

# 論文の要旨

氏名 溝口 健

論文題目 **Compact Modeling of Gallium-Nitride-based High Electron Mobility Transistor for High-Power Circuit Applications**  
(高電力用途における窒化ガリウム高電子移動度トランジスタのコンパクトモデル)

パワー半導体はインバータ回路やコンバータ回路に広く利用されており、電力のスイッチングや変換、モーター制御等で必須となる半導体素子である。パワー半導体に要求される性能として、低損失・高速動作・低スイッチングノイズが一般的に求められており、現在主としてシリコン(以下、**Si : Silicon**)系・パワーデバイスが用いられている。しかし、更なる高耐圧化への期待が高まっているなか、これら **Si** 系パワーデバイスは物理的な性能限界に近づきつつあり、この性能限界を打破する新たなパワーデバイスに向けた構造や材料が模索されている。

近年 **Si** 系パワーデバイスの性能限界を大幅に打破するポテンシャルを有する半導体材料として注目されているのが、炭化ケイ素(以下、**SiC : Silicon Carbide**)や窒化ガリウム(以下、**GaN : Gallium Nitride**)、そしてダイヤモンドなどのワイドバンドギャップ半導体である。これらワイドバンドギャップ半導体は **Si** のバンドギャップが  $1.12\text{eV}$  に対して、3~5 倍の広いバンドギャップを有し、高耐圧・低損失の素子が実現可能である。特に **GaN** 素子については、ワイドバンドギャップであるが故の高耐圧や低損失に加え、**AlGaN/GaN** 界面で生じる分極により形成される高濃度の2次元電子ガス(**2DEG : Two-Dimensional Electron Gas**)層に起因した高周波動作に優れた特性を持つことが挙げられる。よって本稿では、次世代パワーデバイス候補の中で、パワーエレクトロニクス回路に求められる高耐圧・低損失性に加え、高速動作性を兼ね備える **GaN-HEMT(High Electron Mobility Transistor)**に焦点を当てて研究を進めた。

回路シミュレータを用いた半導体回路設計を行うにあたり必須となってくるのが、半導体素子の各端子における端子電圧と端子電流の関係を方程式や微分方程式で表現したデバイス・コンパクトモデル(以下、コンパクトモデル)である。回路シミュレータが回路特性を予測する際に、コンパクトモデルから計算される各デバイスの特性を回路全体として満足するように高次の連立方程式を解くことを高効率に実施している。よって、コンパクトモデルの精度が回路シミュレーション特性予測の精度に大きく左右する。近年のパワーエレクトロニクス回路における高速動作かつ低損失なシステムの要求に対し、回路シミュレーションを活用して、スイッチング時に発生するノイズや回路の変換効率といった回路における挙動を考慮しながらパワー半導体素子を設計する取り組みが積極的に行われている。高速かつ低損失なパワーエレクトロニクス回路を迅速に実現するにあたって、パ

ワー半導体の特性を原理に従って正確に表現したコンパクトモデルが非常に重要な鍵となってくる。

現在のパワーエレクトロニクス回路で用いられている素子のほとんどについて、標準化されたコンパクトモデルは存在しておらず、回路シミュレータに既に組み込まれている既存素子を組み合わせる経験的に特性を表現したサブサーキットモデルを作成するのが一般的である。しかし、サブサーキットモデルは様々な素子に即座に対応できるというメリットがある一方、デバイス内で起こる様々な物理現象を回路シミュレータ側から得られる情報を用いて外付け素子として表現するため、モデル構成が複雑化しやすく、製造バラつきに起因した特性の変化に追従できないなど、モデルとしての汎用性が低いという問題がある。一方、コンパクトモデルはデバイス内で起こる物理現象をモデル内部の変数や素子の寸法情報を用いながら数式化するので、製造バラつきに起因した特性の変化に追従し易いというメリットがある。

そこで本稿では、新規に GaN-HEMT パワー素子向けコンパクトモデルである「HiSIM-GaN」を開発した。GaN-HEMT パワー素子向けコンパクトモデルを開発するにあたり、表面ポテンシャルをベースとした最初の MOSFET 用コンパクトモデルである HiSIM(Hiroshima-university STARC IG-FET Model)モデルに倣って、デバイス内ポテンシャル分布とキャリア濃度の関係を記述した Poisson 方程式に加え、高耐圧素子向けに低濃度ドリフト層における非線形抵抗効果や自己発熱効果を考慮した HiSIM\_HV モデルを拡張して、HiSIM-GaN モデルの開発を実施した。開発した HiSIM-GaN は 2 つの GaN-HEMT 特有の物理現象を組み込んでいることが大きな特徴である。1 つは高電圧印加時に加速化された 2DEG 電子が、AlGaN/GaN 界面や GaN 層中の結晶欠陥へトラップされることで実行的に 2DEG 濃度が低下することによってオン抵抗が増加する「電流コラプス現象」と、もう 1 つは高電圧印加時におけるゲート端での電界集中を緩和し、電流コラプス現象を抑制しながら高耐圧化を実現できる「フィールドプレート」である。本稿では特にフィールドプレート容量モデルの開発と、トラップ現象とフィールドプレート容量を組み込んだコンパクトモデル HiSIM-GaN を用いて回路解析を実施し、効率とスイッチング波形におけるトラップ現象とフィールドプレート容量の影響を定量的に解析した。

素子の高耐圧化を目的に用いられるフィールドプレート(FP)は、ゲート端での電界集中を緩和する一方で、電荷の空乏化の影響により追加の容量成分を生じる。一般的に容量特性はスイッチング特性に対して重要な役割を果たすことが知られている。スイッチング素子として GaN-HEMT 素子を利用するにあたり、フィールドプレート容量を加味した素子全体の容量の正確なモデリングが必要不可欠となっている。本稿におけるフィールドプレート容量のモデル化において、各デバイス内の各界面における電荷を考慮したポアソン方程式から求められる表面ポテンシャルを用いることで、より物理的なフィールドプレート容量モデルを新規に開発し、HiSIM-GaN モデルへの組み込みを実施した。2 次元デバイスシミュレーションと実測値を用いた検証の結果、フィールドプレート寸法情報を適切に定義することで、2 次元デバイスシミュレーション結果と実測値の結果を高精度に再現することに成功した。

次に、パワーエレクトロニクス回路で最も基本的な回路である昇圧回路を用いて、昇圧回路の回路効率とスイッチング波形におけるトラップ現象とフィールドプレート容量の影響を解析した。あわせて、実測値から抽出した寄生素子の回路特性に対する影響も同時に解析した。まず測定したスイッチング波形とシミュレーション値との比較において、トラップ濃度の値を、サブスレッショルド電流の傾きから抽出した値から半分程度の値に調整することで実測のスイッチング波形を精度良く再現することができた。また回路効率に関しても同様に、トラップ濃度を DC 特性から抽出した値から半分程度の値に調整することで、高負荷電流領域における回路特性の実測値を高精度に再現できた。この結果から、DC 特性から抽出したトラップ濃度は、静的な状態でのトラップ現象のみ想定しているため、過渡解析にとっては抽出したトラップ濃度は過大に見積もることとなる。実際のトラップ現象は過渡的な現象であるため、浅い準位に捕獲されるトラップ電荷と深い準位に捕獲されるトラップ電荷を同時に考慮しなければならない。つまり、トラップ電荷の時定数を今後モデル内で考慮する必要がある。

次に回路効率におけるフィールドプレート容量の影響をシミュレーションにより検証した。低負荷電流領域においては回路で発生する全損失に対して、スイッチング損失が支配的となる。このとき、GaN 素子に流れる電流が少ないことで出力容量への充電が遅くなる。出力容量にとって FP 構造の影響は非常に大きいことから、FP 構造の影響は、特に低負荷電流時に顕著に表れる。一方、高負荷電流領域においては、全損失に対して導通損失が支配的となる。この導通損失は素子のオン抵抗に依存しており、FP 構造はオン抵抗に影響しないため、回路効率に対する FP 容量の影響は小さい。よって、開発した HiSIM-GaN を用いた低負荷電流領域の回路効率を最適化することにより、FP 構造の最適化が可能ということがいえる。

最後に回路特性における寄生インダクタと寄生キャパシタの影響を調査した。スイッチング波形においては、寄生素子を考慮しないことで、スイッチング時に発生する電流のリングングが抑制されており、結果として低負荷・高負荷電流領域ともに回路効率が 2~3%程度上昇する。スイッチングに発生するリングングは EMI(Electro Magnetic Interface)ノイズを解析するにあたって非常に重要な特性であることから、素子が持つ寄生成分に加えて、回路における寄生成分も同時に考慮することが高精度なパワエレ回路解析にとって非常に重要であるということがいえる。

本稿では、GaN-HEMT 素子特有のエネルギーバンド構造やトラップ現象、さらにはフィールドプレートによる寄生容量を考慮したコンパクトモデル HiSIM-GaN を新規に開発した。また、昇圧回路におけるトラップ濃度やフィールドプレート容量、回路の寄生成分の影響を実測値との比較を行いながら明らかにし、結果として、開発した HiSIM-GaN が回路解析と特性の最適化に十分活用できる可能性があることを示した。今後、本稿で完全に考慮できなかったトラップ現象の時定数を考慮し、浅い準位のトラップ電荷と深い準位のトラップ電荷の正確な抽出方法を確立するということが残された課題である。