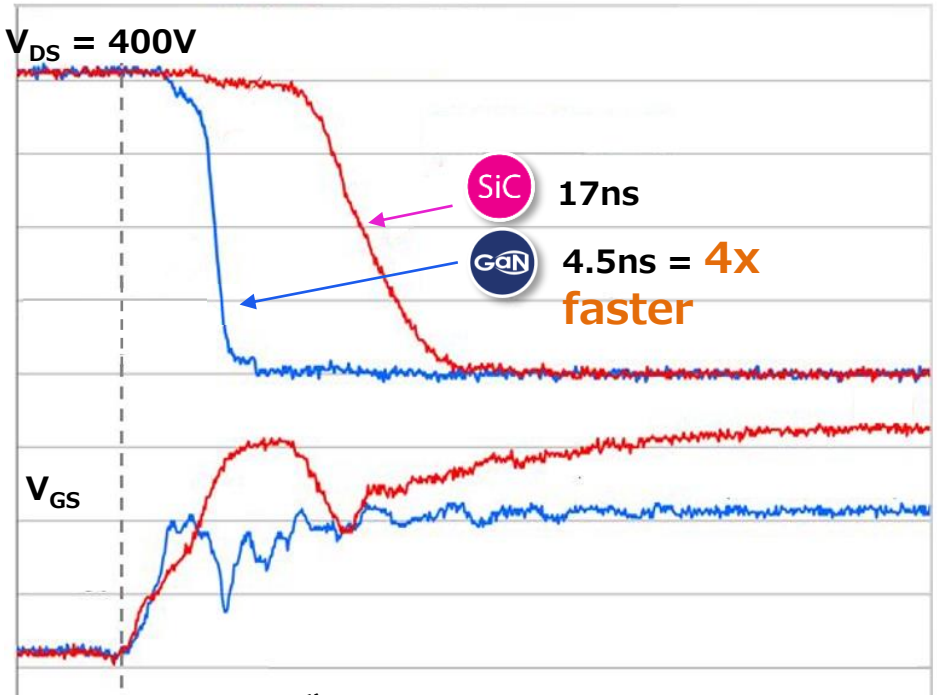
V_{DS}=400V, I_D=30A ハードスイッチング　ターンオン



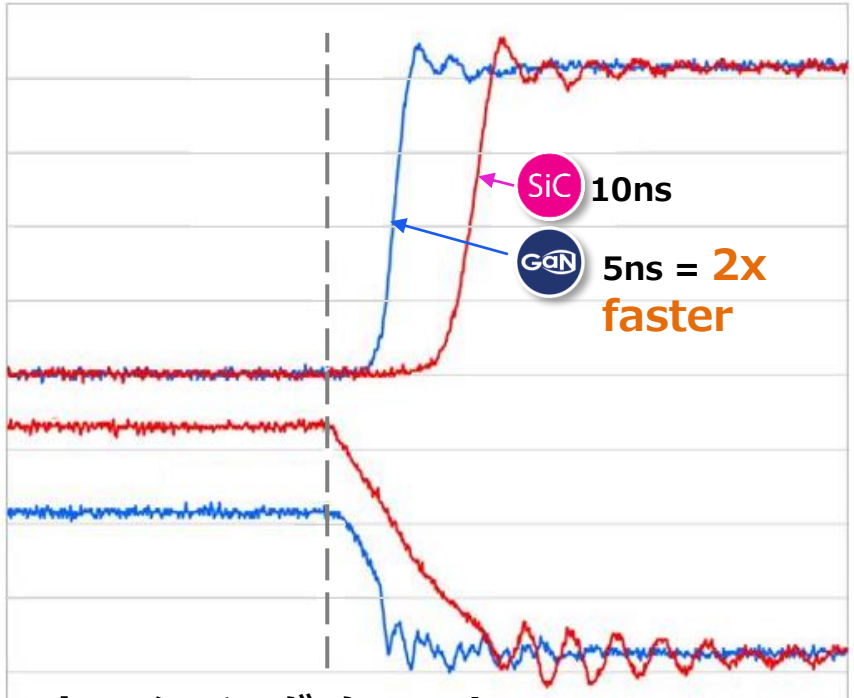
* GS66508 – 650V / 30A / 50mΩ

ハードスイッチング特性比較：GaN vs SiC

このドキュメントで説明されている測定手法を使用して、GaN　SystemのE-HEMTのクリーンなスイッチングエッジと高速スイッチング速度を正確にキャプチャしました。これにより、GaNとSiCの比較が可能になります。



ハードスイッチング　ターンオン ($R_{G(on)}$ = 10Ω)



ハードスイッチング ターンオフ ($R_{G(off)}$ = 1Ω)

テスト：400V / 15Aハーフブリッジハードスイッチングダブルパルステスト

- ゲートドライブ: シリコンラボ Si8271. $R_{G(on)}$ = 10Ω, RG(off) = 1Ω
- GaNデバイス: 650V / 30A / 50mΩ
- SiCデバイス:　900V / 35A / 65mΩ

目次

概要

- 測定技術の重要性

GaN E-HEMTスイッチングテスト測定技術

- 短いループが重要
- ローサイド電圧プローブ
- ハイサイドフローティング電圧プローブ
- 高速GaN E-HEMTの電流検出

ダブルパルススイッチングテスト

- ダブルパルススイッチテストのセットアップ
- 400V / 30Aハードスイッチングターンオンおよびターンオフテスト結果

スイッチングエネルギーEon / Eoff測定

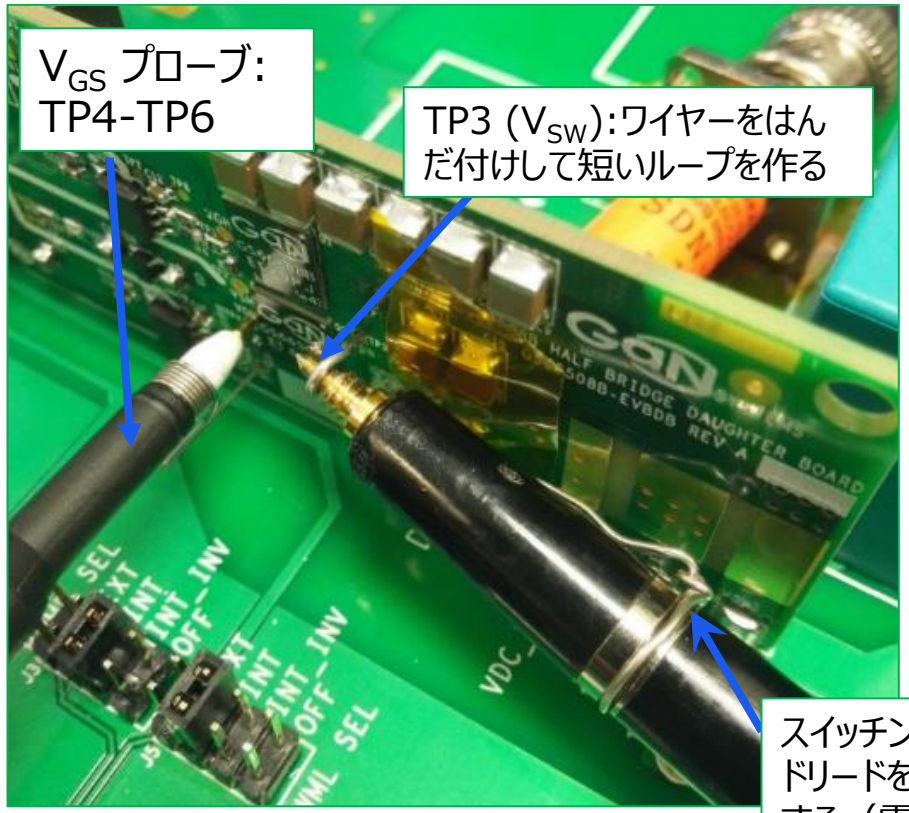
- V_{GS}、V_{DS}、I_{DS}プロービングテクニックによる測定精度の向上
- GaN E-HEMTのスイッチング損失分布
- E_{QOSS}測定例
- 400V / 30A Eon / Eoffテスト結果

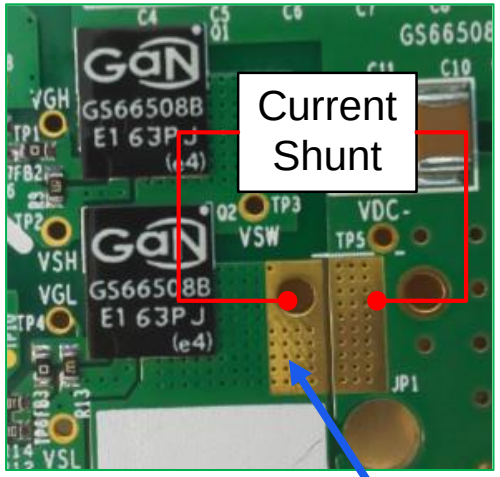
まとめ

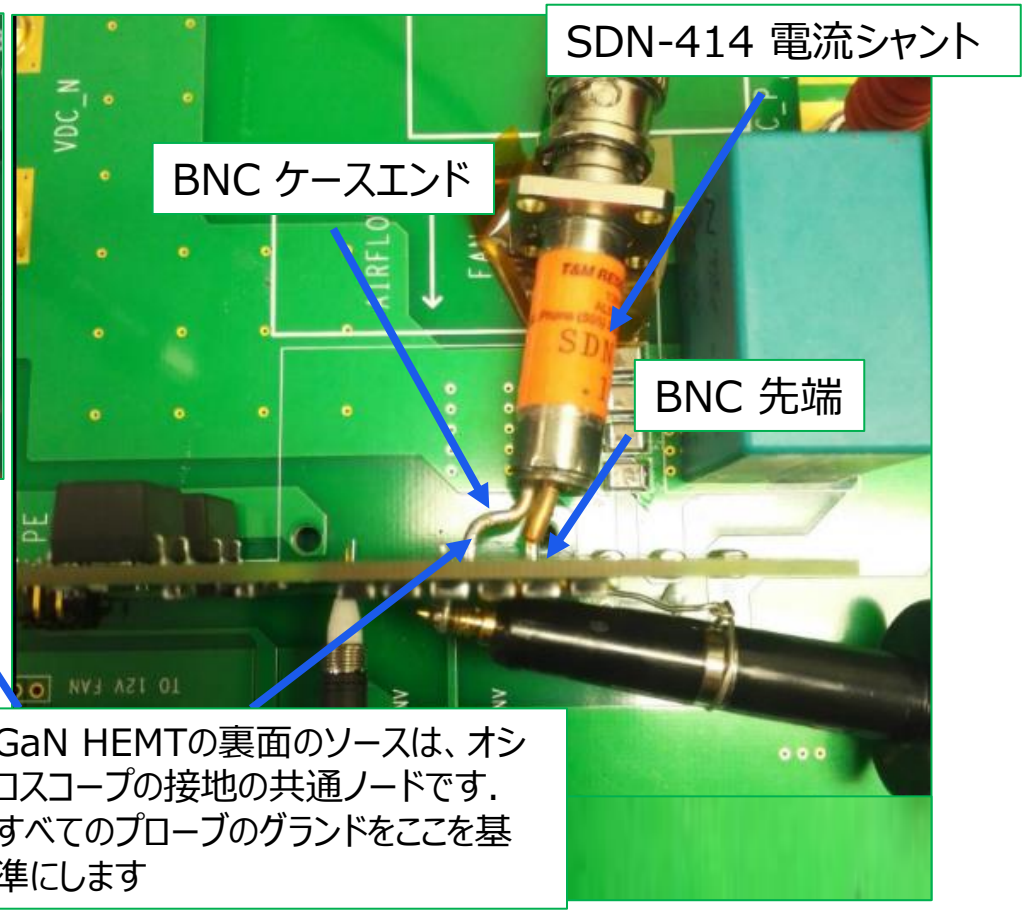
付録：帯域幅要件

Eon/Eoff 測定技術

- GaN SystemsのドーターボードEVBは、GaN E-HEMTスイッチングロスを測定によく使用れます.
- 電流シャント抵抗は Eon/Eoff 測定を行うためにベストな選択です.
- EVBは、T＆M Research SDN-414高帯域同軸電流シャント を使用できるように設計されています.





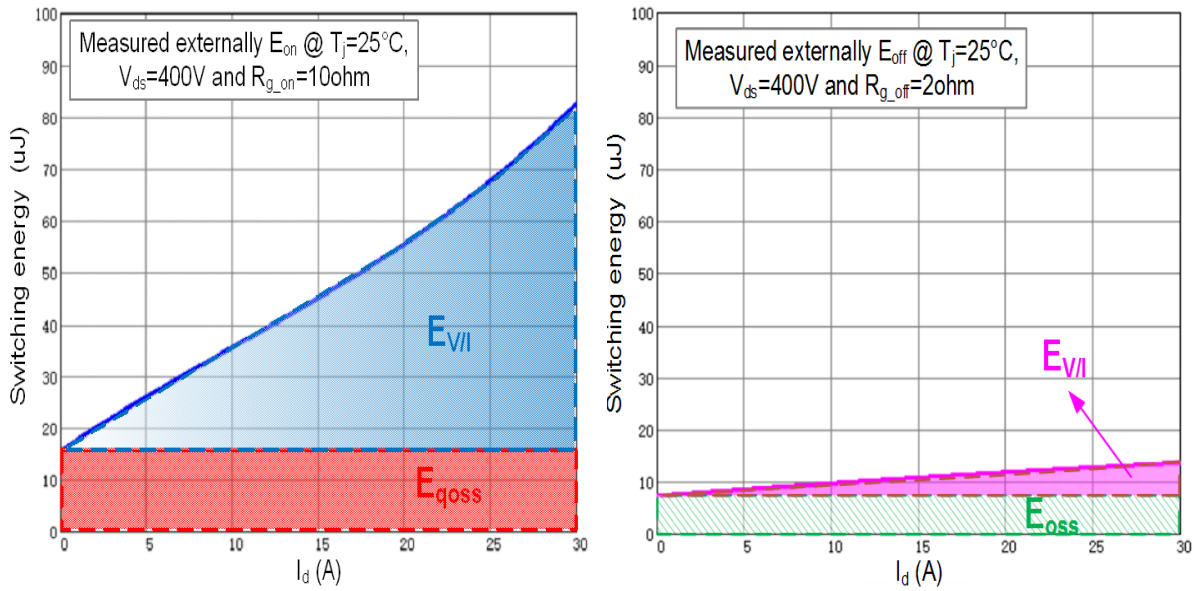


GaN E-HEMTs Eon/Eoff スイッチングロス分布

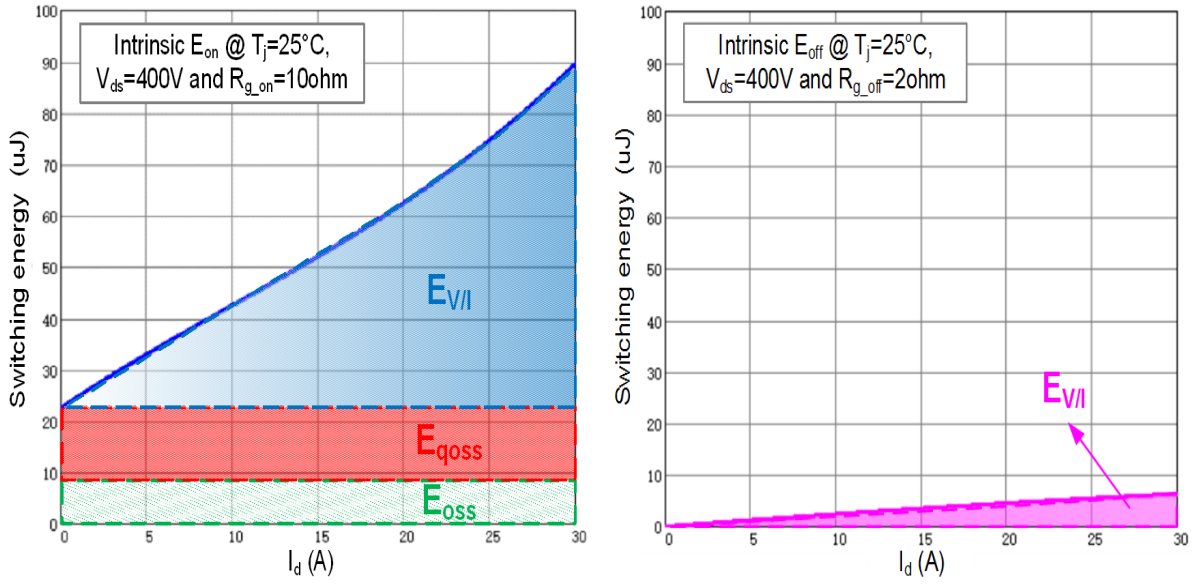
電圧転流期間中、デバイス内で発生するEon/Eoffは、測定によってキャプチャされるものとは少し異なります。

ロス分布	外部測定	デバイス内部の損失
E_{on} - ターンオンロス	$E_{VIon} + E_{qoss}$	$E_{VIon} + E_{qoss} + E_{oss}$
E_{off} - ターンオフロス	$E_{VIoff} + E_{oss}$	E_{VIoff}

- E_{qoss} と E_{oss}の損失は、特に軽負荷動作条件下で、全体のEon損失に影響します.
- 正確なE_{qoss}とE_{oss}の損失は計算が必要で、その説明は<u>GaN HEMTのハードスイッチングにおける寄生容量のEqoss 損失のメカニズム、計算、および測定</u> を参照ください.



外部からの測定による損失



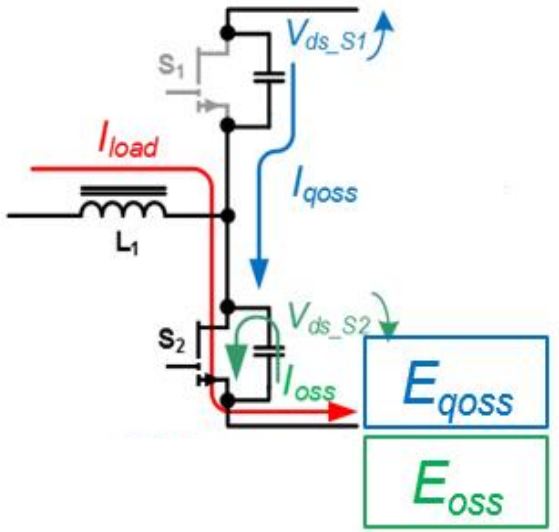
本質的なデバイスの損失

Eon スイッチングロス

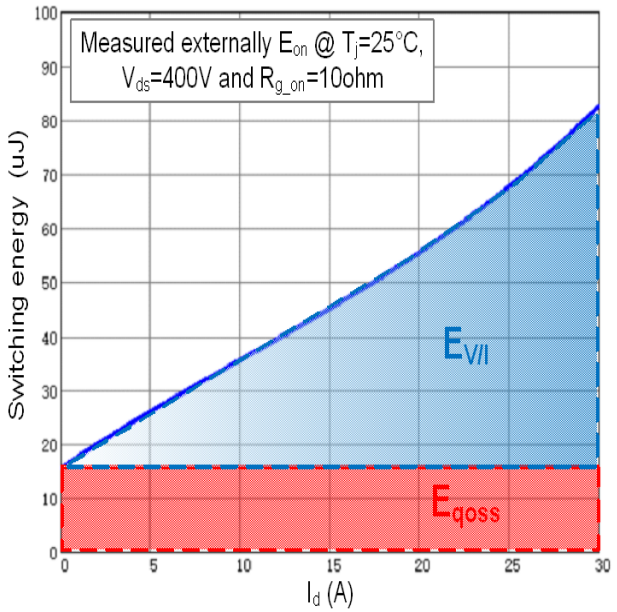
E_{VIon}損失:スイッチング中の電圧と電流の重なり合う損失.

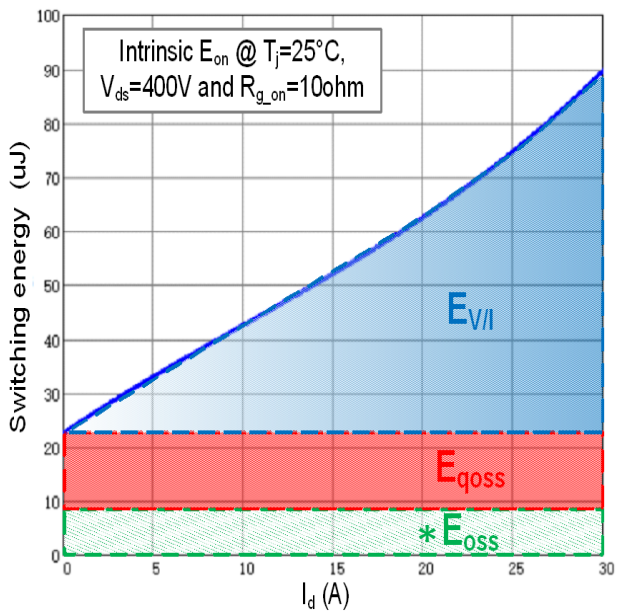
E_{oss} 損失:S2のC_{oss}の放電.デバイス内で発生しオシロスコープ測定ではキャプチャできません*.

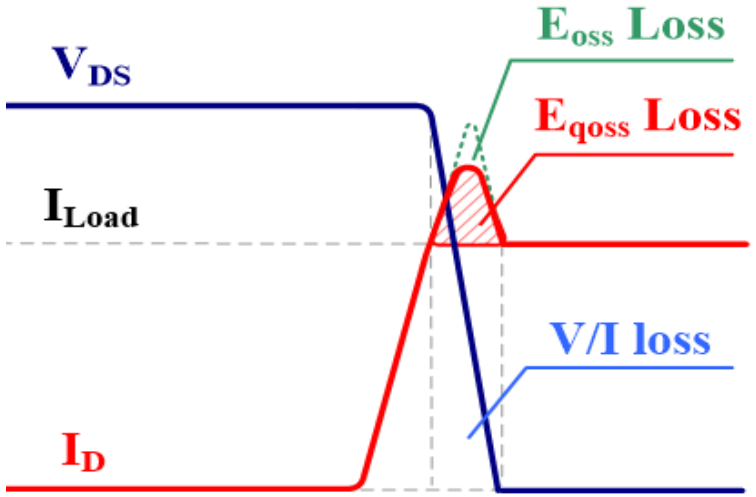
E_{qoss}損失:ハイサイドデバイスであるS1のC_{oss}の充電. S1は導通していないため、
C_{oss}はS2を通じて充電されます.



外部から測定の損失	真の損失
$E_{VIon} + E_{qoss}$	$E_{VIon} + E_{qoss} + E_{oss}$





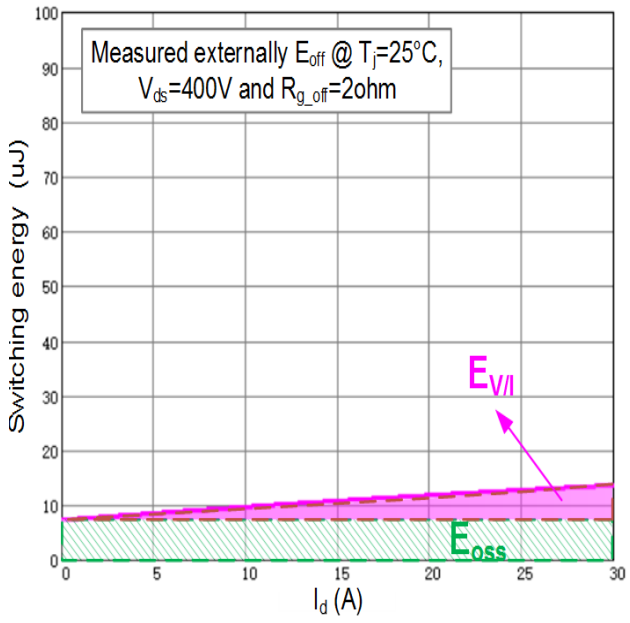
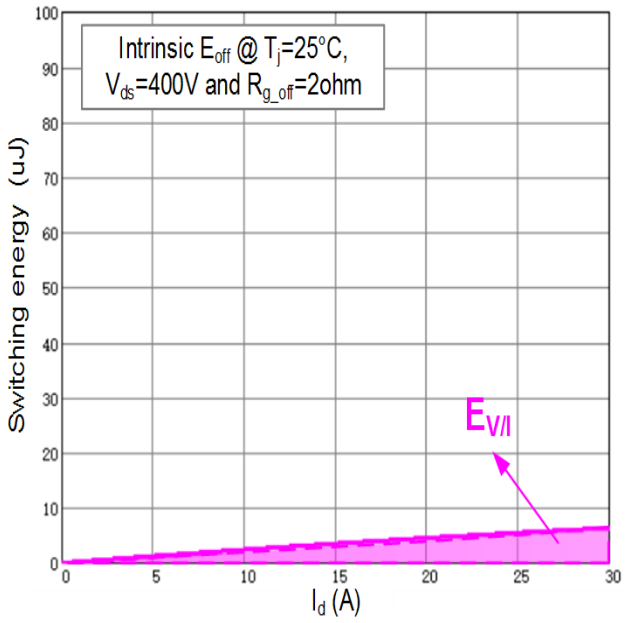


ハイサイドのC_{oss}の変位電流により
IDS電流のスパイクが発生します.

Eoff スイッチングロス

E_{VIoff} 損失:スイッチング中の電圧と電流の重なり合う損失です.

E_{oss} 損失: E_{oss} 損失はターンオフの一部としてオシロスコープで測定されるかもしれませんが、
次のスイッチターンオン時にS2で消費されます. つまり、正しくはターンオン損失に含まれます.

External loss measurements	Intrinsic device losses
$E_{VIoff} + E_{oss}$	E_{VIoff}
	

ターンオフ期間中:

- $V_{GS} < V_{GS(th)}$の場合
  - E-HEMTは導通していません.
  - I_{load} はC_{oss} 充電→回生電力= E_{oss} @ V_{DS}. この期間中、実際の損失はありません.
- 測定されたE_{off}には、C_{oss}エネルギーが含まれます. これはターンオフ損失の一部ではありません. 代わりに、次のスイッチのターンオン時に消費します.
- 負荷電流は、V_{GS}ではなく、ターンオフdV/dtと立ち上がり時間を定義します.

GS66508 Eon/Eoff テスト結果

Eon = 15uJ @ V_{DS}=400V, I_D=0A (Eqoss Loss* only)

プローブのチャンネルのデスキューは、正確なEon/Eoffテスト結果にとって重要です。 デスキューにより、すべての電流プローブと電圧プローブの遅延が同じになります。 Vdsに対して現在のシャントチャネルタイミングを手動で調整します． Idの立ち上がりエッジはVdsの立ち下がりエッジと一致する必要があります。

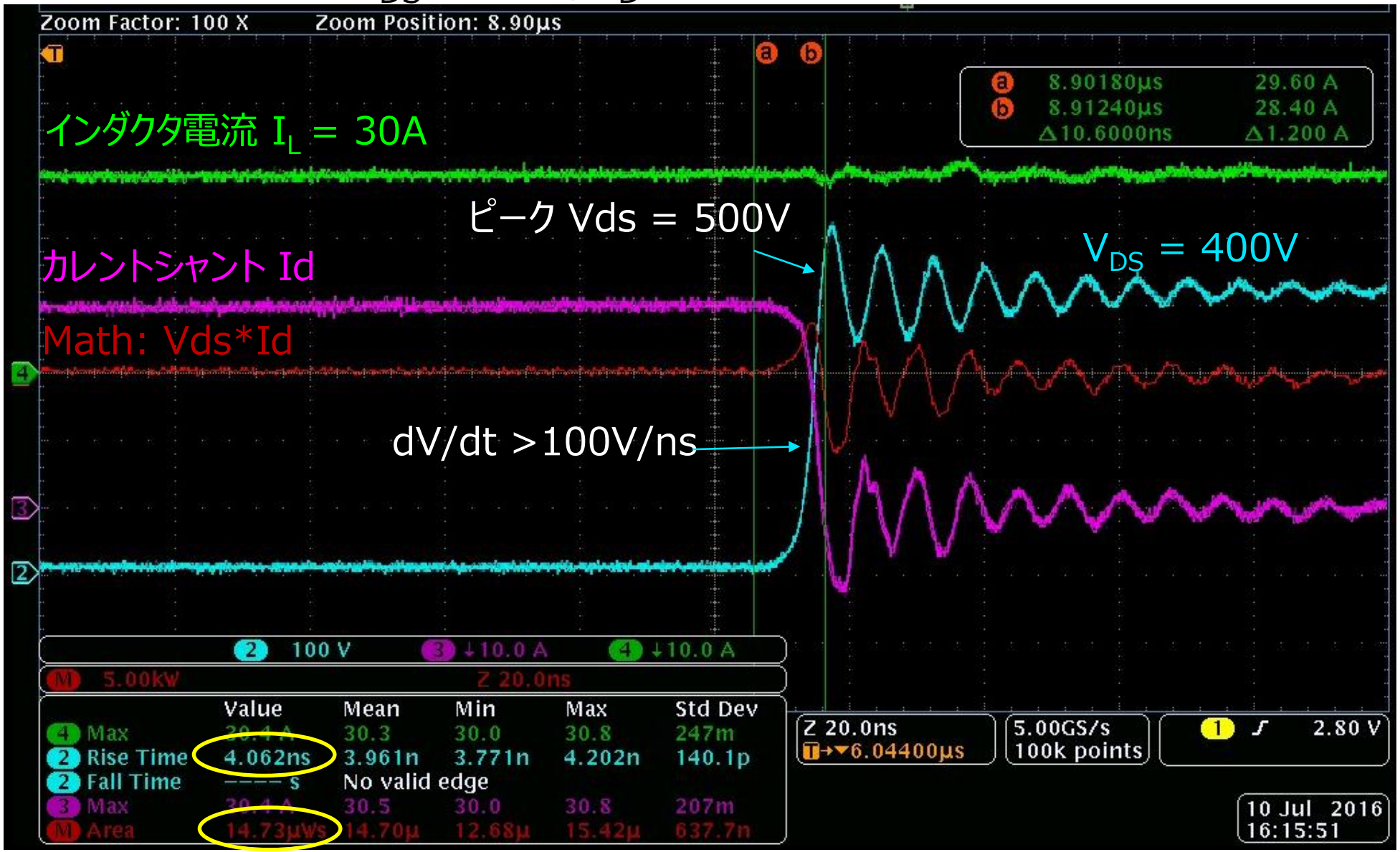
*詳細のEqoss 損失は、次のリンク、APEC'18 の文献を参照ください:https://gansystems.com/wp-content/uploads/2018/04/APEC18-Parasitic-Capacitance-Eqoss-Loss-Mechanism-Calculation-and-Measurement-in-Hard-Switching-for-GaN-HEMTs.pdf

GS66508 Eon/Eoff テスト結果: Eon

Eon = 87uJ @ V_{DS}=400V, I_D=30A

GS66508 Eon/Eoff テスト結果: Eoff

Eoff = 15uJ @ V_{DS}=400V, I_D=30A



Eoffの測定例です． スコープショットは、dV/dt>100V/nsのGaN E-HEMTの超高速のスルーレートを正確にキャプチャしています．

高速スイッチングにより、スイッチング損失が非常に低くなり、高いスイッチング周波数でも高効率の動作が可能になります．

目次

概要

- 測定技術の重要性

GaN E-HEMTスイッチングテスト測定技術

- 短いループが重要
- ローサイド電圧プローブ
- ハイサイドフローティング電圧プローブ
- 高速GaN E-HEMTの電流検出

ダブルパルススイッチングテスト

- ダブルパルススイッチテストのセットアップ
- 400V / 30Aハードスイッチングターンオンおよびターンオフテスト結果

スイッチングエネルギーEon / Eoff測定

- VGS、VDS、IDSプロービングテクニックによる測定精度の向上
- GaN E-HEMTのスイッチング損失分布
- EQOSS測定例
- 400V / 30A Eon / Eoffテスト結果

まとめ

付録：帯域幅要件

まとめ

GaN Systems GaN E-HEMTの超高速スイッチングを正確に特性評価するには、
テスト方法に注意を払う必要があります.

このアプリケーションノートでは、適切な測定機器と測定技術の概要を説明しました.
また、一般的なトランジスタ特性テストとして、
ダブルパルススイッチングテストとEon/Eoffテストを示されました.

このドキュメントにより、パワーエレクトロニクスの設計者がGaN Systems E-HEMTを正確に特性評価し性能の最適化や差別化されたパワーシステムの設計ができることを期待します.

付録：測定の帯域幅

測定帯域幅は、オシロスコープとプローブの機能によって決定されます:

$$Bandwidth_{measurement} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Bandwidth^2{}_{Scope}} + \frac{1}{Bandwidth^2{}_{Probe}}}}$$

帯域の制限による遅延:

$$t_{rise} \approx \frac{0.35}{Bandwidth_{measurement}}$$

共振周波数:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{loop} \cdot C}}$$

L_{loop}: ループ寄生インダクタンス
C: 寄生キャパシタンス

GaN E-HEMTの超高速スイッチングの遷移と低寄生容量のため、測定には広帯域幅の機器が必要です．詳細な推奨事項については、7～9ページを参照してください

* 等式の引用：Tektronix：Understating Oscilloscope Bandwidth, Rise Time and Signal Fidelity

Tomorrow's power today™

Product and application support at

gansystems.com