

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	SiC-MOSFETデバイスモデルの開発と高精度回路解析への適用に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	椋木康滋
Author(English)	Yasushige Mukunoki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10925号, 授与年月日:2018年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:萩原 誠,安岡 康一,七原 俊也,千葉 明,藤田 英明,葛本 昌樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10925号, Conferred date:2018/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	椋木 康滋		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	萩原 誠 准教授	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	葛本 昌樹 特定教授	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「SiC-MOSFET デバイスモデルの開発と高精度回路解析への適用に関する研究」と題し、近い将来における大量導入が期待される SiC-MOSFET に着目し、導入時の課題である開発コスト低減と信頼性向上実現を目的とした SiC-MOSFET デバイスモデルの開発、および高精度回路解析への適用を行い、シミュレーションと実験的検証によりデバイスモデルの有効性・妥当性を確認したものである。本論文の研究背景、目的、主たる研究成果を以下に述べる。

本論文の研究背景であるパワーエレクトロニクス、パワーデバイス(SiC-MOSFET)、シミュレーション技術の需要について述べる。パワーエレクトロニクスは、パワーデバイスを利用した電力変換技術の総称である。電力変換技術は系統電源から小型スイッチング電源まで多岐にわたる製品として社会インフラを支える根幹技術である。このパワーエレクトロニクスにおいて、パワーデバイスは電力変換能力を決定する基幹部品である。そのパワーデバイス市場では、現在主流のシリコンデバイスに代わり、シリコンカーバイドデバイス(SiC-MOSFET)が台頭している。SiC-MOSFET はシリコンデバイスに比較し、高速スイッチング動作が可能であり、電力変換に際し発生する損失の低減が期待できる。一方で、高速スイッチング動作に伴う電磁ノイズの発生が問題視されている。このため SiC-MOSFET の活用には高度な設計技術が要求され、その手法の一環としてシミュレーション技術の需要が高まっている。

本論文では、次世代パワーデバイスとして注目されている SiC-MOSFET のデバイスモデルの開発、および過渡特性のシミュレーションについて述べる。また上記デバイスモデルを使用した高精度回路解析の事例として、高周波漏洩電流の解析、および電気・熱連成解析について述べる。以下、本論文の主たる研究成果を列記する。

SiC-MOSFET のデバイスモデルは、出力特性モデル、端子間寄生容量モデル、パッケージ内部の寄生インダクタンスモデル、内蔵ゲート抵抗モデルより構成した。またデバイスを駆動するゲートドライブ回路も等価回路モデルを準備した。

SiC-MOSFET 出力特性モデルの開発では、デバイス断面構造と MOSFET の理論動作式を活用した物理モデル、およびデバイス断面構造が入手不可能な場合でも適用可能な準物理モデルの 2 種類を開発し、高精度化モデルの実現、およびデバイスモデルの汎用性向上を実現した。

出力特性モデル以外の構成要素の評価・モデリング手法について、端子間寄生容量・寄生インダクタンス・ゲートドライブ回路に関して、モデリング時のフローチャートも含めて詳述した。端子間寄生容量の実験評価では、SiC-MOSFET のスイッチング動作を利用した評価手法を新規に考案し、従来モデルでは十分に考慮されていなかった電圧依存性を評価し、デバイスモデルに反映した。寄生インダクタンスの実験評価では、従来手法より容易な LC 共振現象を利用した手

法を新規に考案し、パッケージ内部の微小なインダクタンスを評価した。ゲートドライブ回路も、それを構成するデバイス、フォトカプラを等価回路でモデリングした。

上記のデバイスモデルの有効性・妥当性に関して、高速スイッチング動作の実験波形とシミュレーション波形の比較を行い、両者が高精度で整合することを確認した。ゲート特性まで含めた高速スイッチング動作を高精度にシミュレーションしたデバイスモデルの報告例は無く、本研究のデバイスモデルの高精度シミュレーション能力を確認した。また研究対象とした **SiC-MOSFET** の全定格電流域でシミュレーション精度の検証を実施し、本デバイスモデルがドレイン電流の値に依らず、高精度なシミュレーションが可能であることを確認した。

続いて高精度回路解析の事例として、ヒートシンクを介して流れる漏洩高周波電流の実験とシミュレーションの比較を行い、デバイスモデルの高周波ノイズ解析への有効性・妥当性確認した。また、他の回路解析の事例として電気・熱連成解析を実施した。電気・熱連成解析では、大電流化を実現する並列接続した **SiC-MOSFET** を対象とした。まず電気・熱連成解析のために必要不可欠な技術である温度特性を具備したデバイスモデルを開発した。上記モデルを活用することで、並列接続したデバイス間に温度不平衡が生じた場合の分流現象の高精度シミュレーションを実験で検証した。最後に、連続動作時のデバイス温度を解析する目的で、昇圧チョッパ回路を用いた実験的検証を行い、本デバイスモデルの電気・熱連成解析への有効性・妥当性確認した。これらの回路解析結果を踏まえ、本論文のデバイスは **SiC-MOSFET** を搭載した電力変換装置のシミュレーション設計に有望な技術であると結論付けた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	椋木 康滋		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	萩原 誠 准教授	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	葛本 昌樹 特定教授	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This doctoral thesis describes a compact circuit model for a Silicon-Carbide MOSFET, and its application to accurate circuit simulation.

The equivalent circuit model for a Silicon-Carbide MOSFET consists of the models of output characteristics, internal stray capacitors, stray inductors inside of the discrete package, inner gate resistor, and the gate-drive circuit that operates the DUT (Device Under Test). The physics-based model of the output characteristics is constructed on the basis of the cross-sectional structure of the DUT and principles of semiconductor physics. The semi-physics model is also constructed that is expected to enhance adaptability of this modeling method to other SiC-MOSFETs. The other components of the model such as the internal stray capacitors, the stray inductors, and the gate-drive circuit are experimentally evaluated and modeled according to the newly-considered modeling flow. The stray capacitors are evaluated by analyzing the transient behavior. This evaluation reveals the new voltage dependencies of the internal stray capacitors, and brings the new capacitor models. The stray inductors inside of the discrete package are evaluated by *LC* resonant phenomena.

The accuracy of the developed model is verified by comparison in the transient waveforms between measurement and simulation. The developed model shows accurate simulation of the transient waveforms both the gate circuit and main power circuit behavior simultaneously, which is not realized in previous simulation. The model also features accurate simulation result of the transient waveforms for a whole region of the rated drain current.

Subsequently, this thesis describes the accurate circuit simulation results of the high-frequency leakage current from a heat sink, which indicates the feasibility for further analysis of high-frequency EMI characteristics. The electro-thermal co-simulation of two-parallel connected SiC-MOSFETs also shows accurate simulation of the junction temperature distribution. These results claim that the developed compact model is expect to be a promising circuit-simulation tool for designing the whole power conversion system with SiC-MOSFETs.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).