

京都大学	博士 (情報学)	氏名	中村 洋平
論文題目	電力変換回路におけるパワーモジュールの熱設計に向けた特性測定とモデリング		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文では、シミュレーションに基づくパワーモジュールの熱設計の実現を目的として、パワーモジュールに関する電気特性と熱特性の測定手法、およびそれら特性のモデル化と、高速な温度推定手法を提案している。また、現実のパワーモジュール設計において特に大きな課題となっている、パワーモジュール上に搭載されるトランジスタの特性ばらつきの考慮を可能とする新たな解析手法を提案しており、以下の6章で構成されている。</p> <p>第1章は、序論である。本研究の背景として、高周波スイッチング動作による小型化と高効率化が進むパワーモジュールの構成、およびパワートランジスタの特性について概説している。特に、パワートランジスタとして今後広範な応用が期待されるシリコンカーバイドを材料とする金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (SiC MOSFET) の電気的特性と、パワーモジュールの電気的・熱的特性、およびパワーモジュールの熱設計上の課題について述べている。さらに、パワーモジュールの熱設計に関する既存研究について述べ、本研究の目標と提案手法の概要を示している。</p> <p>第2章では、パワーモジュールの発熱をシミュレーションにより高精度に推定するための基盤となる、SiC MOSFETのデバイスモデルを提案している。提案モデルは、MOS構造の表面電位の計算をもとに、デバイス構造とデバイスの物理的な動作原理にしたがって、その電気特性を表現している。表面電位の計算の際に、チャンネル界面における電荷トラップの影響を新たに考慮することで、20mWから1kWにおよぶ広い電力範囲において、MOSFETの特性を精度よく再現可能とした。提案モデルによるシミュレーション波形は、実測により得られたスイッチング波形と良く一致している。本章では、モデルが適用可能な電力動作範囲をさらに拡大するため、大電力領域での電流電圧特性を自己発熱の影響を抑えて測定する手法を提案している。提案手法により、600V/80A (約50kW相当) という応用上重要な大電力での特性測定が可能となり、その領域においても高い精度が得られるデバイスモデルを新たに考案している。提案する測定とデバイスモデルにより、パワーモジュールが電力変換回路に応用される際の個々のデバイスの振る舞いを、精度よく推定可能とした。</p> <p>第3章では、高精度な温度推定を実現するため、パワーモジュールの熱インピーダンスの特性測定とそのモデリングを提案している。単体MOSFETの過渡熱測定で用いられる手法を応用することで、モジュール上に実装された複数のSiC MOSFET間の熱インピーダンス特性の測定を可能としている。また得られた特性から、フォスター型等価回路に基づいた熱インピーダンスモデルを構築した。これにより、回路シミュレータを用いて、複数のMOSFET間相互の熱干渉を考慮したモジュールの動作と温度の推定が可能となった。サーモグラフィーを用いてパワーモジュール上の温度分布を測定した結果との比較により、提案する熱インピーダンスモデルが、商用SiC MOSFETの動作保証温度 (175°C) を超える200°Cまでの範囲で高い精度が得られることを示している。</p> <p>第4章では、電力変換回路におけるパワーモジュールの発熱および温度を、高精度かつ高速に推定する熱回路連成シミュレーション手法を提案している。従来の熱回路連成シミュレーション手法は、精度と計算時間の両面で課題があった。提案手法では、第2章と第3章で提案したデバイスモデルと熱インピーダンスモデルを組み合わせることで、デバイス温度の推定を高精度化している。さらに、事前の回路シミュレーションにより、発熱と温度の関係をルックアップテーブルとして保持すること</p>			

で、推定を高速化する手法を提案している。時刻ステップを進めるごとに必要となっていた、スイッチング動作からデバイスの発熱を求める計算をテーブル参照に置き換えることで、計算時間を大幅に削減した。論文中の具体例では、従来手法と比較して約4桁高速なデバイス温度推定が可能となっている。

第5章では、より実用的な条件でパワーモジュールの発熱と温度を推定するために、パワーモジュール上に並列に搭載されるデバイスの特性ばらつきを考慮したシミュレーションに関する検討を行なっている。シミュレーション時にデバイス特性ばらつきを考慮するには、各デバイスが製造される際に生じるばらつきを表現できるよう、モデルパラメータを統計量として拡張する必要がある。ただし、全てのモデルパラメータを統計的パラメータとすると、モデル作成のコストが高く、またそのモデルを用いるシミュレーションに要する計算時間が極めて長くなる課題があった。そこで、計算時間を削減するため、回路の特性ばらつきを決定づける少数の支配的なモデルパラメータを感度ベースの解析式により決定する方法を与えた。パワーモジュールの代表的な応用である電力変換回路を例に、支配的パラメータは実際に少数に限られること、またこれらを用いて、従来手法と同等の計算精度を維持しつつ特性ばらつきの影響の見積もりが高速に行えることを示した。

第6章は結言であり、本論文で得られた成果を総括し、また今後の展望や課題について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、シミュレーションによるパワーモジュールの熱設計を実現することを目的として、モジュールを構成するパワーデバイス (MOSFET) の電気特性の新たな測定手法、およびモジュール上の配置により異なるMOSFET間の熱インピーダンスの測定手法を提案し、また、これらをモデル化することでモジュール動作時のMOSFETの温度を高精度に推定する方法を与えている。さらに、モジュール上で並列接続されるMOSFETの特性ばらつきの影響を評価する効率の良いシミュレーション方法を与えている。本論文で得られた成果は以下のように要約できる。

1. 大電力領域でのMOSFETの電流特性を自己発熱の影響を抑えて測定する方法を提案し、その測定結果をもとに、表面電位に基づくMOSFETのデバイスモデルを与えた。提案するモデルは、数十mWから数十kWまでの広い電力範囲において、デバイス動作を精度よく表現することを、実験結果との比較により確認した。
2. パワーモジュール上に配置される複数のMOSFETの自己発熱、およびMOSFET間に生じる熱干渉の高精度なモデル化に寄与する、熱インピーダンスの測定方法を提案した。また測定結果をもとに、フォスター型等価回路に基づく熱インピーダンスの汎用的なモデル化手法を提案した。パワーモジュールを用いた実測評価により、SiC MOSFETの動作保証温度である175°Cを大きく超える範囲で、提案する熱インピーダンスモデルが実測結果をよく再現することを示した。
3. これら提案デバイスモデルと提案熱インピーダンスモデルを組み合わせる高精度な熱・回路連成シミュレーション手法を提案した。本シミュレーションでは、デバイスの発熱と温度との関係をルックアップテーブルに保持することで回路動作による発熱の計算を簡略化し、大幅な計算時間の削減を可能とした。
4. 大電力モジュールの動作において特に重要となるデバイス間の特性ばらつきを、最小個数のモデルパラメータにより表すための高速な解析方法を提案した。

以上、本論文では、パワーモジュールの信頼性を高めるために不可欠となる高精度かつ高速な温度推定の手法を与える成果を得ており、具体的には、発熱の影響を抑えるデバイス特性の測定、モジュール上のデバイス間の熱インピーダンスの高精度測定、およびばらつきを考慮したシミュレーションによる設計指針を提案している。また、いずれの提案についても、実験による検証を行っており実用上の価値も高い。このことから、本論文の内容は、学術上、応用上ともに関連する分野の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士 (情報学) の学位論文として価値あるものとして認める。また、令和5年1月26日に実施した論文内容とそれに関連した事項についての試問の結果、合格と認めた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： 年 月 日以降