

論文の要旨

氏名 山本 貴生

論文題目 **Analysis and Modeling of Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor for Power Electronic Circuit Simulation**
(パワーエレクトロニクス回路シミュレーション用注入加速型 IGBT の解析とモデル化)

近年、自動車産業の分野では環境汚染への対応や化石燃料の枯渇、燃料費の高騰等の問題から低燃費の自動車が求められている。その解決策の一つとして、自動車のハイブリッド化や電動化が急速に進んでおり、電力変換効率の良いパワーエレクトロニクス技術を適用した電化部品の開発が急速に進展している。その中でも、エンジンの補助となるような大電流が必要な製品分野のパワーデバイスは 1000V 以上の耐圧を持つ Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) が主に用いられている。パワーエレクトロニクス製品の性能は IGBT の性能と大きく関わっており、製品性能向上のためにはより高速で損失の少ないデバイスが必要となっている。そのような状況下で、IGBT 構造の改良による特性改善について多くの研究がされてきた。その一つにデバイスの半分に Emitter 電極を作成せず、フローティングにしたいいわゆる Emitter 間引き構造を持つ Injection-Enhanced Insulated-Gate Bipolar Transistor (IEGT) 構造があげられる。IEGT はデバイス内部により多く hole を注入できる構造を取るためバイポーラ特性の伝導度変調により、低 on 抵抗を実現している。また、注入されたキャリアの蓄積の影響で電圧をかけることによって形成される空乏層の伸びが緩やかになるため、従来型の IGBT と比べてスイッチング時の電圧変動が緩やかになり電圧サージが抑えられる特徴がある。この特性は、特にサージによる破壊やノイズを大きく懸念する自動車部品では大きなメリットとなる。一方で、緩やかなスイッチングは損失の増大につながり、低損失とは背反の関係となっている。そのため製品設計時には高精度な IGBT モデルを用いた回路シミュレーションを通して損失とサージを最適化する必要がある。

既存の回路用 IGBT モデルの多くは物理に基づいていないため、駆動条件が変化するような実際の回路設計には適していないという課題があった。HiSIM-IGBT は物理モデルで構成されているが Emitter 間引き構造を持つ IEGT 構造には対応していない。そこで、本研究では HiSIM-IGBT を IEGT 構造へも適用できるようにモデルの拡張を行った。

まずは 2 次元デバイスシミュレーションを用いて、現 HiSIM-IGBT モデルでは考慮されていない Emitter 間引き構造部分の内部状態を解析した。注目すべき点として、IEGT 構造ではある条件下でゲート容量が負になる負性容量特性が報告

されている。この特性は間引き部へ hole が流入する事によって引き起こる potential 上昇とそれに伴うゲート酸化膜周辺への hole の蓄積であることが明らかになった。この現象をモデルに組み込む必要があるため、potential を決定する因子や、hole との動きの関連性を解析した。

IEGT 構造のモデル化アプローチとしては、間引き部の potential を表現する端子の追加と間引き部とゲート間容量モデルを追加することとした。容量モデルは既存モデルの内部ノードと接続することでチャージ、ディスチャージ電流の経路を確保できた。モデル化に際しては、間引き部の構造が変化した場合に汎用性を持つるように濃度や幅、酸化膜厚等は可変パラメータとして導入している。

実回路のスイッチング時には時間経過の概念があるために、間引き部モデルにも時間を考慮したモデルを導入する必要がある。静的な動作の場合にはデバイス内部を動くキャリアの移動には十分な時間があるが、動的な動作にはキャリアの移動時間を考慮する必要がある。実際に 2 次元シミュレーションの解析結果では、IEGT のゲート容量特性には周波数依存が有り、高周波で解析した場合には負性容量が小さくなる事が分かった。そこで、モデルに Non-Quasi-Static (NQS) 効果の考えを導入してモデル化を実施した。デバイスがスイッチする速さに対応したキャリアの遅延がモデルに反映することができた。

開発モデルを使用した回路シミュレーションを実施した。スイッチング波形比較では、実測波形を精度良く再現することができた。これによって、回路シミュレーションを活用してスイッチング波形予測する事が可能になる。今後は、構造パラメータを変化させた場合の損失やサージへのインパクトを検証し、回路シミュレーションで目的の波形が出せる構造パラメータが見積もれるまでモデルの汎用性を広げることで、デバイス構造設計へも生かせるようにしていきたい。