

令和 6 年 10 月 18 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04180

研究課題名（和文）革新的内部構造を持つ新規積層型ベーパーチャンバーの創製

研究課題名（英文）Development of a novel flat laminate vapor chamber with innovative inner structure

研究代表者

水田 敬（MIZUTA, Kei）

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：10336323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：革新的内部構造を有する新規積層型ベーパーチャンバーについて研究開発を行った。本新規構造においては、従来個別の部材が実現していた構成を、新規開発した中板部分に集約することにより、厚み方向の積層構造を簡素化することが可能となった。研究開発成果より、従来型の積層型ベーパーチャンバーでは不可能であった様な薄型構造を実現しながら、従来構造の利点であった面方向熱伝導率については、従来同様10,000 W m⁻¹ K⁻¹を達成することが明らかとなり、薄型化を実現しながらも高い熱拡散性を発揮することが確認された。さらに、本開発品に関して出願していた特許についても、本事業期間内に特許査定を取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究開発成果は、従来型の積層型ベーパーチャンバーでは厚過ぎるために適用できなかったような分野へも適用可能であることから、より広範な熱問題の解決に資することが可能である。具体的には、薄型筐体などにおいて半導体の熱問題を解決することにより、動作効率の改善や信頼性の向上に貢献可能となる。また、本研究開発成果は特許査定を得ていることから、速やかな社会実装が期待される。

研究成果の概要（英文）：Newly developed ultra-thin vapor chamber with innovative inside structure has been investigated. This newly developed vapor chamber is thinner than a conventional flat laminate vapor chamber, called FGHP (Fine Grid Heat Pipe), because this ultra-thin FGHP has multi-functional inner plate which replaces multiple materials stacked up inside a conventional FGHP. Results shows that this ultra-thin vapor chamber achieved a lot thinner structure with as high as 10,000 W m⁻¹ K⁻¹ in planner thermal conductivity, which was of the same level in heat dissipating ability with conventional one. Moreover, this structure obtained a patent grant in this time period.

研究分野：伝熱工学

キーワード：vapor chamber thermal conductivity ultra-thin thermal solution

1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器は小型・高性能化しており、発熱密度は増加の一途をたどっている。電子機器は、温度が上昇すると動作効率が低下することに加え信頼性の問題も発生するため、ヒートシンクや液冷システムなどの放熱システムを用いて、適正な温度範囲に管理することが必須である。放熱システムにおいては、まず電子機器から発生する熱を放熱システムの受熱部において伝導伝熱で受け取るが、放熱システム内で最も熱流束が高いのは電子機器から熱を受け取る受熱部であるため、この受熱部において熱を効果的に拡散させて熱流束を低減することが出来れば、その後の放熱システム内および環境への伝熱過程における温度上昇を効果的に抑制することが可能となる。この様な背景から、従来使用されてきた銅やアルミなどの金属プレートに比べて熱を拡散させる能力の高いベーパーチャンバーが注目されている。ベーパーチャンバーに関する論文は、1983年に初めて出版されて以来371報の報告があるが、2010年以降の報告が全体の76%を占めており(Scopus上での調査結果、2020年10月末時点)、近年ますます盛んに研究がなされている。ベーパーチャンバーには真空状態で冷媒が封入されており、その冷媒が外部から熱を受けることによって蒸発する。冷媒の蒸発により生じる圧力差によって気化した冷媒は凝縮部(=放熱部)に移動し、ヒートシンクや液冷システムなどに熱を受け渡すことによって冷媒が凝縮し、液化する。液化した冷媒は、ウィック部において生じる毛細管力によって受熱部へと帰還し、次のサイクルへと移行する。この一連の現象で生じる潜熱輸送によって、ベーパーチャンバーによる迅速な熱拡散が実現されている。

研究代表者がこれまで開発した、無酸素銅プレートを拡散接合技術によって積層して作製したベーパーチャンバーFGHP(Fine Grid Heat Pipe)は、内部構造を精密エッチング技術により形成しており、一連の冷媒循環の各過程を最適化することが可能となった。これにより、種々のベーパーチャンバーの中で、熱透過率(熱源面積基準)について、最も高い性能をFGHPにより実現することが可能となった(K. Mizuta(応募者) et al., Applied Thermal Engineering, 104 (2016) 461-471)。これはすなわち、受熱部にFGHPを用いることによって、最も効果的に熱を拡散できることを示しており、従来よりも高密度実装しても電子機器の温度上昇を効果的に抑制できることから、高性能化と信頼性の向上に貢献することが可能となった。

また機器を設計する際には、熱流体シミュレーションを援用することによって、合理的な設計を迅速に行うことが可能となる。熱流体シミュレーションにおいては、熱の伝えやすさを表す指標である熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]が必要となるが、従来、ベーパーチャンバーの伝熱特性はもっぱら熱抵抗により評価されており、熱伝導率を用いた評価はなされていなかった。これは、ベーパーチャンバーの伝熱特性が、その内部抵抗に起因して異方性を持つことに加え、温度により変化するため、従来異方性材料に用いられてきたレーザーフラッシュ法や、ホットディスク法、周期加熱法、3 ω 法など非定常応答を利用する方法は、ベーパーチャンバーに対しては適用できないことが原因であった。そこで応募者は、異方性材料に適用可能な新たな定常法を開発し、熱伝導率を高精度に定量化できることを示した(K. Mizuta(応募者) et al., Applied Thermal Engineering, 146 (2019) 843-853)。この方法を用いて熱伝導率を測定した結果、受熱部温度が90°Cを超えたとき、FGHPの面方向熱伝導率は10,000 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ を超えることが明らかとなった(K. Mizuta(応募者) et al., Applied Thermal Engineering, 146 (2019) 843-853)。これは、銅の熱伝導率の25倍以上であり、種々のカーボン系素材をも凌駕する圧倒的に高い熱伝導率である。本手法を用いて面方向および厚み方向の熱伝導率を定量化することにより、ベーパーチャンバーを組み込んだ放熱システムの熱流体シミュレーションが可能となり、合理的な設計の迅速化に貢献した。NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム事業においては、FGHPをLED実装基板として用いたLED照明を開発し、平成29年度の省エネ大賞を受賞した(NEDO掲載記事：http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100039.html)。

この様に、FGHPは高密度実装を実現する技術として非常に有望であるが、内部構造の構成により薄型化が困難であることから、これまで適用可能な分野は、大光量LED照明など比較的大きな据え置き型機器に限定されてきた。

2. 研究の目的

本研究においては、革新的内部構造を持つ新規積層型ベーパーチャンバーを創製することによって、電子デバイスにおける発熱問題を解決し、超高密度実装時や高負荷駆動時の信頼性向上に貢献することを目的とする。

具体的には、これまで応募者が開発してきた積層型ベーパーチャンバーの内部構造を発展させることにより創製された革新的内部構造によって、従来は積層部材のそれぞれが担っていた冷媒循環の働きを、単一部材で実現することが可能となる。これにより、従来の積層型ベーパーチャンバーが有していた利点である熱伝導率の高さや設置姿勢が熱的性能に与える影響の低さなどをさらに向上させつつ、これまでの構造では難しかった薄型化を実現することが可能となる。革新的内部構造の創製においては、シミュレーションおよび可視化実験により冷媒循環特性評価を行うことによって、研究の実効性向上を図る。

本研究で実現する革新的内部構造をもつ新規積層型ベーパーチャンバーは、これまで適用されてきた大光量 LED 照明などの据え置き型機器に加えて、さらなる小型・高性能化が求められているモバイルデバイスやモビリティ分野などにおいても、電子デバイスの熱問題解決に資することが可能となる。本研究成果は、我が国の半導体・エレクトロニクス産業に対し、世界的な競争力をさらに高めるための、決定的なストロングポイントの創出に貢献する。

3. 研究の方法

本研究開発においては、従来同様、気液二相シミュレーション法である VOF (Volume of Fluid) 法を用いることにより、冷媒循環性能の定量的な評価を行った。なお、シミュレーション結果の妥当性については、3D プリンターで作製するサンプルを用いた流動特性評価結果とシミュレーション結果との比較により検証し、両者の差異が最小となる様にシミュレーションにおけるパラメーター値を最適化した。内部構造の最適化については、冷媒循環性能評価に加えて、伝熱特性評価を用いて実現した。伝熱特性の評価においては、ベーパーチャンバーの評価として一般的に行われる熱抵抗評価に加え、応募者が開発した手法(K. Mizuta(応募者) et al., Applied Thermal Engineering, 146 (2019) 843-853)を用いた熱伝導率の定量化を行うことにより、実効性の向上を図った。

4. 研究成果

まず、新規に創成した内部構造(特願 2020-001086(2020 年 1 月 7 日出願)、特許 7448136)について、3D プリンターを用いて種々の素材・構造について、特性に与える影響について検討を行った。その結果、3D プリンティングを行うベースモデルの形状を工夫することにより、3D プリンターメーカーが推奨する最小サイズの貫通孔や溝幅・深さよりも小さなスケールの構造を形成することに成功した。これは、内部の微細流路構造を構成するために好適である。また、3D プリンターで使用する素材による接触角の違いを定量化し、それぞれの素材に適した内部構造を決定した。

また、新規に創成した内部構造(特願 2020-001086(2020 年 1 月 7 日出願)、特許 7448136)について、得られた知見を検証し、合理的な設計手法を確立した。具体的には、特許 7448136 出願時に得られていた知見に加え、本事業において得られた内部構造と冷媒循環特性、さらには、伝熱特性との関係から、応募者が開発した積層型ベーパーチャンバーがドライアウトせず連続的に作動する条件について、冷媒に要求される熱的条件と、それを満足するための内部構造に関する条件を明確化し、それをもとに設計モデルを構築した(特願 2022-147185(2022 年 9 月 15 日出願)、特開 2024-042451)。

その結果、従来型の積層型ベーパーチャンバーでは層厚が 2 mm 程度であったのに対し、本研究開発では層厚 1 mm と従来の半分の厚みを達成しながら、従来と同等の高い熱拡散性能を実現した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 水田 敬、歳川真也、宮本大輝、二井 晋
2. 発表標題 Thermal solution for a densely mounted LEDs using a flat laminate vapor chamber
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 共著（含む、水田 敬）	4. 発行年 2023年
2. 出版社 株式会社 技術情報協会	5. 総ページ数 613
3. 書名 次世代半導体パッケージの最新動向とその材料、プロセスの開発	

〔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
---------	---------