

審査の結果の要旨

氏名 岡本 有貴

本論文は、**On-chip LSI Cooling Device Using Electroosmotic Flow Micropump Integrated with High-Voltage Generator** (邦題：高電圧生成回路集積電気浸透流マイクロポンプによるオンチップ LSI 冷却機構) と題する。大規模集積回路 (**Large Scale Integration**、**LSI**) の性能向上並びに三次元集積回路 (**3DIC**) への発展を阻む主因の一つである局所的発熱部位 (ホットスポット) の冷却手法として、集積回路上にマイクロ流路を集積し、電気浸透流を起こすことで発生熱を能動的に除去する仕組みを考案、仕組みを実現するための微小電気機械 (**Microelectromechanical Systems device**、**MEMS**) 電気浸透流ポンプならびに駆動源として必要な高電圧生成回路を同一チップ上に集積するための効果的なプロセス手法を提案、試作チップによる実験及び解析結果に基づいて効率的なオンチップ LSI 冷却機構の設計手法を論じている。英語で執筆され全 7 章および付録からなる。

第 1 章は「**Introduction**」である。微細化が限界を迎える中で引き続き集積回路が発展するためには三次元集積が必要であること、発生する熱の引き抜きができなければ真の実用化は困難であることに注目し、**3DIC** との集積化を指向した **MEMS** 冷却手法に関する先行研究の調査を行っている。冷却手法として冷媒循環方式が、循環力の発生源として電気浸透流 (**Electroosmotic Flow**) マイクロポンプが有望であることを示し、ポンプの動作原理から数十～数百 V の高電圧が必要であることを論じ、本論文の構成を議論している。

第 2 章は「**Process Investigation of Post-Processed DTI**」である。標準 CMOS (論理回路用途) のトランジスタを、下地に絶縁膜を有するシリコン基板上に作製し、後加工プロセスを施すことで単一チップ上に高電圧制御回路を作製する効果的な後加工プロセス手法を論じている。手法の中核をなす、等方性エッチングの最適プラズマ加工条件を容易に同定するテスト構造を提案・実現した。

第 3 章は「**High-Voltage Switch & Generator**」である。標準 CMOS トランジスタのみを用いて回路設計により単体の数倍から数十倍の電圧を制御できることが特色である。20 段昇圧集積回路を試作し昇圧事実を確認、別 **MEMS** チップに接続して (オフチップ試験) 電気浸透流ポンプの動作に成功した。

第4章は「On-Chip Integrated EOF Micropump」である。標準 CMOS 回路の後加工により 10 段昇圧回路を実現し、同一基板上に幅 $400\mu\text{m}$ の流路をオンチップ集積した。昇圧回路により 5V 入力から 49.8V の電圧が生成され、0.1mM KCl 溶液を駆動して $137\mu\text{m/s}$ の電気浸透流が得られることを実験的に示した。性能指数(電源電圧あたりの流量)が先行研究比で 5 倍(164/27.8)以上向上した。

第5章は「Integrated Zeta Potential Measurement Sensor」である。提案する電気浸透流は、固体近傍の水溶液中に生ずる固定電荷を利用したものであり、ポンプの性能評価には固体物理学の接触電位差に相当する電位を精密に同定することが必要である。材料の表面状態に強く依存する電位を、非破壊で簡便に測定するための MEMS センサを考案試作し、有用性を示した。

第6章は「Cooling Measurement」である。発熱源と温度計に用いる大きさ $200\times 40\mu\text{m}^2$ の抵抗アレイ素子を LSI チップ上に試作、電気浸透流ポンプを集積化し、弱い (50V 印加)、強い (100V) 電気浸透流を其々与え、流速無し (0V) の場合と比較して有意に冷却が起こることを観測した。モデルを立案して結果を解析したところ、流体との熱交換とチップ内伝熱とを独立に取り扱う仮定による計算値よりも高い冷却性能が得られているという事実が明らかになった。流れによって熱の放散面積が等価的に広がるという仮説を立てれば、本実験及び、事実報告のみで理論的説明がなされていなかった先行研究の両方について統一的に説明可能であることが示された。以上の測定解析結果をもとに、集積回路冷却は流速が低速である場合と高速である場合との二種類の様相があり、それぞれについて最適な冷却システムの機械的構成が存在することを議論した。

第7章は「Conclusions」であり、本論文で示した研究成果を総括し、将来の展望を議論している。

以上これを要するに本論文は、将来の三次元集積回路に必須である LSI の局所的発熱冷却手法として集積化マイクロ浸透流ポンプによる冷却を考案し、実際に駆動のための高電圧生成回路を同一チップ上に集積して、試作チップによる冷却実験と解析を行い、LSI 冷却は流速に応じて二種類の様相があることを示した上で、最適なオンチップ冷却機構の設計手法を論じたものであり、電気電子工学に対する貢献が少なくない。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。