

強制振動流型ヒートスプレッダの開発に関する研究

学位論文内容の要旨

Moore の法則は、コンピュータ内の CPU(Central Processing Unit) の性能上昇に関して述べているものとして広く知られている。実際に Moore 氏が述べたのは、『半導体に集積されるトランジスタの数は、24 カ月おきに 2 倍になる』であるとされており、世界最大の半導体メーカー Intel 社の創設者の一人である Moore 氏が 1965 年に経験的に提唱したと言われている。この Moore の法則は、あるコンピュータ業界に精通したメディアをして『『電気技術者をうまくまとめ上げたときに、シリコンで何かできるか』に関する不気味なほど正確な観測』と言わしめたように、半導体技術はこれまでこの法則に沿うように進歩してきた。だが一方、半導体の微細加工技術の発展を根拠としているため、2010 年代には微細化が原子レベルにまで到達してしまい、Moore の法則は通用しなくなると予想されていた。実際のところ、集積密度の向上ペースはこれより鈍化しているが、「集積密度」を「性能向上」に置き換えて考えると、この法則は現在でも成立しているとされ、今後の半導体の性能向上を予測する際の指標として広く用いられている。

CPU の性能の向上に表裏一体として、消費電力の上昇、すなわち発熱密度の上昇の問題が存在している。1980 年代にトランジスタがそれまでのバイポーラから、低電圧で動作する CMOS へ移行したことにより消費電力が大幅に低下した事実があるが、それを除くと CPU 消費電力は性能向上にほぼ比例して上昇していると言ってよい。CPU の低電圧化、マルチコア化など、消費電力を抑える技術も発展しているものの、現在のところ発熱密度の上昇は止まる気配を見せていない。集積度の向上により、MPU(Micro Processing Unit) という名称が CPU に替わって広く使われている今日、MPU 表面における発熱密度は原子炉並み(数百 W 毎平方 cm)にまで達している。以後も Moore の法則に従うものと考え、MPU の発熱密度が「太陽の表面並み」となる日もそう遠くないと言われている。

上昇する発熱密度に呼応して、CPU の冷却技術も発展を遂げてきている。初期では、CPU ダイにヒートシンクを取り付ける程度のものであったが、今日ではヒートパイプをはじめとして、サーマルヒンジや液循環方式など様々な冷却方式が採用されている。だが、さらなる発熱密度の上昇が必至である MPU の冷却にはより冷却性能の高い冷却デバイスが求められており、これまで、半導体の微細加工技術が支配的であったコンピュータの性能向上であったが、今日では冷却技術がそのボトルネックのひとつとなっていると言える。

管内振動流による熱輸送は、流体の正味の変位を伴わずに熱のみを高温部から低温部へと輸送でき、高い実効熱伝導率を実現し得ることからドリームパイプとも呼ばれている。管内振動流に関してはこれまで、実験的、解析的に多くの研究がされてきており、熱の良導体である銅に比べて数十から数百倍もの実効熱伝導率を実現できることから熱輸送機器として応用されることが期待されている。だが、これまでに実際の熱輸送デバイスに应用されている例はあまり見られない。

そこで本研究では、管内強制振動流を用いた熱拡散デバイスを開発することを最終目的とした。ま

ず、その第一段階として、円管および矩形内の振動流による熱輸送に関する基礎特性を実用的な条件に関して詳細に検討した。そのうえで、実際に流路を内蔵した薄型熱拡散デバイスを作製し、流路内の作動流体に振動流を付与しその熱拡散性能を評価した。作製した熱拡散デバイスは流路を放射状に蛇行させて配置し、中心部での狭小な領域での入熱を面方向に効率よく輸送する構造である。さらに、数値解析を行うことにより、諸パラメータの影響を明らかにし、最適な熱拡散デバイスの流路構造について検討した。

本論文は 5 章より構成されている。第 1 章において、本研究の背景、振動流による熱輸送に関する従来の研究、および本研究の目的について述べている。

第 2 章では、単一の円管内における振動流による軸方向の熱輸送に関する実験的検討を行い、その熱輸送特性について明らかにしている。また、円管および円管内の熱流動場に関する数値解析を行い、熱輸送特性に及ぼす振動数、円管の内径、材質、肉厚、および振動流の波形等の影響を明らかにしている。

第 3 章においては、実装時により有効性の高い矩形管内の振動流による軸方向熱輸送について実験的検討を行い、その熱輸送特性について明らかにしている。また、高さ方向の速度プロファイルを仮定した実用性の高い数値解析手法を提案しその妥当性を確認した上で、矩形管内の振動流の熱輸送特性に及ぼす流路高さ、流路アスペクト比、および管壁の材質等の影響について詳細に検討している。

第 4 章では、第 2 章、および第 3 章により得られた単一管内の振動流による熱輸送特性を踏まえて、流路を内蔵した薄型ヒートスプレッダを実際に作製し、実験的検討を行い、その熱拡散特性を明らかにしている。今回提案した放射状蛇行流路を有するヒートスプレッダは、銅板を上回る熱拡散を実現することを確認している。また、熱回路網法による数値解析を行い、熱拡散特性に及ぼす種々のパラメータの影響を明らかにしている。その結果、今回提案したヒートスプレッダは、ヒートスプレッダ全体の熱抵抗に占める母材から作動流体への熱抵抗の割合が比較的大きく、受熱部流路の狭小化等により流体への熱伝達を改善することにより、数割の性能向上を実現できる見通しが得られた。

第 5 章は結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 川 昌 弘

副 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 近 久 武 美

副 査 助 教 授 山 田 雅 彦

学 位 論 文 題 名

強制振動流型ヒートスプレッダの開発に関する研究

コンピュータの心臓部である CPU(Central Processing Unit) の性能向上は著しく、それに伴って LSI チップ表面の発熱密度は年々増加している。この傾向は今後も持続すると考えられ、その冷却は半導体素子の安定動作・信頼性を保障する上で大きな技術課題となっている。年々上昇する発熱密度に呼応して、CPU の冷却技術も発展を遂げてきている。初期には、CPU ダイにヒートシンクを取り付ける程度のものであったが、今日ではヒートパイプをはじめとして、サーマルヒンジや液循環方式など様々な冷却方式が採用されている。しかしながら、今後更なる発熱密度の上昇が必至である CPU の冷却には、より冷却性能の高い冷却デバイスの開発が必要不可欠であり、そのキーとなる課題は、微小な LSI チップ表面から高密度で発生する熱を平面的に拡散させる、いわゆるヒートスプレッダの開発である。

ところで細管内振動流による熱輸送は、流体の正味の変位を伴わずに熱のみを高温部から低温部へと輸送でき、高い実効熱伝導率を実現し得ることからドリームパイプとも呼ばれている。管内振動流に関してはこれまで、実験的、解析的に多くの基礎的な研究がなされてきており、熱の良導体である銅に比べて数十から数百倍もの実効熱伝導率可以实现することから熱輸送機器としての応用が期待されている。

本研究では、管内強制振動流を用いた熱拡散デバイス(ヒートスプレッダ)を開発する際の設計手法を確立すると共に、それに基づき高性能なヒートスプレッダを実現することを最終目的としている。

まず、その第一段階として、円管および矩形管内の振動流による熱輸送に関する基礎特性を実用的な条件に関して詳細に検討を行い、これまでの研究では明らかにされていない種々の設計パラメータの影響を定量的に明らかにした。そのうえで、実際に流路を内蔵した薄型ヒートスプレッダを作製し、流路内の作動流体に振動流を付与しその熱輸送特性を評価し、良好な熱拡散性能を有することを確認している。作製したヒートスプレッダは流路を放射状に蛇行させて配置したもので、中心部での狭小な領域での入熱を面方向に効率よく輸送・拡散させる構造である。さらに、熱回路網法による数値解析を行うことにより、諸パラメータの熱輸送特性に及ぼす影響を明らかにし、ヒートスプレッダの更なる性能上を実現できる流路構造について提案を行っている。

本論文は 6 章より構成されている。第 1 章は序論であり本研究の背景を述べ、第 2 章において振動流による熱輸送に関する従来の研究、および本研究の目的について述べている。

第 3 章では、単一の円管内における振動流による軸方向の熱輸送に関する実験的検討を行い、その熱輸送特性について明らかにしている。また、円管および円管内の熱流動場に関する数値解析を行い、熱輸送特性に及ぼす振動数、円管の内径、材質、肉厚の影響を評価すると共に、振動流の波形の影響を検討し、正弦波に比べて矩形波の場合には、熱輸送特性が 5 割程度増加することを明らかにしている。

第 4 章においては、実装面で、より有効性の高い矩形管内の振動流による軸方向熱輸送について実験的検討を行い、その熱輸送特性について明らかにしている。また、高さ方向の速度プロファイルを設定した実用性の高い数値解析手法を提案しその妥当性を確認した上で、矩形管内の振動流の熱輸送特性に及ぼす流路高さ、流路アスペクト比、および管壁の材質等の影響について詳細に検討し、熱容量の大きい管材質の選択が熱輸送の向上につながることを指摘している。

第 5 章では、第 3 章、および第 4 章で得られた単一管内の振動流による熱輸送特性を踏まえて、流路を内蔵した薄型ヒートスプレッダを実際に作製し、実験的評価を行い、その熱拡散特性を明らかにしている。その結果、今回提案した放射状蛇行流路を有するヒートスプレッダは、銅板を上回る熱拡散を実現することを確認している。またこれと平行して熱回路網法による数値解析を行い、熱拡散特性に及ぼす種々のパラメータの影響を明らかにしている。種々の検討の結果、今回提案したヒートスプレッダは、ヒートスプレッダ全体の熱抵抗に占める母材から作動流体への熱抵抗の割合が比較的大きく、受熱部流路の狭小化等により流体への熱伝達を改善することで、更なる性能向上が実現できることを示唆している。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べている。
これを要するに、本研究は、年々発熱密度が増大する CPU の冷却の鍵を握る熱拡散デバイスに関し、細管内振動流による高効率熱輸送特性を利用した新しいヒートスプレッダの提案を行うと共に、種々の条件下における熱輸送特性を明らかにし、数値解析技術を含めて、ヒートスプレッダの開発に必要な設計手法を確立しており、電子機器冷却および伝熱工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。