

## 審査の結果の要旨

氏名 森下 賢志

本論文は、「水上走行マイクロロボットの実現に向けた標準 CMOS 回路の高耐圧化及びモノリシック MEMS 集積手法」と題し、外部の配線からの電力供給に頼ることなく、自律的に水上走行を行う電子マイクロロボット素子を実現するという主題を通じて、大規模集積回路 (VLSI) と微小電気機械 (MEMS) とを融合させた新たな応用分野を開拓することを試み、必要となるモノリシック集積化手法ならびに関連 MEMS 加工技術の高度化を実現した成果をまとめた論文であり、全文 6 章からなる。

第 1 章は序論である。大規模集積回路 (VLSI) の単純な微細化によらず、センサやアクチュエータ素子を融合させ新たな機能を付加する、「More-than-Moore」と呼称される集積回路の研究分野に対する近年の高まる期待と、同分野を更に発展させるための方法論について議論している。特に本論文においては、具体的なアプリケーションを想定して必要な素子や技術の発明ならびに高度化を行ない、それらの素子や技術を一般化することで更なる応用を生み出すというモデルを提唱し、その一例として、水上走行するマイクロロボット素子を取り上げ、その実現に必要な要素を考察することによって、VLSI 分野、MEMS 分野の両方にとって価値のある新たな技術を生み出すことを本論文の課題として設定した。

第 2 章では、マイクロチップが推進力を得るための MEMS 技術について考察している。要素技術を比較検討し、エレクトロウェットティング (EWOD) と呼ばれる、基板表面上の親水・疎水性をコントロールする技術が有望であることと、従前のエレクトロウェットティングによる水上移動アクチュエータの問題点を明らかにし、それらを解決する手法として、従来は平面上でしか実現されなかったエレクトロウェットティングデバイスを、三次元シャドウマスクと真空蒸着成膜を用いて、マイクロ流路内の底面、側面合計 3 面に対してアクチュエータとなる電極を集積パターンニングする技術を提案し、実際に幅  $750\mu\text{m}$ 、深さ  $230\mu\text{m}$  という、深い三次元マイクロ流路中での液滴移動実験を行い、底面だけを駆動部分とする素子と比較して壁面全体を用いた方がより駆動電圧が低くなることを示し、これによって技術の優位性を実証した。

第 3 章では、真空蒸着に加え、スパッタリング法による成膜時にパターンニングを行なうための、三次元シャドウマスク技術の高度化について述べている。これは、2 章で議論した水上走行素子の駆動法である EWOD の動作電圧を低電圧化(一般的には  $100\text{V}$  であるところを  $15\text{V}$  以下)するために必須の材料であるタンタル (Ta) がスパッタリングによって成膜されることから必要となった技術である。蒸着法と異なりスパッタリングでは粒子の侵入角度が幅広い値を取るため、シャドウマスクによるパターンニングは不可能であった。この問題を、粒子の侵入角度を制限するコリメータ構造を、シャドウマスクに集積し、場所に依存して異なる最大侵入角度をコリメータの径によって調整することで解決することを、理論解析ならびに実験の両面から示した。近年益々用途が広がっている三次元 MEMS 構造に対する成膜パターンニング法として幅広く用いることができる汎用性を備えている。これは重要な成果である。

第 4 章では、前章までに議論したアクチュエータを制御する集積回路の構成法について考察した。特に、EWOD 素子の動作電圧は世界的に最も優秀な素子においても  $15\text{V}$  を必要とするが、標準的なロジック CMOS 集積回路の動作電圧は  $5\text{V}$  であり、少なくとも 3 倍の開きがある。この問題に対して、標準 CMOS 回路を SOI とよばれる、絶縁層をあらかじめ埋め込んだ基板上に作製し、その基板に MEMS 由来の深

掘りエッチング加工を施し、等方性エッチング、異方性エッチングを注意深く組みあわせることによって、完成後のトランジスタ素子同士を島状(メサ)に絶縁する手法を提案し、直列接続したトランジスタ回路によって高耐圧回路が実現できることを示した。実験では 5V 耐圧のトランジスタを相補的に 2 段ずつ重ねることで 10V のスイッチ特性を得ることができた。開発したポストプロセス工程が CMOS トランジスタ回路に及ぼす影響についても評価検討し、ポストプロセス後に駆動電流値が低下することを発見、その原因が固定電荷によるしきい値の上昇であることを同定し、400°C のホットプレート上で 30 分間熱処理(アニール)を行うことで元の特性を回復するという解決法までを一貫して示すことができた。同作製法は、トランジスタの絶縁工程によって、同時に MEMS 可動構造を作りこむことができるという、極めて汎用性の高い手法であり、重要な成果である。

第 5 章では、EWOD によるマイクロアクチュエータと、高耐圧化 CMOS 回路技術とを組み合わせることで、実際にどのような水上走行素子が実現できるかを議論した。提案した要素技術の汎用性や得意・不得意などといった特徴を他の手法との調査比較を交えて俯瞰的に議論した。

第 6 章において、得られた成果を総括し、結論とした。

以上これを要するに本論文は、自律的に水上走行を行う電子マイクロロボットを題材に取り、汎用 CMOS 集積回路の MEMS 後加工により高機能化・高耐圧化したモノリシック CMOS-MEMS 素子を用いて実現することを提案し、深掘りエッチングによる素子分離手法、立体面に対するシャドウマスクング手法等、一連の汎用微細加工プロセスを考案、作製したデバイスによって有用性を示したものであり、電気電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の論文として合格と認められる。