

デバイス内部のゲートソース間電圧の推定

長尾 崇弘 内木 英喜 七森 公碩

要旨

近年、パワエレ機器において次世代半導体が注目されており、GaN は高周波駆動による電力変換器の小型化が期待されている。しかし、GaN のゲート耐圧は 6 V 程度であり、スイッチング時の電圧振動によって耐圧破壊する懸念がある。本研究では、デバイスの ON 時においてパッケージや配線の寄生成分を含めたモデリングを行い、デバイス内部のゲート電圧振動を推定する手法を提案する。実測ではゲート電圧はソースインダクタンスの影響が大きいため耐圧を超えて振動していたが、モデルより内部のゲート振動は小さく耐圧の範囲内であることを推定した。

1. はじめに

近年、気候変動の影響が顕著になる中、環境への配慮がますます重要視されている。それに伴い、カーボンニュートラルへの取り組みが世界中で加速しており、日本においても 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略が宣言された⁽¹⁾。カーボンニュートラルの達成に向けてパワエレ技術の進展が大きく期待されており、SiC や GaN などの次世代半導体の普及は、パワエレ機器の普及や省電力化に大きく寄与する⁽²⁾⁽³⁾。これらの次世代半導体は、従来の Si 半導体に比べバンドギャップや絶縁破壊電界などの物性に優れる。特に GaN 半導体は HEMT 構造をとれることが知られており、AlGaIn/GaN 界面に形成される 2 次電子ガスを電流経路として使用することが可能となる⁽⁴⁾。これにより同じ ON 抵抗デバイスにおいて入力容量を下げる事が可能となり、高周波駆動による電力変換器の小型、高効率化が期待される⁽⁵⁾。

電力変換器において、パワーデバイスの ON/OFF によって電力制御が行われる。ON 時は損失を低減するため電流経路のオン抵抗を十分小さくする必要があり、ゲートソース間に十分な電圧を印加し電流経路を確保するオーバドライブが用いられる。GaN の場合、オーバドライブを行うためには 4.5 V 以上の電圧が必要となる一方、ゲート耐圧は 6 V 程度と小さく、印加電圧と耐圧までのマージンが小さい⁽⁶⁾。その結果、ゲートソース間耐圧に余裕がなく、高速スイッチングによる電圧サージやその後の電圧振動によって容易に耐圧を超えてしまい破壊する懸念がある。この課題を解決するため、半導体メーカでは、瞬間的なゲート耐圧を規定したり⁽⁷⁾、ゲート耐圧を高くした GaN デバイスの開発に取り組んでいる⁽⁸⁾。

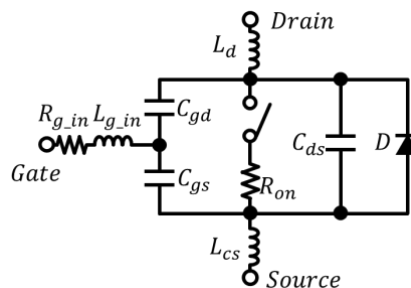
また、デバイスのチップは異物保護などのため樹脂モールドでパッケージングされており、ゲートソース間を直接測定することはできない。パッケージ外部にある電極端子の電圧は測定可能だが、その場合、チップから電極端子までの寄生成分の影響を受けてしまい、正確な電圧を把握することが困難である。

本研究では、電力変換器で一般的に使われるハーフブリッジ回路において、デバイスのターン ON 時の挙動を配線やデバイスのパッケージ内部の寄生成分を含めてモデル化することによって、デバイス内部のゲートソース間容量に印加されている電圧振動の推定手法を提案する。

2. ターンON時の回路モデリング

本研究では、ハーフブリッジ回路における Lo サイド側のターン ON 時のスイッチングをモデリングする。

図1 GaNデバイスの等価モデル

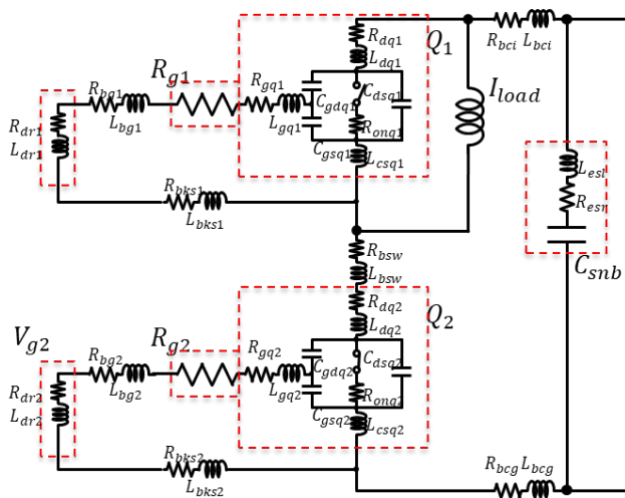


2.1. パワー半導体デバイスの寄生成分

GaN デバイスの等価モデルは、図 1 のように表される。一般にゲート電圧はゲートソース間容量 C_{gs} の電圧を指す。しかし、前述のとおり実際の測定ではパッケージ内部

の共通ソースインダクタンス L_{cs} をはじめ、配線の抵抗やインダクタンスの影響が含まれてしまい、 C_{gs} 電圧を測定することは困難である。

図2 寄生成分を含めた等価回路

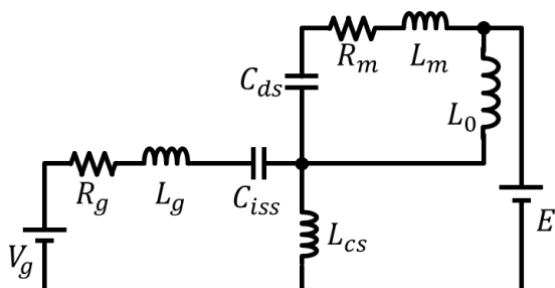


2.2. モデルの構築

理想的なハーフブリッジ回路に、半導体デバイスやデバイスを実装する配線基板の寄生成分を含めた等価回路を図2に示す。ターンON中に流れる直流電流を考慮するため、Hi サイドのドレインソース間にL 負荷を接続している。直流電流は、計算時にL 負荷電流に初期値を与えることによってモデルに反映する。Lo サイドのターンON時は、Hi サイドはOFF、Lo サイドがON となっている。したがって、交流電流は、Hi サイドは各端子間容量を、Lo サイドはチャネル抵抗を、そしてバイパスコンデンサ C_{snb} を経由した経路を流れる。直流電流は電源からL 負荷を経由して流れる。

図3にゲート電圧振動を表現するための簡易モデルを示す。

図3 Loサイド側のターンON時の簡易モデル



Lo サイド Q2 は ON 状態であるため、チャネル抵抗は小さく無視できるものとする。その場合、ゲートソース間容量 C_{gs} は帰還容量 C_{gd} を含めた入力容量 C_{iss} として表現され、本モデルでは C_{iss} に印加される電圧をゲート電圧と定義する。Hi サイド Q1 はドレイン、ソース、ゲート

の各端子間容量の合成容量を考えた時、ドレインソース間容量 C_{ds} が支配的になることから C_{ds} を反映する。また、交流電流の経路に存在する抵抗成分、インダクタンス成分は、 R_m 、 L_m として表現する。さらに、Lo サイドゲート駆動回路に存在する抵抗成分、インダクタンス成分は R_g 、 L_g と表現し、ゲートソース間に印加する電圧は V_g とする。

Hi サイドゲート駆動回路に存在する抵抗成分、インダクタンス成分は、ターンON時の挙動には影響しないため、本モデルでは省略する。

バイパスコンデンサ C_{snb} は C_{ds} と比較して十分大きい。ため、交流経路においては電源とみなすことができる。この際、直流経路の電源と兼ねることができ、本モデル上では電源Eとして扱う。

3. 評価検証

3.1. パラメータと初期条件の決定

本モデルの妥当性を検証するため、簡易モデルの各パラメータにデバイスや基板パラメータの値を代入し電圧波形を算出した。表1に電圧波形の算出に用いたパラメータ一覧を示す。

動作条件として、電源電圧を100V、L 負荷に流れる初期電流を12Aとした。スイッチング時の挙動を模擬するため、時間 $t=0$ において、電源電圧Eを $0 \rightarrow 100V$ 、Lo サイドゲート電圧 V_g を $0 \rightarrow 5.2V$ にそれぞれステップ応答させることによってモデルの電気的状態を変化させ、電圧波形を算出した。

GaN デバイスは、EPC2010C を用いた。ターンON時の直前にHi サイド、Lo サイドそれぞれのデバイスに印加されている電圧を考慮し、 C_{iss} は $E \div 0V$ 時の値、 C_{ds} は $E = 100V$ 時の値をそれぞれデータシートより用いた⁽⁷⁾。共通ソースインダクタンス L_{cs} は、300 pH を用いた⁽⁹⁾。基板の抵抗成分、インダクタンス成分は、後述する実機のデータと比較するため、基板の設計データをANSYS Q3D Extractor を用いて解析を行い、該当するパラメータを抽出した。

表1 パラメータ一覧

記号	パラメータ	記号	パラメータ
R_m	0.5 Ω	C_{iss}	420 pF
L_m	7.8 nH	C_{ds}	240 pF
R_g	11.5 Ω	L_{cs}	300 pH
L_g	19.8 nH	L_0	174 μH
E	$0 \rightarrow 100V$	V_g	$0 \rightarrow 5.2V$

3.2. モデルの妥当性の検証

電圧振動モデルの妥当性を評価するため、ダブルパルス評価にて実機との比較評価を行った。ゲート電圧の測定には、できる限りデバイス近傍にプロービング端子を設けて光絶縁プローブ (TIVP05 Tektronix 製) を用いて測定した。実測波形とモデリング波形の比較を図 4 に示す。破線が実測波形、実線がモデリング波形である。図 4 の比較波形では、ターン ON がはじまり Lo サイドのチャンネルに電流が流れ始めた時間を 0s として示している。今回のモデルにおいて、デバイスの過渡時の変化は考慮していないため波形は重なり合っていないが、波形の形状、及び振動周波数は、高い精度で一致している。実際、モデリング波形の振動周波数は、114.9 MHz であり、実測波形の振動周波数は 117.9 MHz であるため、その誤差は 2.5 % であった。

ゲート電圧のピーク値を比較すると、モデリング波形のピーク値は 8.51 V であったのに対し、実測波形のピーク値は 7.42 V であり、その誤差は 12.8 % であった。これは、モデリング波形ではスイッチングの挙動を模擬するため E_v、V_g をステップ応答させているため、実測と比較して変化が急峻であり、その結果、ゲート電圧のピーク値に差異が生じたと考えられる。

3.3. デバイス内部のゲート電圧の推定

本モデルを用いて、実際のデバイス内部のゲート電圧 (本モデルにおける C_{iss} 電圧) の推定を行う。図 5 にモデルから算出した同条件における C_{iss} の電圧波形を示す。図 5 からわかるとおり、C_{iss} 電圧の振動は実際に測定可能な L_{cs} を含んだ電圧と比較して振動が小さく、ピーク電圧は 5.80V であり耐圧の範囲内に収まっている。これは、ターン ON 時に電流が変化することでインダクタンスに発生する逆起電力の影響が大きいことを示している。発生する逆起電力 V の大きさは、ドレイン電流変化量 dI_d/dt を用いて式 (i) で表される。

$$V = L_{cs} * \frac{dI_d}{dt} \dots\dots\dots (i)$$

L_{cs} は 300 pH と小さいが GaN は数 ns オーダーで電流が変化するため、ドレイン電流の変化量が大きいため発生する起電力が大きく、測定される電圧波形と実際のデバイス内部のゲート電圧に大きな差異が生じていると考えられる。スイッチング開始直後のゲート電圧の大きな沈み込みも L_{cs} の影響と考えられる。モデルより推定した波形によって、デバイス内部のゲート電圧についてピーク電圧は実測値よりも小さく、また、測定に見られるような大きな電圧振動はしていないと考えられ、GaN のようなゲート耐圧が小さなデバイスにおいても、問題なく動作できているとみなすことができる。これにより、スイッチング速度をよ

図4 モデリング波形と実測波形の比較

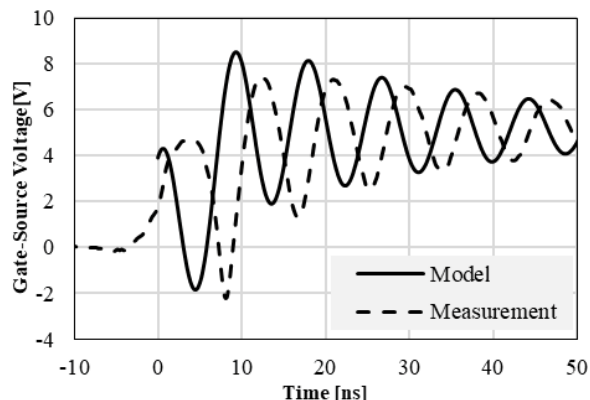


図5 モデルより算出したデバイス内部のゲート電圧波形

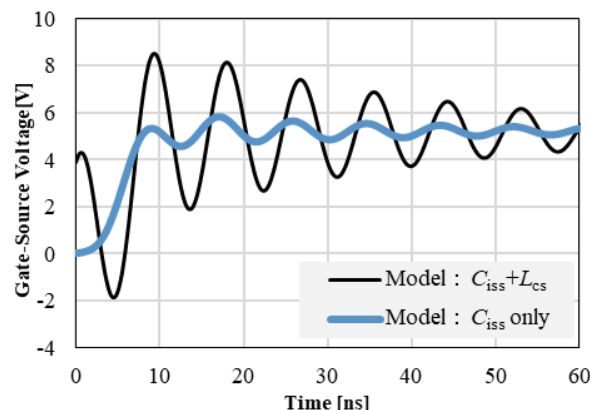
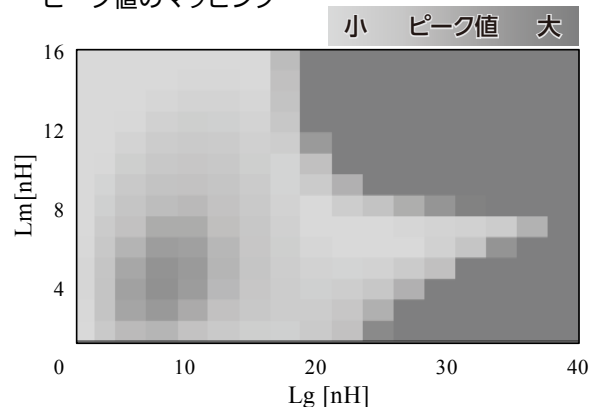


図6 L_m, L_gを変化させたときのゲート電圧のピーク値のマッピング



り高速にしたり印加するゲート電圧を大きくしたりすることが可能となり、スイッチング損失を低減することが可能となる。

図 6 にモデルにおける 2 つのインダクタンス L_m と L_g をパラメトリック変化させた時のゲート電圧のピーク値マッピングを示す。一般にスイッチング回路におけるインダクタンスは小さくすることが要求されるが、図 6 より単にインダクタンスを小さくすればピーク値が最小になるわけではなく、2 つの値をバランスよく設計することにより、ターン ON 時のゲート電圧振動のピーク値を抑えることが可能となる。

4. まとめ

本研究では、一般的なスイッチング回路であるハーフブリッジ回路において、デバイスパッケージや基板に含まれる寄生成分を加味したターン ON 時の回路モデルを作成した。本モデルを用いることによって、実際には測定が困難なデバイス内部の挙動を推定する手法を示した。GaN を用いてスイッチングを行う場合、ゲート耐圧が小さくターン ON 時のサージやその後の振動によって容易に耐圧破壊してしまう可能性がある。高速スイッチングによって電流変化が大きい場合、コモンソースインダクタンスの逆起電力によって実測波形とデバイス内部のゲート電圧には大きな差異が生じてしまうが、本モデルを用いてデバイス内部のゲート電圧を推定することにより、耐圧超えの判定を行うことが可能となる。これにより GaN の特徴である高速スイッチング、低損失を活かしたパワエレ機器の小型、高効率化が実現できる。

参考文献

- (1) 内閣官房ほか:2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2021年, 6, (2021)
- (2) 高橋良和, 両角朗, 西村芳孝:パワーエレクトロニクスを支えるパワー半導体モジュール技術の最新動向, In マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 第 26 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (pp, 15-22), 一般社団法人 エレクトロニクス実装学会, (2016)
- (3) IMAOKA, J:カーボンニュートラルへ向けたパワーエレクトロニクス技術動向と磁気部品の実用技術-高電力密度/高効率化/モデリング, 日本 AEM 学会誌, 30(1), (2022)
- (4) 菅沼克昭:SiC/GaN パワー半導体の実装と信頼性評価技術pp, 54-59, (2014)
- (5) 吉野学, 竹内悠次郎, 大井幸多, 中島昭:パワー半導体デバイスの最新動向, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), 144(3), 186-192, (2024)
- (6) Efficient Power Conversion Corporation:EPC2010C Datasheet, Revised April 2021
- (7) GaN Systems:GS66516T Datasheet, Rev211025
- (8) ローム株式会社ホームページ
https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2022-03-23_news_gan-hemt&defaultGroupId
- (9) David Reusch(Efficient Power Conversion Corporation) : White Paper:WP009, (2020)

著者



長尾 崇弘
研究開発部



内木 英喜
研究開発部



七森 公碩
舞鶴工業高等専門学校