

半導体の液体冷却性能の向上を目的とした沸騰特性の改善に関する研究

新本, 康久

<https://doi.org/10.15017/1931916>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 新本 康久

論 文 名 : 半導体の液体冷却性能の向上を目的とした沸騰特性の改善に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、大型かつ高発熱密度の半導体などへの対応が可能な高性能冷却器の開発を目的とし、沸騰冷却を対象とする。まず電気絶縁性の高い媒体の限界熱流束を増大させる方法として、平行平板間の狭あい流路伝熱面に直接液体を導入する主流路とは別に、気泡底部への液体供給を促進するために補助的な液体供給が可能な副流路を持つ狭あい流路冷却器の構造を考案し、実験によりその効果を確認した。また、データセンタ内に設置されるデータサーバを模擬した冷却システムを製作し、考案した冷却器構造の有用性を確認した。さらに、熱伝達係数の向上をはじめとする冷却特性の向上を目指すため、新たな冷却システムについて検討した。その一つとして、卓越した沸騰冷却特性を有する可能性のある非共溶性混合媒体について、円管および平行平板間狭あい流路を用いて実験的に検証した。本論文は全 8 章から構成される。

第 1 章では、半導体冷却の現状と冷却技術に関する課題およびデータセンタを対象とした冷却システムの現状と課題について述べ、本論文の目的を説明した。

第 2 章では、沸騰熱伝達の基本特性、限界熱流束の増大、沸騰熱伝達の促進、混合媒体を用いた沸騰熱伝達、混合媒体の沸騰熱伝達特性およびマランゴニ効果に関する既存研究について調査した。

第 3 章では、高発熱密度の発熱面に対応できる小型高性能冷却システムを開発するために、限界熱流束を増大させることを目的として、液体供給用の副流路を主流路とは別に設けて、合体気泡底部に液体を直接供給可能な構造を考案した。副流路を主流路の側面および背面に配置したテストセクションを製作し、試験液体としてフロリナート FC72 を使用して、狭あい流路内の強制流動沸騰実験を実施した。伝熱面上に主流路内の流れと直角方向に V 字形の溝を設け、さらに液体供給のみを目的とする副流路が存在することにより、高熱流束時に伝熱面上に形成される扁平気泡の底部に、効果的に液体が供給される結果、平滑面の場合と比べて、明確な限界熱流束の増大効果を確認した。幅 30 mm×流れ方向長さ 150 mm の伝熱面を用いた背面副流路配置の実験では、主流路の間隙幅 2 mm の場合について、フロリナート FC72 を使用し、入口液体流速 0.065 m/s に低く保ち、かつ入口液体サブクール度 15 K という条件下で、下流域における限界熱流束値 28 W/cm² を得た。

第 4 章では、データセンタの冷却システムの現状と問題点について述べ、空冷の代わりに、液体を用いた沸騰・二相流を適用する新たな冷却システムを提案した。沸騰・二相流冷却に最適な冷却ジャケットの設計・製作および強制流動沸騰実験のための試験ループを製作した。また実機への適用を目的として、試験液体として水および FC72 を使い、30 mm×30 mm の伝熱面積を持つ沸騰・二相流冷却ジャケットから 300 W の除熱を確認した。さらに間隙幅、流量配分、流路姿勢、冷却媒体をパラメータとした実験を行い、これらの影響を調べた。

続いてデータサーバ用サーバラックを模擬した沸騰・二相流冷却システム評価装置を製作し、同様の強制流動沸騰実験を行った。試験液体として NOVEC7100 を用いて同一のテストセクションを

3台並列し、模擬サーバの冷却能力を調べた。体積流量 0.6 l/min, 入口液体サブクール度 33 K の条件において、全てのテストセクションで 300 W の除熱能力を確認した。

第 5 章では、熱媒体を用いて半導体を冷却する場合に要求される性質、および冷却システムを構築する際に要求される事項について述べた。まず新たに導入された 2 成分の非共溶性混合媒体の性質について、相平衡図を用いて説明した。高密度低沸点媒体として FC72 を、低密度高沸点媒体を水とした非共溶性混合媒体 FC72/water を例として、0.1 MPa における蒸気圧曲線上で平衡状態を示し、両方の液体が自己圧縮効果によって過冷却状態であることを説明した。FC72/water を試験液体とした既存のプール沸騰実験の結果から、非共溶性混合媒体を用いた沸騰冷却の有用性についてまとめた。さらに、電気自動車のインバータ冷却を想定し、高密度低沸点媒体として FC72 を、低密度高沸点媒体としてエチレングリコール水溶液 (50wt%) を混合した非共溶性混合媒体の不凍液についてプール沸騰実験によってその有用性を示した。

第 6 章では、試験液体として FC72/water の非共溶性混合媒体を使用し、円管を水平に配置して管内強制流動沸騰実験を行い、その実験結果を考察した。加熱部の出口側に配置された観察部において、非加熱状態での流動様式を観察した。その結果、6 種類の流動様式が確認され、沸騰時の気液分散が非加熱時のそれに強く依存することが判明した。FC72 に伝達される熱の総加熱量に対する割合を表すパラメータを導入することにより、加熱区間の出口で測定された流体温度が、各熱流束レベルに対して熱バランス式によって良好に再現された。さらにこのパラメータを使用して、管軸に沿った FC72 の蒸発中の流体温度の評価を行い、局所熱伝達係数の分布を求めた。この結果、非共溶性混合媒体の熱伝達は、非加熱状態での流動様式に強く依存することがわかった。非共溶性混合媒体の適用が強制流動沸騰系においても冷却性能の改善のための有用な手段となることが確認された。

第 7 章では、試験液体として非共溶性混合媒体 FC72/water を使用し、間隙幅 2 mm, 1 mm, 0.5 mm の水平置き平行平板間狭あい加熱流路を用いた強制流動沸騰実験を行った。伝熱面である底面からの加熱量の大部分は、高密度低沸点媒体に一旦伝わり、その飽和温度近くまで混合液体の温度が上昇し、その後高密度低沸点媒体の沸騰開始とともに蒸発潜熱として伝えられる。さらに低密度高沸点媒体も強制対流から沸騰に移行する。低沸点液体への核沸騰熱伝達に加えて、低沸点液体から発生した扁平気泡は、気泡の発生により増加した液体流速および高沸点液体の流れの攪拌によって、高沸点液体の強制対流熱伝達の促進に対して正の効果をもつ。高沸点媒体の核沸騰熱伝達では、低沸点媒体からの気泡発生は、伝熱面上に薄い液膜を形成した状態で扁平気泡の拡大によって熱伝達を促進するが、熱流束の増大に伴って、これらの扁平気泡の底部にドライパッチの拡大を伴うことから促進効果は減少してゆく。中熱流束では、高沸点媒体に低沸点媒体を追加することにより、表面温度を高沸点媒体よりも低く保つことができる。熱流束と表面温度との関係は、異なる組み合わせの非共溶性混合媒体を使用することによって変更可能である。極端に小さい間隙幅の加熱流路では、扁平気泡の過度の成長によって引き起こされる伝熱劣化を抑制するために、より沸点の高い低沸点媒体や、より小さい表面張力の低沸点媒体を使用することが必要である。

第 8 章では、本論文の結論をまとめた。