ロータス型ポーラス銅を使用した 高性能水冷ヒートシンクの開発

大串 哲朗^{*)} 千葉 博^{*} 中嶋 英雄^{**}

1. はじめに

近年、電子デバイスの小型化、高性能化に伴い発熱密度が飛躍的に上昇してきている。例えば、インバータなどに使用されるパワー素子での発熱密度は 100 W/cm^2 をすでに超えており、また高周波素子では 1000 W/cm^2 以上になろうとしている。発熱密度が 1000 W/cm^2 という値は核爆発時の温度とほぼ同じ 2000 K の温度に達するほどの発熱量である⁽¹⁾。そのためこれらの素子の効果的な冷却のために、従来の溝型ヒートシンクに比べ桁大きな $100000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 以上のベース面積基準の熱伝達率をもつ高性能の水冷ヒートシンクが求められている。

一般に冷却水路(チャンネル)となるチャンネル直径が小さいほど温度境界層厚さが薄くなり高い熱伝達率が得られることから、これまで溝幅が数十 μm の溝型のマイクロチャンネルを利用した半導体デバイス冷却用ヒートシンクの研究が様々に行われてきた。これまでに、実用に近い構造としてシリコンチップにマイクロチャンネルを形成し、伝熱性能評価や圧力損失評価を行ったもの⁽²⁾や、マイクロチャンネルを多層構造にしたヒートシンクの評価などがある⁽³⁾。また、Zhang ら⁽⁴⁾はマイクロチャンネルのひとつとして銅繊維からなるフォーム状金属を用いたヒートシンクの評価を行い、フォーム状金属がマイクロチャンネルに比べて高い伝熱性能を持つことを示した。しかし、一般に多孔質材料は流路が曲がりくねっているため、流れの圧力損失やポンプ動力が大きくなる欠点も指摘した。そこで、著者らは多数のストレート微細孔を

図1 ロータス銅ヒートシンクを使用したパワーモジュール構成。

持つ銅製のロータス型ポーラス金属を用いたヒートシンク(以下、ロータス銅ヒートシンク)の開発を進めてきた。

図1はロータス銅ヒートシンクを使用した水冷方式パワーモジュールの構造を示したもので、発熱体であるチップの直下にロータス型ポーラス銅(以下、ロータス銅)を設置し、純水やエチレングリコール水溶液等の冷却水をその孔内に流すシンプルな構成となっている。この構成によりチップで発生した熱は、ロータス銅の孔内を通過する冷却水に効率良く伝達される。本報ではロータス銅ヒートシンクに使用したロータス銅の製造法と気孔分布、ヒートシンクの放熱特性を左右するロータス銅の有効熱伝導率測定およびロータス銅ヒートシンクの放熱特性試験についてまとめ、その実用化状況を紹介する。

2. ロータス型ポーラス銅の製造法と気孔分布

図2にロータス銅の外観を示す。ロータス金属は一方方向性で微小な径の孔が多数ある多孔質金属である⁽⁵⁾。これらの孔は溶融した金属の中に溶解した水素などのガスが金属の凝固中に析出する時に形成される。ロータス金属は以下の特長を持っている。(1)直進性の孔がある。(2)孔径と気孔率が制御可能である。(3)数十から数百 μm の孔径を持つ。以上の特長よ

* 三菱電機株式会社先端技術総合研究所
機械技術部：1) 主席技師長

** 大阪大学産業科学研究所教授
Development of High Capacity Water Cooled Heat Sink Utilizing Lotus-Type Porous Copper; Tetsuro Ogushi*, Hiroshi Chiba**, Hideo Nakajima** (*Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation. ** The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University)
2005年10月31日受理

図2 ヒートシンクに使用したロータス銅の外観.

図3 ヒートシンクに使用したロータス銅の孔径分布 (dp_{max} : 最大気孔径, dp_{min} : 最小気孔径, dp_{mean} : 平均気孔径).

り、ロータス金属を水冷ヒートシンクに利用すると、微小孔の直進性の流路による低圧力損失と、温度境界層厚さの低減による熱伝達率の増大および孔表面積の増大効果により優れた放熱性能をもつヒートシンクが得られることが期待できる。

ロータス銅ヒートシンクに使用したロータス銅の顕微鏡写真から読み取った気孔径分布の例を図3に示す。気孔径はある範囲にまとまって分布しており、特に異常に大きな孔が存在せずヒートシンクとして好ましい分布となっている。図中にその最大、最小、平均気孔径を示した。ヒートシンクには平均気孔径で0.09 mm (気孔率 $\varepsilon = 29\%$)、0.3 mm (気孔率 $\varepsilon = 39\%$)の2種類を選択し、その放熱特性を評価した。

3. ロータス銅の有効熱伝導率

ロータス銅をヒートシンクとして有効に利用するためには、ロータス銅の孔の軸に垂直な方向の有効熱伝導率に対する孔の影響を把握する必要がある。ロータス銅のような異方性材料の熱伝導率を測定するために製作した一方向熱流定常比較法によるロータス銅の有効熱伝導率測定装置を図4に示す。試験片(ロータス銅)は熱伝導率が既知の銅ブロックで上下にはさまれ、上部のヒーターから下部の冷却部に一方に熱が流れたときの試験片およびブロック中の温度勾配の測定から熱流と試験片の有効熱伝導率が求められる。ロータス銅の孔の軸に垂直な方向の有効熱伝導率 $k_{eff\perp}$ の実測値と Behrens⁽⁶⁾による予測式(図5中式(1))との比較を図5に示す。ロータス銅の気孔率を変化させたときの孔の軸に垂直な方向の有効熱伝導率 $k_{eff\perp}$ の実測値が Behrens による予測式と良く一致していることが分かる。

4. ロータス銅ヒートシンクの放熱特性

ロータス銅ヒートシンクの優れた放熱特性を明らかにする

図4 ロータス銅試験片の有効熱伝導率測定装置.

図5 ロータス銅の有効熱伝導率の実測値と Behrens による予測式(1)との比較(k_s : 素材の熱伝導率, $k_{eff\perp}$: 孔の軸に垂直な方向の有効熱伝導率).

図6 ロータス銅ヒートシンク A, B の構成と仕様.

ため、ロータス銅ヒートシンクの他に、従来の溝型ヒートシンクおよびマイクロチャンネルヒートシンクの3種類のヒートシンクの放熱特性を評価した。ロータス銅ヒートシンクは図6に示すように、平均気孔径が0.09 mmの直線状の孔をもつ厚さ2 mmのロータス銅フィンをもつ1個ベース板にロウ付け接合したもの(ヒートシンクA)および平均気孔径0.3 mmで厚さ3 mmのフィンを3個ロウ付けしたもの(ヒートシンクB)の2種類を使用した。一方、従来の溝型ヒートシンクとマイクロチャンネルヒートシンクはベース板に板状フィンがロウ付けによって一定のピッチで接合されて溝状の流路を構成したものからなり、溝型ヒートシンクはフィン間隙が3 mm、フィン肉厚が1 mm、マイクロチャンネルヒート

図7 ヒートシンク放熱性能評価装置。

シンクはそれぞれ 0.5 mm, 0.5 mm で全て銅製である。

ヒートシンクの熱伝達特性を評価するための実験装置を図7に示す。ヒートシンク上面には発熱素子を模擬した加熱用のヒーターブロックがはんだ付けされている。フィン間を通る冷却水はポンプと冷却水冷却器が一体となったサーキュレーターによって、フィルターを通してダクト内を循環している。冷却水には純水を使用した。冷却水のテストダクト内の入口温度 T_i 、出口温度 T_o 、銅製のベース板の温度 T_b およびヒートシンク前後間の圧力損失を測定した。

ヒートシンクの熱伝達特性を評価するために、それぞれのフィン根元の面積 A_b を基準とした熱伝達率 $h_i (= Q / (A_b (T_b - T_i)))$ を用いた。ここで、 Q はヒーターの入力熱量から断熱材を通過する熱損失分を除去した熱量である。なお、従来の溝型フィンの熱伝達特性は従来使用されている計算式による予測のみを行った。図8に流量と圧力損失の積で表わされるポンプ動力に対するヒートシンクの熱伝達率 h_i を示す。図中の記号は実測値、実線はロータス銅の有効熱伝導率および従来から知られている孔中の熱伝達率の式⁽⁷⁾を用いて計算した予測値である。ポンプ動力が 0.02 W 時の熱伝達率 h_i を比較すると、孔径 0.09 mm のロータス銅ヒートシンク A の実測値はマイクロチャンネルより 2 倍、従来の溝型ヒートシンクより 5 倍も高い値を示し、ロータス銅ヒートシンクの熱伝達率は非常に大きいことが分かる。さらに目標である 100000 W/m² K 以上のベース面積基準の熱伝達率を達成できることも明らかとなった。また、ロータス銅ヒートシンクの放熱特性は孔径が小さいほど大きいこと、さらにその予測値は±20%の精度で実測値と一致しており、ロータス銅ヒートシンクの放熱特性はロータス銅の有効熱伝導率および孔中の熱伝達率の式を用いることにより予測できることも明らかとなった。

図8 ポンプ動力に対する各種ヒートシンクの放熱特性としてのベース面積基準の熱伝達率比較。

5. 実用化状況と今後の展開

ロータス型ポーラス銅を使用した高性能水冷ヒートシンクは要求される高熱伝達特性を達成しており、今後、特に発熱密度の高いパワー素子、レーザーダイオード、高周波素子等の冷却への適用が見込まれる。現在はロータス銅ヒートシンクを実装した駆動システムについての開発フェーズに移っており、実用化開発が急務である。

6. 特 許

本技術開発は、ロータス銅製法特許として特開平10-88254、ヒートシンクへの応用特許として特願2000-178170を含め、国内外計32件の出願を行っている。前者は海外5カ国での特許権を取得している。

文 献

- (1) 西尾茂文：第2回熱設計と熱制御シンポジウム予稿集，A5-1-1～A5-1-11，(2002)。
- (2) D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease: IEEE Electron Device Letters, 2, 5(1981), 126-129.
- (3) X. Wei and Y. Joshi: Proceedings of ASME IMECE 2000 Int. Mec. Eng. Congress & Exposition, 366(2000), 329-337.
- (4) H. Y. Zhang and X. Y. Huang: Int. J. Heat Mass Transfer, 44(2001), 1593-1603.
- (5) H. Nakajima, S. K. Hyun, K. Ohashi, K. Ota and T. Murakami: Colloids and Surfaces A, 179(2001), 209-214.
- (6) E. Behrens: J. Comp. Mater., 2, 1(1968), 2-17.
- (7) F. W. Dittus and L. M. K. Boelter: Univ. Calif. (Berkeley) Pub. Eng., 2(1930), 443.