

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13707

研究課題名（和文）SiCパワー半導体デバイスにおけるマルチスケール・サーマルモデルの構築

研究課題名（英文）Formulation of multiscale thermal model in SiC power semiconductor device

研究代表者

木伏 理沙子（KIBUSHI, Risako）

富山県立大学・工学部・助教

研究者番号：30781596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電子機器のサーマルマネジメントの高精度化のため、ナノ・マイクロスケールの発熱を考慮することを目的に、マクロ的な条件からナノ・マクロスケールのホットスポットの温度を予測可能な温度予測式の構築の実現性について議論した。ここでは、SiCパワー半導体ダイが搭載されるパッケージを対象に、パッケージの表面温度測定およびCFD解析から、内部の熱的環境を推定し、それを境界条件として熱・電気連成解析に適用することで、ダイ内部に発生するナノ・マイクロスケールのホットスポット温度を評価した。ドレイン電極への印加電圧および冷却面温度をパラメータとして、それらの解析結果から予測式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代パワー半導体を用いた高発熱電子機器において、マクロ的なサーマルマネジメントに加えて微小領域における発熱の考慮により過剰設計が防げる可能性があるため、ナノ・マイクロスケールのホットスポット温度予測式の検討を行った。限定された条件の範囲ではあるものの、予測式の構築の可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is the construction of the prediction equation of a nano/micro scale hotspot temperature from macroscopic thermal/electrical conditions. The prediction equation might make to be high-precision thermal management for power electronics which introduced next-generation semiconductors. In this study, the method of the construction of the prediction equation was discussed. For this discussion, electro-thermal analysis was adopted to evaluate the nano/micro-scale hotspot temperatures in a SiC power semiconductor die. For the provision of the optimal thermal boundary condition in the electro-thermal analysis, first, the heat transfer in the semiconductor package was simulated using CFD analysis. The thermal boundary condition was applied to the electro-thermal analysis, and the nano/micro scale hotspot temperatures were evaluated in several applied-voltages conditions. The prediction equation was constructed by approximating the hotspot temperatures.

研究分野：熱工学

キーワード：サーマルマネジメント パワーエレクトロニクス ホットスポット

1. 研究開始当初の背景

近年、環境負荷低減のためパワーエレクトロニクス分野において、低損失である次世代パワー半導体の普及が期待されている。次世代パワー半導体として、シリコンカーバイド (SiC) やガリウムナイトライド (GaN) 等が注目されている。これらの次世代パワー半導体は、低損失であるという特徴に加え、高電圧・高耐熱の特徴を有している。ここで、次世代パワー半導体ダイ自体は高耐熱ではあるものの、電子機器はその他のさまざまな材料から構成されており、それらの耐熱性や、熱膨張を考慮する必要がある。次世代パワー半導体が高耐熱であっても寿命低下を招かぬよう、可能な限り冷却をすることで信頼性を担保しなければならない。一方で、省エネルギー化のためには冷却システムへのエネルギー利用を最小限に抑えることが望ましく、過剰設計にならないよう、正確なサーマルマネジメントが重要である。ここで正確なサーマルマネジメントのためには以下が求められる。

- ① 発熱源である半導体ダイからの正確な発熱 (分布) の予測および内部温度 (分布) の評価
- ② ダイからの発熱を外気に放熱するための放熱経路に存在する複数の材料の正確な熱伝導率と接合部における接触熱抵抗の評価
- ③ 正確な冷却システムの性能評価と性能予測手法の開発

特に①の発熱 (分布) を評価する必要性としては、極めて小さい領域に発熱が集中する場合には、その微小領域で非常に高い温度に到達する可能性があり、その周辺で亀裂を生じた場合に信頼性低下を招く恐れがあるためである。そこで本研究では①に着目し、これまでに次世代パワー半導体内部で発生する微小領域の高熱箇所 (ホットスポット) の温度を数値解析により評価してきた。半導体ダイ内部の微小領域 (ナノ・マイクロスケール) に発生するホットスポットは、実験では計測することが難しいため、解析が有効となる。熱・電気連成解析を用いて、シリコン (Si) を対象に内部に発生するナノ・マイクロスケールのホットスポットの温度予測を実施してきたが、この解析では、半導体ダイに電流が流れることと発生する局所的な発熱を算出し、ダイ内部の温度分布が推定される。しかし、電子機器のサーマルマネジメントを行うにあたり、前述の②を考慮したマクロ的なサーマルマネジメントも非常に重要であるため、①および②を考慮した、ナノ・マイクロスケールからマクロスケールまでのサーマルマネジメントの実現が求められる。それらの両立により、次世代パワー半導体を採用した電子機器の信頼性担保につながる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、電子機器全体のマクロ的なサーマルマネジメントに併せてナノ・マイクロスケールのホットスポット温度の考慮を実現させるため、ナノ・マイクロスケールのホットスポット温度予測式を構築することを目的とする。ここでは、SiC 製の MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) が採用されたパッケージを対象とする。

3. 研究の方法

ナノ・マイクロスケールにおけるホットスポットの温度予測式構築について議論するため以下の4点を実施する。

- (1) まず、熱・電気連成解析を用いて SiC パワー半導体ダイ内部の温度分布を取得するための境界条件を定めなければならない。そのためには、パッケージ内部で発熱する SiC パワー半導体ダイから外気までの伝熱現象を評価する必要がある。そこで、CFD (Computational fluid dynamics) 解析を用いてパッケージ内部の熱解析 (周辺流体の熱流体解析を含む) を実施する。この結果から、SiC パワー半導体ダイ周辺の熱的な環境を取得する。これを熱・電気連成解析の境界条件として以降に示す(3)に適用する。
- (2) (1)の CFD 解析の妥当性を評価するため、SiC パワー半導体製パッケージを通電加熱し、同時にパッケージ表面の温度分布を測定し、(1)の温度分布と比較する。また同時に、電気特性を評価する。
- (3) (1)-(2)のパッケージに採用されている SiC パワー半導体ダイを対象として、熱・電気連成解析を用いて複数の電圧条件・冷却面温度の条件においてナノ・マイクロスケールのホットスポット温度を評価する。
- (4) (3)で得られたホットスポット温度から、ナノ・マイクロスケールのホットスポット温度を評価するための予測式を構築する。

4. 研究成果

- (1) CFD 解析および(2)通電加熱試験から得られたパッケージ表面の温度部分分布比較

Fig. 1 に実験および CFD 解析において温度を比較する場所となる 11 のポイントを示している。Fig. 2 には、CFD 解析から得られたパッケージの表面温度分布を示し、Fig. 3 では実験および CFD 解析の温度分布を比較している。Fig. 3 の横軸は Fig. 1 に示される測定箇所のチャンネル

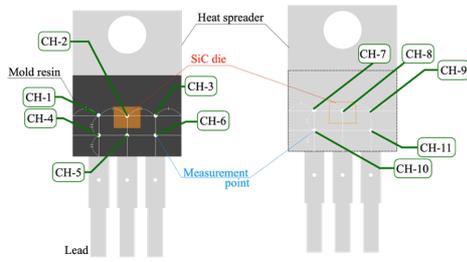


Fig. 1 Temperature Measurement point
(Exp. And CFD Sim.)

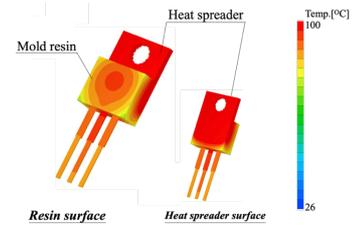


Fig. 2 Temperature distribution (CFD Sim.)

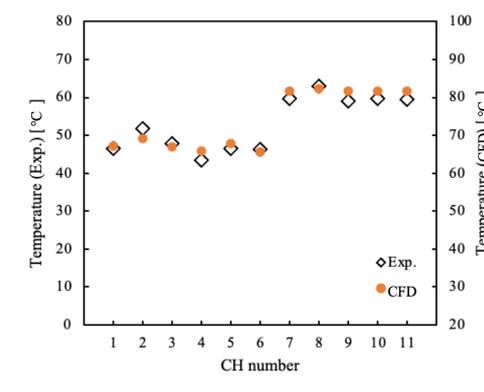


Fig. 3 Temperature distribution of package surface (Exp. and CFD Sim.)

(CH)数に相当し、実験結果の温度は図中の左縦軸、CFD解析は右縦軸により温度を示している。どちらも軸の幅は80°Cである。CFD解析の結果は実験値よりも高温を示してはいるものの、実験から得られた温度分布と傾向は一致している。このCFD解析の結果を元に、パッケージ内に存在するSiCパワー半導体ダイ周辺の熱的な条件を定め、(3)の解析に反映させる。

(3) 熱・電気連成解析を用いた解析

熱・電気連成解析の支配方程式は、ポアソンの式、連続の式、運動量保存式、エネルギー保存式、熱伝導方程式である。Fig. 4(a)に解析対象、(b)に解析モデルを示す。解析対象のMOSFETは(a)に示されるように形状が図中の両端方向に連続しており、奥行き方向には均一の形状である。SiCパワー半導体ダイの上部にはソース電極およびゲート電極が、下部にはドレイン電極が設置されている。ドレイン電極側が冷却面となり、上面側は樹脂に覆われている。このMOSFETはNチャネルMOSFETで、そのチャンネル長は1.0μmである。この半導体ダイの高さ(Y軸方向)は25μmとする。この解析対象から(b)に示す解析モデルを作成した。MOSFETは(a)に示されるように繰り返し、左右対称形状が連続しているため、そのハーフモデルを採用している。奥行きに関しては均一形状であるため、2次解析とする。境界条件として、前述の通り図中水平方向には同じ形状が連続しているため、両端には対象条件、上面側は樹脂で覆

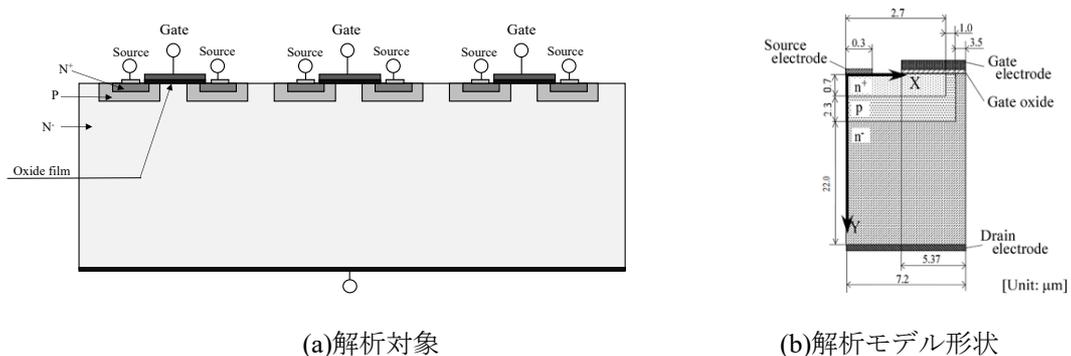


Fig. 4 熱・電気連成解析の解析対象および解析モデル形状

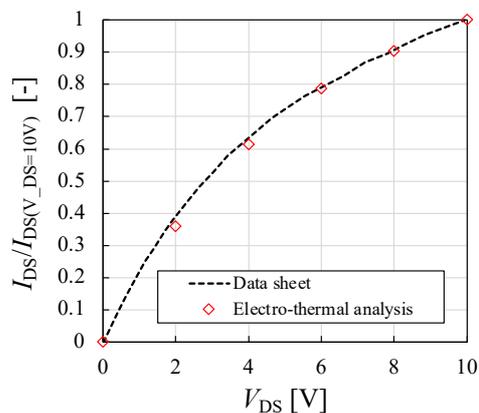


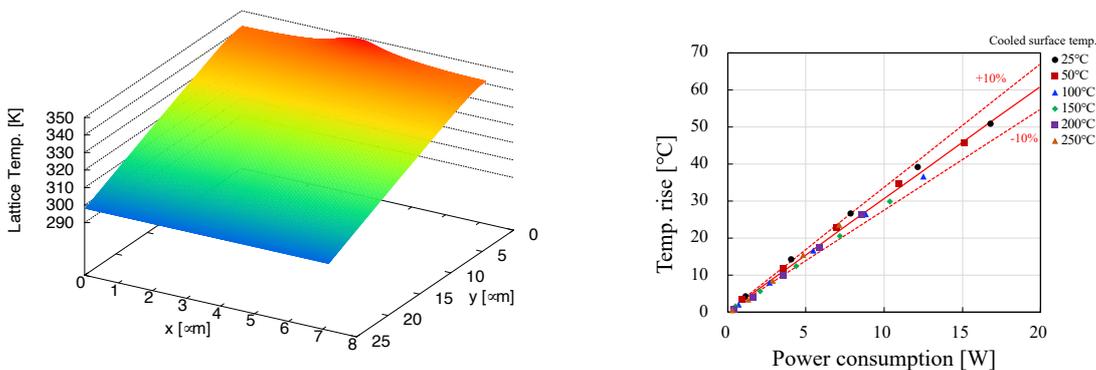
Fig. 5 Validation of Electro-thermal analysis

われているが、樹脂の熱伝導率が低く、(1)の解析結果からも樹脂を通過して外気へ放熱される熱量が非常に小さいことがわかったため、断熱とした。実際は下面のドレイン電極側にはヒートスプレッダの役割も担う金属板が存在し、そのヒートスプレッダが外気または冷却システムに接触しているが、ヒートスプレッダの高温側（ダイ側）と低温側（外気/冷却システム）の温度差が小さいため、冷却面温度と解析モデル底面温度は同等とし、ドレイン電極部は一定の温度で固定する。ここで、このドレイン電極の温度をパラメータとして 25 - 250 °C とする。電氣的境界条件としては、ソース電極が 0 V、ゲート電圧が 14 V、ドレイン電極への印加電圧をパラメータとして 2 - 10 V とする。まず、解析結果の妥当性を評価するため対象とした SiC パワー半導体パッケージの電気特性と、解析から得られた電気特性を比較する。ここで、本解析は 2 次元解析であるため、解析からは単位長さ当たりの電流量が得られるということ、さらに MOSFET の一部のみを解析対象としているため、実際の半導体パッケージの電流特性と直接比較することが難しい。そこで、解析および実際の半導体パッケージから出力される電流量を規格化することで、妥当性を検証する。出力される電流の規格化については以下の(1)式を用いる。実際のパッケージから出力される電流については、データシート（スペックシート）を参照している。

$$I_{cal} = \frac{I_{DS,cal}}{I_{max,cal}}, I_D = \frac{I_{DS,D}}{I_{max,D}} \quad (1)$$

ここで、解析から得られる単位長さ当たりの電流量を規格化したものを I_{cal} とし、データシートに示される電流量を規格化したものが I_D である。今回の解析条件として、ドレイン電圧が 10 V の場合が最大であるため、解析およびデータシートに示されるドレイン電圧 10 V の場合の単位長さあたりに電流量および電流量を、それぞれ $I_{max,cal}$ 、 $I_{max,D}$ とし、 $I_{DS,cal}$ 、 $I_{DS,D}$ は各ドレイン電圧 ($V_{DS}=2, 4, 6, 8, 10$ V) の条件下で出力される単位長さあたりの電流量および電流量を示している。この式を用いて評価された解析結果と実際のパッケージの規格化された電流量 $I_{DS} [-]$ を比較したものを Fig. 5 に示す。この結果からは、解析結果とデータシートは良い一致を示し、それらの差は 5% であった。

(4) ナノ・マイクロスケールのホットスポット温度の予測式の構築



(a) Temperature distribution ($V_{GS}=14$ V, $V_{DS} = 10$ V)

(b) Hotspot temperature

Fig. 6 Temperature distribution and hotspot temperature

(3)の解析によって得られた温度分布を Fig. 6 (a)に、解析条件の全ての結果をまとめて消費電力 (=電流×電圧) およびナノ・マイクロスケールのホットスポットの温度上昇値 (=ホットスポット温度 - 冷却面温度) として関係を表したものを(b)に示す。ここで消費電力は、ドレイン電極の印加電圧と、出力される電流量により得られるが、解析モデルの奥行き方向が 5 mm の場合を想定して電流量を算出している。冷却面に対するホットスポットの温度上昇値 $\Delta T_{HS, rise}$ は、消費電力の上昇に伴いほぼ直線状に上昇している。そのため、今回の解析範囲では直線で近似することができる。直線近似された値に対して解析データから得られる冷却面に対するホットスポットの温度上昇値の差は約 5%の範囲に収まっている (8 W 以下の低消費電力の場合を除く)。Fig. 6 (b)の直線近似から、ナノ・マイクロスケールのホットスポット温度 T_{HS} は以下の(2)式により表される。

$$T_{HS} = T_{cs} + 3.05 \times P \quad (2)$$

ここで、 T_{cs} は冷却面温度、 P は消費電力を示している。ここで、予測から外れるデータが存在する要因としては、電気特性が温度依存性を持つためである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 R. Kibushi, T. Konishi, T. Hatakeyama, S. Nakagawa, N. Unno, K. Yuki, M. Ishizuka, M. Edatsugi
2. 発表標題 VALUATION OF HEAT FLOW IN A TO-220 PACKAGE MADE OF SiC USING CFD SIMULATION
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 枝次将弥, 木伏理沙子, 結城和久, 海野徳幸
2. 発表標題 次世代SiCパワー半導体パッケージにおける信頼性向上のための熱設計手法の開発
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Kibushi, T. Hatakeyama, K. Yuki, N. Unno and M. Ishizuka
2. 発表標題 Heat Generation and Temperature Distribution of SiC Power MOSFET Using Electro-Thermal Analysis
3. 学会等名 The 29th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Konishi, R. Kibushi, T. Hatakeyama, S. Nakawaga, M. Ishizuka
2. 発表標題 Evaluation of Amount of Heat Through Each Component of SiC Package Using CFD Analysis
3. 学会等名 2022 International Conference on Electronics Packaging (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小西太一、木伏 理沙子、畠山友行、石塚 勝
2. 発表標題 SiC MOSFET のホットスポット温度予測手法の検討 - ドレイン電圧と冷却面温度の影響
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第37回春季講演大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------