高熱伝導材料の熱伝導率測定精度向上のための不確かさ要因の考察

佐藤 直樹*, 大串 哲朗**, 若杉 直樹***, 竹下 一毅***, 陳 伝彤*, 長尾 至成*, 菅沼 克昭*

Uncertainty Factor for Improving Thermal Conductivity Measurement Accuracy of High Thermal Conductive Materials

Naoki SATO*, Tetsuro OGUSHI**, Naoki WAKASUGI***, Kazutaka TAKESHITA***, Chuantong CHEN*, Shijo NAGAO*, and Katsuaki SUGANUMA*

* 大阪大学産業科学研究所 (〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 8-1)

** アドバンスドナレッジ研究所 (〒669-1338 兵庫県三田市上内神 1619)

*** ヤマト科学株式会社 (〒103-0022 東京都中央区日本橋室町 2-2-1)

* Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (Mihogaoka 8-1, Ibaraki, Osaka 567-0047)

** Advanced Knowledge Laboratory Inc. (Kamiuchigami 1619, Sanda, Hyogo 669-1338)

*** Yamato Science Corporation (Nihonbashi Muromachi 2-2-1, Chuo-ku, Tokyo 103-0022)

概要 次世代パワー半導体のサーマルマネジメント技術として、200°Cを超える高温環境下での熱伝導率を正確に測定する評価方法の開発と基準の標準化が求められている。本研究では、カートリッジ方式一方向熱流定常比較法を発展させた新たな熱伝導率測定装置を開発し、半導体モジュールの絶縁基板を構成するセラミックス、高熱伝導金属素材（銀接合層や銅基板）やTIMの熱伝導率を精度良く測定するための基準を探索した。その結果、測定する際のカートリッジ部の試験片温度差と均熱度が熱伝導率の測定精度に大きく関わり、これら伝熱パラメータを制御することで熱伝導率測定の良否判定を行う際の指標になり得る事を見出した。

Abstract

To evaluate the thermal properties of the constituent materials of the next generation of power modules, a precise evaluation method must be established, particularly for high thermal conductivity materials used in high temperature environments (i.e., over 200°C). In this study, the thermal conductivity of ceramics, silver sinter layers, copper substrates, and thermal interface materials (TIM) such as heat dissipation sheets/grease were evaluated using the improved longitudinal comparative heat flow method with a cartridge type sample, and then suitable criteria for improving measurement accuracy were investigated. Our results show that temperature uniformity in both upper and lower cartridges, as well as temperature differences between the upper and lower cartridges, were largely related to the accuracy of the thermal conductivity measurements. Therefore, the accuracy of the thermal conductivity measurements can be improved by controlling these heat transfer parameters in the evaluation method.

Key Words: Steady-state Method, Thermal Resistance, Thermal Conductivity, Relative Uncertainty

1. 緒言

SiCやGaNなどのワイドバンドギャップ(WBG)半導体の利点は耐熱温度が高く小型でも大電力駆動が可能となる点であるが、一方で大電流による発熱密度も大きくなり、200°Cを超える高温動作が想定される。たとえば、SiCの搭載が期待されている次世代ハイブリッド車や電気自動車では、SiC半導体チップの小型化、高性能化および大電流化に伴い、その発熱密度が300 W/cm²を大幅に超えるものと予測される¹⁾。このため、素子で発生する熱を効率的に外部に導き、素子およびモジュールの動作を安定化するためのサーマルマネジメント技術が重要度を増している²⁾。

著者らは、SiCなど次世代パワー半導体モジュールに使用されるセラミックス絶縁基板の、熱特性評価方法の規格化として、実装状態を模擬した試験片を用いることができるカートリッジ方式一方向熱流定常比較法³⁾（以下カートリッジ方式定常比較法と略す）を提案している。

これまで、厚さ方向の熱伝導率測定法として、ASTM (American Society of Testing and Materials) 規格の一方向定常熱流比較法^{4)~6)}が一般的に用いられている。この方法はレーザーフラッシュ法などの非定常法と比べ、サーマル・インターフェイス・マテリアル(TIM)と固体の伝熱面に生じる界面熱抵抗を含んだ有効熱伝導率を測定できること、実際の使用状況に類似した接触圧力条件下で測定できることなどの特長がある。しかしながら、セラミックス基板からなる試験片を200°Cという高温条件下での測定例はなく、セラミックス基板の熱伝導率を正確に測定できることを実証していく必要がある。さらにセラミックス基板の温度上昇抑制の役割を担うTIMについても、公開されているデータのみでは正確な情報が把握できず、異なる測定者間の測定結果の比較が困難な状況を抱えており⁶⁾、機器の熱設計や放熱対策を行う際の障害となっている。

そこで本研究では、セラミックス基板の厚さ方向の熱伝導率測定方法について、200°Cを超える高温環境でも評価

が可能な熱伝導率測定装置を開発し、高温環境における熱伝導率の測定精度を確認することにより高熱伝導率材料まで含め統一された測定基準を構築することを目的とした。さらにセラミックス基板はさまざまな利用のされ方をするため、ここでは、部材間の接触熱抵抗を低減させるために利用される TIM にも着目し、その材料仕様や異種材料間の接触界面における熱抵抗を評価した。測定の結果、得られるデータから熱伝導率の算出に関わる試験片温度差や熱流束、カートリッジ試験片部の均熱度について考察し、熱伝導率の測定精度が向上するための測定条件を探索した。

2. 実験方法

2.1 カートリッジ方式定常比較法の選定と測定原理

2.1.1 カートリッジ方式定常比較法の選定

Fig. 1 にパワーモジュールの概略断面構造を示す。SiC や GaN などの半導体素子は、銀焼結接合や高融点はんだ付けなどのダイアタッチを介して Si_3N_4 , AlN , Al_2O_3 などのセラミックス絶縁基板に接合され、さらにこれらの基板は放熱グリスなどのサーマル・インターフェイス・マテリアル (TIM) を介して銅やアルミニウムの放熱板上に搭載されている。半導体素子で発生した熱はこれらの部材を通して Fig. 1 の下方に流れ放熱板で冷却される。

このようにパワーモジュールの内部には多くの材料による界面が形成されており、これらの界面を通じた放熱・熱伝導性を高めるために、TIM の熱伝導率や熱抵抗を精度良く測定することが求められている。

そこで著者らは、セラミックス基板や放熱板などの界面に介在する TIM の熱抵抗を実装状態と同じ接触圧力下で簡便に測定でき、なおかつ銀接合層や銅基板などの高熱伝導金属やセラミックス基板について 200°C を超える高温環境でも精度良く測定できると予想されるカートリッジ方式定

常比較法による試験装置の開発を目指した。なお、熱伝導率測定方法において、レーザーフラッシュ法や準定常法などの提案はこれまでも報告例はあるが⁷⁾、本カートリッジ方式定常比較法による 200°C を超える高温環境での評価方法は初めての試みである。

2.1.2 カートリッジ方式定常比較法の測定原理

熱伝導率や熱伝達率は材料や製品の伝熱特性の根幹を成すものであり、これらを正しく知ることによって熱設計の計算予測精度が向上し、製品開発やトラブルに対してより良い対策を立てることができる。代表的な熱物性値である熱伝導率の測定方法は定常法と非定常法の 2 つに大別される。本報で実施した測定方法は、一次元軸方向定常熱流による定常法に属する。

板材の厚さ方向の熱伝導率は、「単位厚さの板の両面に単位温度の差がある時、その板の単位面積に、単位時間あたりに流れる熱量を表す」と定義されている⁸⁾。定常法は、試料に一次元軸方向または径方向の定常熱流を与え、試料の温度勾配を取得することにより熱伝導率を求める方法である。

Fig. 2 にカートリッジ方式定常比較法による測定原理を示す。銅製の上下ロッド間に試験片を挟み定常状態に達した上下ロッドの温度勾配から試験片を通過する熱流束 q_s を算出し、試験片厚み t_s と温度差 ΔT_s を用いて有効熱伝導率 k_{eff} を式 (1) で算出する⁹⁾。

$$k_{\text{eff}} = \frac{q_s \cdot t_s}{\Delta T_s} \quad (1)$$

ここに、 k_{eff} は有効熱伝導率 ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)、 q_s は熱流束 (W/m^2)、 t_s は試験片厚み (m)、 ΔT_s は温度差 (K) である。 q_s には上下ロッドそれぞれの通過熱流束 q_r の算術平均値を用いる。また、ロッドの通過熱流束 q_r はロッドの熱伝導率 k_r と、ロッド中の温度測定長さ t_r 間のロッド温度 T_r の温度勾配 ($= -k_r(dT_r/dx)$) から求められる。また、試験片温度差 ΔT_s は上下カートリッジブロックのそれぞれ 3 点の平均温度差 ΔT_c からカートリッジブロック中の熱伝導による温度差 $2\Delta T_b$ を差し引いて求める⁶⁾。

Fig. 1 Schematic cross-sectional structure of a typical power electronics module consisting of various materials. Each arrow in the figure represents heat exchange path through a contact interface between different components

Fig. 2 Principle of thermal conductivity measurement method with steady-state axial heat flow using cartridge type specimen

なお、界面熱抵抗を含む試験材料の熱伝導特性として、単位面積あたりの全熱抵抗 R_t および単位面積当たりの熱コンダクタンス K_t は式 (2) で求めることができる⁹⁾。

$$R_t = \frac{1}{K_t} = \frac{\Delta T_s}{q_s} = \frac{t_s}{k_{\text{eff}}} \quad (2)$$

ここに、 R_t は全熱抵抗 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)、 K_t は単位面積当たりの熱コンダクタンス ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) である。

2.2 試験装置および測定条件と測定方法

2.2.1 TIM の熱抵抗測定

Fig. 3 に、TIM の熱抵抗評価に使用した従来のカートリッジ方式定常比較法による熱伝導率測定装置の構成を示す。本装置のセラミックスヒーターの加熱源には定格出力容量 1 kVA、最大電流 5 A のスライダック電源が使用されているが、電源のオーバーヒート防止などを考慮し、試験片の測定可能な上限温度は約 100°C としている。本装置は放熱材料、はんだや導電性接着剤など、試験片のカートリッジ部への組付けが容易であり、これら材料の熱抵抗を効率良く比較評価できる特長を有している。Fig. 4 に示す厚さ 5 mm で熱伝導率 398 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ¹⁰⁾ の純銅製 (C1100、以下 C1100 と称する) のヒレ付きカートリッジブロックに挟んだ試験片を TIM を介して上下ロッド間に挿入し、加熱源であるセラミックヒータから冷却源である C1100 製の冷却ブロックへ一方方向に熱を流す構成となっている。上下ロッドは 1 辺が 20 mm、厚さ 30 mm の C1100 の四角柱を用いた。図中黒丸印が温度測定点であり、上下ロッドを 5 mm 間隔で各 4 点、冷却ブロック表面に 1 点、周囲温度 1 点を外径 0.5 mm の K 型シース熱電対を用いて測定した。

Table 1 に 8 種類の TIM の仕様を示す。実験に使用した TIM は、厚さ 0.2 mm の炭素繊維系や厚さ 1.0 mm のアクリル系成分などで構成される放熱シート 5 種類と、シリコンなどで構成される放熱グリース 3 種類である。市販で入手したこれら TIM について、約 0.5 MPa~2 MPa の範囲での接触圧力に対する厚み変化と厚みに対する熱抵抗を比較し

Fig. 3 Thermal resistance measurement set ups for TIM materials

た。なお、TIM は 1 回の試験ごとに新しいものを装着し、計測時間は定常状態到達後 10 分間に統一して測定した。TIM 試験片の厚みは、カートリッジ間のヒレ間距離をキャリパゲージを用いて測定した値から、ヒレ間のカートリッジの厚さを差し引くことにより求めた。接触圧力はロードセル (計測範囲 0~1 kN、分解能 0.2 N) で検出した荷重を試験片断面積で除した値で定義した。

2.2.2 標準試験片 C1100 の熱伝導率測定

Fig. 5 に今回開発した熱伝導率測定装置の構成を、Fig. 6 に試験片の組付け外観を示す。装置は主ヒーター、遮熱

Fig. 4 Details of TIM sample holder cartridge with four fins to measure the sample thickness

Table 1. Specifications of various TIMs

TIM	Classification	Material, thickness, etc.
SampleA	Heat dissipation sheet	Carbon fiber type, 0.2 t
SampleB	〃	Low hardness heat dissipation silicone rubber, 0.5 t
SampleC	〃	Acrylic type, 1.0 t
SampleD	〃	Graphite vertical orientation, 0.25 t
SampleE	〃	Polyimide type, 0.25 t
SampleF	Heat dissipation grease	Nano-diamond silicone
SampleG	〃	Silicone type
SampleH	〃	Silicone type

Fig. 5 Newly developed measurement system of thermal conductivity at high temperatures up to 250°C (schematic)

Fig. 6 Newly developed measurement system of thermal conductivity at high temperatures up to 250°C -- a picture of actual measurements

板、支柱、上下ロッド、カートリッジ試験片、補助ヒーター、温度調整板、水冷板、ロードセル、底板で構成されている。従来の熱伝導率測定装置に対して上部ロッド側に主ヒーター、下部ロッド側に補助ヒーターを挿入することにより、試験片温度が 200°C を超える高温環境を再現できる構造となっている。補助ヒーターは、高温環境での試験片温度差や熱流など、さまざまな試験条件の設定や制御の必要性を想定し設置した。また、水冷板の下側に試験片への荷重を測定するためのロードセルを設置することでロードセルの温度を一定に保ち、荷重の検出精度にロードセルの温度変化の影響が出ないように工夫されていることも特長である。

各ヒーターと上下ロッド間、カートリッジ試験片と上下ロッド間は接触熱抵抗を低減するために TIM が塗布されている。ここでは上下各ロッドとして、1 辺が 20 mm または 40 mm、厚さ 30 mm の C1100（熱伝導率 398 W/m・K）の四角柱を用い、温度測定のための熱電対挿入孔を厚さ方向に 5 mm 間隔で 4 点設けた。温度センサーには直径 1.0 mm の K 型シース熱電対を使用した。投入電力および試験片温度差の測定法は 2.2.1 項の TIM の熱抵抗測定法と同様である。装置本体は上部に設けたネジにより試験片への荷重を変化させ、水冷板はチラーを介して一定温度の冷却水で循環冷却されている。

Table 2 に、C1100 の熱伝導率測定における試験片、ロッド、TIM の組み合わせ仕様を示す。ここでは、試験条件の組み合わせの記述表示が多岐にわたるため、便宜上、試験 No. ①～⑧で表す。C1100 試験片は Fig. 7 に示すように 1 辺が 10 mm と 20 mm、厚さ 9 mm とし、上下 2.5 mm をカートリッジ、その間の厚さ 4 mm を測定試験片とみなした構造である。TIM としてはナノダイヤモンドグリースおよび Sn-Pb 系はんだの 2 種類を選択し、それぞれの TIM を用いたときの熱伝導率を比較した。

投入電力は約 50 から 300 W で変化させ、主ヒーター側のスライダック電圧を 20 V から 50 V の範囲において、10

Table 2. Combination of width of pure copper standard specimen C1100 and rods and kinds of TIMs

Test No.	Specimen width (mm)	Upper and lower rod width (mm)	TIM between rod and test piece
①	10	20	Grease (nano diamond silicone)
②	10	40	
③	20	20	
④	20	40	
⑤	10	20	Soldering (Sn - 40 Pb)
⑥	10	40	
⑦	20	20	
⑧	20	40

Fig. 7 Detailed dimensions of the standard pure copper specimen C1100 with thermocouple holes. The parts outside of the dotted lines correspond to upper and lower cartridges

V 間隔の水準毎での電流値と電圧値をデジタル式マルチメータから検出して求めた。試験片熱流束は上下ロッドそれぞれ 4 点の温度測定値から最小二乗法で直線近似して得た勾配から求められる上下ロッドにおける熱流束を平均したものである。また試験片温度差は上下カートリッジブロックのそれぞれ 3 点の平均温度差からカートリッジブロック中の熱伝導による温度差を差し引いて求めた。なお、上下カートリッジ部の温度測定が各 1 点の計測では、試験片面内方向に温度差が生じる懸念があるため、同一平面上を各 3 点測定することにより、試験片温度差の測定精度を向上させている。

これら試験片寸法とロッド寸法および TIM 材料の組み合わせ条件において、先に示した電圧範囲（試験片温度が約 50°C～250°C）に可変させた時の C1100 の熱伝導率の温度依存性を比較し、測定精度を上げるための最適化条件を模索した。各試験時の接触圧力は 1 MPa である。また、今回の実験では、主ヒーター側の加熱量に対する試験片の温度変化を観測するため、先に示したような補助ヒーターを用いず、主ヒーターのみでサンプル温度を制御した。

3. 結果および考察

3.1 各種 TIM の熱抵抗

試験片温度が約 100°C のとき、接触圧力に対する各種 TIM の厚み減少率を Fig. 8 に示す。放熱シート系の試料は接触圧力の増加に比例して厚みが減少し、全般に良い直線近似を示す。一方で、グリース系材料は 1 MPa 程度の圧力領域までは厚みが減少していくが、さらに高压な領域では

Fig. 8 Thickness reduction rate of various TIMs under the contact pressure; a) heat dissipation sheet samples: A-E; b) heat dissipation greases: F-H. The temperature of the specimens is about 100°C

Fig. 9 The obtained thermal resistance of various TIM specimens as a function of thickness; a) all the measured TIM samples; b) heat dissipation greases: F-H. The temperature of the specimens is about 100°C

厚み減少率が飽和する挙動を示しており、グリースの粘度変化や硬化などの影響が伺える。

このような加圧加温状態において、TIMの厚みに対する全熱抵抗分布をFig. 9に示す。(a)は8種類のTIMの全体分布、(b)は3種類のグリースについての拡大分布図である。全般的に放熱シート系材料の熱抵抗は組付け荷重に対する依存性が大きく、実際に使用される条件や環境に応じて適切な材料を選定する必要があると言える。

放熱シート系材料に比して、グリース系は全般に熱抵抗が低くなっており、試験片温度約100°Cの環境におけるグリースの厚みは0.1 mm以下、全熱抵抗は $1.0 \text{ cm}^2 \cdot \text{K/W}$ 以下の領域に収束していた。グリース系3種類の熱抵抗分布を見ると、試料Fのナノダイヤモンドシリコン系グリース（以下Fグリースと称する）の全熱抵抗が最も低く分布している。この熱抵抗値の差はグリースの中に含まれる充填剤や耐熱温度、接触界面部における面粗度などが影響要因として推察される。

3.2 標準試験片 (C1100) の熱伝導率

3.2.1 測定結果

C1100 試験片の温度に対する熱伝導率の変化をFig. 5に示す試験装置を用いて詳細に調査した。代表的なものとして試験No. ⑥の測定結果をFig. 10に示す。試験片温度が50°Cから250°Cに上昇するにつれて、熱伝導率の減少が見

Fig. 10 The temperature dependence of thermal conductivity of the pure copper standard specimen recorded under the different combinations of the measurement conditions: 1-8. Refer Table 2 for the detailed conditions of the measurements. The dashed line indicates the thermal conductivity of C1100 in the literature

られる。

各試験No. についての熱伝導率比 k_{eff}/k_s をFig. 11示す。ここに k_{eff} は実測値、 k_s は文献値¹¹⁾であり、 k_{eff}/k_s 値が1に近い程熱伝導率の測定精度が良いことを示す。ここでの実測値の k_{eff} は、Fig. 7に示すC1100の標準試験片に直接熱電対を挿入した状態で温度を計測しているため、TIMに

Fig. 11 Distribution of thermal conductivity ratio of pure copper C1100 under the various test conditions. The values of k_{eff}/k_s represent the thermal conductivity ratios of measured one to that in the literature, which shown as the dotted line in the figure

よる接触熱抵抗を含まないC1100の純粋な熱伝導率である。 k_{eff}/k_s 値が比較的1に近い部材組み合わせは試験No.②, ⑥の試験片の1辺が10 mm, ロッドの1辺が40 mmでTIMがFグリースまたはSn-Pb系はんだ付けの組み合わせである。その他の部材組み合わせ条件では, 文献値と実測値との差が大きい。

3.2.2 熱伝導率の測定不確かさ解析

この誤差要因解明に際し, 熱伝導率比が1に近い試験No. ⑥と熱伝導率比が0.7レベルの試験No. ③について, 合成標準相対不確かさBタイプ¹²⁾を用いて熱伝導率の不確かさ解析をおこなった。測定値 R が成分 x_i の関数 $R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ で表されるとき, 成分 x_i の不確かさを w_i とした時の合成標準相対不確かさ w_R/R は式(3)で表される。

$$\frac{w_R}{R} = \left[\left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

式(1)で表される熱伝導率 k_{eff} を式(3)に適用すると, 熱伝導率 k_{eff} の合成標準相対不確かさ $w_{k_{\text{eff}}}/k_{\text{eff}}$ は式(4)で表される。ここに $w_{k_{\text{eff}}}$, w_{q_s} , w_{t_s} , $w_{\Delta T_s}$ はそれぞれ熱伝導率 k_{eff} , 熱流束 q_s , 試験片厚み t_s , 試験片温度差 ΔT_s の不確かさである。

$$\frac{w_{k_{\text{eff}}}}{k_{\text{eff}}} = \left[\left(\frac{w_{q_s}}{q_s} \right)^2 + \left(\frac{w_{t_s}}{t_s} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta T_s}}{\Delta T_s} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

なお, 式(4)中の試験片熱流束の相対不確かさ w_{q_s}/q_s は, 上下ロッドのそれぞれ4点の温度測定値の最小二乗法による近似直線の勾配の標準偏差から, Fig. 2に示すそれぞれ上下ロッドの熱流 q_{r1} , q_{r2} の不確かさを求め, $q_s = 0.5(q_{r1} + q_{r2})$ に式(3)を適用して求めた。試験片温度差の不確かさ $w_{\Delta T_s}$ は上下カートリッジブロックのそれぞれ3点の標準偏差からカートリッジ間温度差 ΔT_c の不確かさを評価し, ΔT_c からカートリッジブロック中の熱伝導による温度差 $2\Delta T_b$ を差し引く式($\Delta T_s = \Delta T_c - 2\Delta T_b$)に式(3)を適用して求めた。

Fig. 12 Experimented temperature difference of ΔT_s as a function of temperature uniformity ratio between upper and lower cartridges. The area surrounded by the dashed line shows the region with acceptable measurement accuracy of the thermal conductivity, obtained by test conditions No. 2 and No. 6

また, 試験材料厚さの測定不確かさは, マイクロメーターによる複数回の実測値から10 μm とした。代表的なものとして試験No. ③と試験No. ⑥について, 熱伝導率の相対不確かさを試算した結果, k_{eff}/k_s 値が1に近い試験No. ⑥の相対不確かさが約15%前後であるのに対し, k_{eff}/k_s 値が0.7程度の試験No. ③は20%を超えることが分った。

この熱伝導率に関わる変数として, 試験片熱流束 q_s , 試験片温度差 ΔT_s , 試験片厚み t_s の相対不確かさを式(4)により試算した結果, q_s と t_s の相対不確かさは10%以下であり比較的誤差が小さい。これは, ロッド材料は熱伝導率が高いC1100であることから外部への熱損の影響を受けにくいためと考えられる。一方で, ΔT_s の相対不確かさは10%を超えており, k_{eff}/k_s の相対不確かさの主要因となっている。

3.2.3 熱伝導率に及ぼす試験片温度差と均熱度の影響

3.2.2項からC1100の熱伝導率の誤差要因として, ΔT_s の相対不確かさが大きいことが主な原因であることが分った。これはカートリッジの温度測定(3点)のばらつき(均熱度)に起因するものと考えられる。そこでC1100の熱伝導率の誤差要因究明に際し, 上下各カートリッジの均熱度と上下カートリッジの均熱度比に着目した。ここで, カートリッジ内部の熱分布の一様性を評価するために, カートリッジ中の3つの熱電対の測定値の標準偏差を均熱度として定義した。したがって3点の温度測定値間の標準偏差が小さいほど, 均熱度が良いと言える。上下カートリッジの均熱度比とは, 上側カートリッジの均熱度と下側カートリッジの均熱度との比を指す。試験片熱流はTIMの組付け状態により変動するため熱抵抗値の測定精度に影響する。つまり, カートリッジの均熱度を捉えることで, 熱流の均一性や試験片組付け状態および熱伝導率の測定精度の良否判定ができる指標になり得ると考えられる。Fig. 12に上下カートリッジの均熱度比と試験片温度差 ΔT_s との関係を示す。熱伝導率比 k_{eff}/k_s が1に近い測定精度の良い領域では, 均熱度比が1近傍でなお且つ, 試験片温度差 ΔT_s が約3 K以上の領域に分布している。一方で, 均熱度比が1を

超え、試験片温度差 ΔT_s が約 3 K 未満の領域では、熱伝導率の文献値に対し実測値が低めに推移している。Fig. 13 に上下カートリッジの均熱度比と試験片温度差の相対不確かさの分布を示す。熱伝導率比 k_{eff}/k_s が約 1 程度の試験 No. ⑥の均熱度比は 0.6~1.0、相対不確かさは概ね 15% 程度に対し、熱伝導率比 k_{eff}/k_s が 0.7 程度の試験 No. ③の均熱度比は約 2.5、相対不確かさは 20% 以上に達している。上下カートリッジ間の均熱度比が 1 近傍から離れるほど試験片温度差の相対不確かさが大きく、熱伝導率の測定精度が低下していることが分かる。

この測定誤差を招いている要因究明に際し、試験片温度に対する上側カートリッジと下側カートリッジについて、それぞれの均熱度の分布を Fig. 14(a), (b) に比較した。試験 No. ⑥の部材組み合わせでは、上側カートリッジと下側カートリッジの均熱度の差と試験片温度に対する均熱度の変化が小さい。つまり試験片内部を均等に熱が伝達していると言える。一方で試験 No. ③は、上側カートリッジと下側カートリッジの均熱度の差と試験片温度に対する均熱度の変化が大きい。これは TIM 塗布の不均一性により、試験内部の熱が均等に流れていないと考えられる。この結果か

Fig. 13 Comparison between the best and worst cases of relative uncertainty of specimen temperature difference for the standard copper specimen. The least relative uncertainty of specimen temperature difference is recorded around unity of temperature uniformity ratio between upper and lower cartridges

Fig. 14 Changes in temperature uniformity of upper and lower cartridges with respect to specimen temperatures a) degree of uniformity of the upper cartridge; b) degree of uniformity of the lower cartridge. Note that the degree of uniformity in Test no. 6 indicates almost no difference between the upper and lower cartridges

ら、カートリッジの均熱度は、試験片の熱伝導率の測定精度に密接に影響していることが推察できる。

3.2.4 熱伝導率に及ぼす試験片熱流束の影響

熱伝導率の測定精度に影響する変数として試験片熱流束の状態を把握するため、各試験片について、投入電力に対する試験片熱流束を比較した。Fig. 15 に投入電力に対する試験片熱流束の推移を示す。上下ロッドの 1 辺が 40 mm、試験片の 1 辺が 10 mm の試験 No. ②と試験 No. ⑥の部材組み合わせにおいて、投入電力が約 300 W 時の試験片熱流束は約 2,000,000 W/m² のオーダーに達し、熱伝導率比 k_{eff}/k_s は 1 に近い。

一方で、上下ロッドの 1 辺が 20 mm と 40 mm、試験片の 1 辺が 20 mm の部材組み合わせ（試験 No. ③、試験 No. ④、試験 No. ⑦、試験 No. ⑧）においては、前者に対して約 25% 程度の試験片熱流束に留まっている。その時の熱伝導率比 k_{eff}/k_s は約 0.7 程度まで低下している。これは 3.2.3 項でも述べた TIM 塗布の不均一性により TIM 近傍のロッド中において熱が均等に流れていないために、ロッドの TIM に近

Fig. 15 Heat flux through the specimen with respect to the input power, for each measurement condition. Refer Table 2 for the detailed conditions of the measurements. The data surrounded by the dashed line (Test no. 2 and 6) have better accuracy of thermal conductivity measurement

い温度測定点の温度が影響を受けた結果、ロッドの熱流束が小さめに測定されたためと考えられる。

TIM 塗布の不均一性による熱流の不均一性が試験片温度差や熱流束測定に与える影響度合いについては、今後詳細な調査を行っていく予定である。

4. 結 言

次世代パワー半導体実装基板の熱特性評価方法の標準化に際し、セラミックス基板からの熱伝導による放熱の役割を担う TIM に着目し、その材料仕様や異種材料間の接触界面における熱抵抗をカートリッジ方式定常比較法により評価した。また、200℃を超えるような高温環境において、セラミックス基板の熱伝導率の測定精度を確認していくため、熱伝導率が既知の高熱伝導金属 (C1100) の標準試験片を用いた時の測定試験片やロッド寸法、ロッドと試験片の間に介在される TIM の組付け条件を探索し以下の知見を得た。

- (1) グリース系 TIM は熱抵抗の低減化に寄与し、実装基板の発熱対策などへの効果が期待できる。熱抵抗は放熱シート系 TIM やグリース系 TIM など放熱材料種に大きく依存するため、TIM の選定基準の構築に際しては、TIM の中に含まれる充填材や耐熱温度などの影響をさらに検証するのが望ましいと考える。
- (2) 高熱伝導金属 (C1100) の熱伝導率評価では、試験片温度が低温側約 50℃ から高温側約 250℃ における熱伝導率測定値は、ロッドと試験片の寸法やカートリッジ部の間に介在させる TIM の組み合わせに大きく依存する。熱伝導率の測定精度の向上に対しては、測定精度に影響を与える試験片温度差や熱流束の測定に対する部材の組み合わせによる熱流変化や TIM の材質および塗布の均一性などを加味することが重要と考えられる。
- (3) 熱伝導率の相対不確かさは、カートリッジ部の試験片温度差と、熱流によって生じる温度の一様性を示す均熱度が密接に関わっている。このカートリッジ部の試験片温度差と均熱度を捉えることで、熱伝導率測定の良否判定を行う一つの指標になり得、今回の結果からは伝熱パラメータとして試験片温度差 3 K 以上、上下カートリッジの均熱度比 1 の近傍を確保する必要があると推察される。

以上、本研究では、カートリッジ方式定常比較法により TIM や高熱伝導金属の熱伝導率の測定条件を標準化していくための事前検証を進めた。その結果、200℃を超える高温環境において、熱伝導率の測定精度を高めるための伝熱パラメータおよびその基準値を見出すことができた。今後は、本測定手法を各種モジュール構成材料の測定に展開してより信頼性を高め、パワーエレクトロニクスにおけるサーマルマネジメント技術のさらなる発展に貢献できると期待される。

謝 辞

本研究の一部は、経済産業省エネルギー等国際標準開発「次世代パワエレ基板の熱特性評価方法に関する国際標準化」の助成事業の研究成果である。また、一貫してご支援を頂いた一般社団法人日本ファインセラミックス協会の佐藤氏を初め皆様には、深甚の謝意を表したい。

(2018.8.6- 受理)

文 献

- 1) 菅沼克昭：“SiC/GaN パワー半導体の実装と信頼性評価技術,” 日刊工業新聞, Dec. 2014
- 2) 畠山友行, 松本圭司：“サーマルマネジメント研究の動向,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **21**, No. 1, pp. 66–69, 2018
- 3) 大串哲朗, 柳浦 聡, 渡邊 聡, 平田拓哉：“導電性接着剤の熱伝導率測定法の研究,” Netsu Bussei Vol. **28**, No. 1, pp. 22–28, 2014
- 4) ASTM D547-01: “Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thin Thermally Conductive Solid Electrical Insulation Materials,” ASTM International, 2001
- 5) ASTM E1225-04: “Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded Comparative Longitudinal Heat Flow Technique,” ASTM International, 2004
- 6) 藤井健太, 佐藤翔太, 白形雄二, 中島浩二, 熊谷 隆, 大川 太：“プリント基板を活用したパワーエレクトロニクス機器における熱伝導冷却技術の開発,” MES2017, Aug. 2017
- 7) 酒井啓太, 大串哲朗：“準定常法による熱伝導率測定法の研究,” The 37th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov. 28-30, 2016, Okayama
- 8) 三谷幸寛：“熱伝導率測定の現状について,” IIC REVIEW, No. 45, Apr. 2011
- 9) 福岡俊道, 野村昌考, 山田章博：“異材界面における接触熱抵抗の評価,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol. **76**, No. 763, pp. 344–350, 2010
- 10) Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho, and P. G. Klemens: “THERMAL CONDUCTIVITY Metallic Elements and Alloys,” Thermophysical Properties of Matter, pp. 68–81, 1970
- 11) International Organization for standardization: “ISO 16525-3:2014 Adhesives-Test methods for electrically isotropic conductive adhesives-Part3: Determination of heat transfer properties,” 2014
- 12) 不確かさの入門ガイド, 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター, ASG104, May. 2004

著者紹介

佐藤直樹 (さとう なおき)
大串哲朗 (おおぐし てつろう)
若杉直樹 (わかすぎ なおき)
竹下一毅 (たけした かずたか)
陳 伝彤 (ちん てんとう)
長尾至成 (ながお しじょう)
菅沼克昭 (すがぬま かつあき)