

論文の内容の要旨

論文題目

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

Towards One-Chip Pond-Skating Micro Robot: High-Voltage Control Circuits using
Standard CMOS and MEMS Monolithic Integration Technologies

氏 名 森下 賢志

本論文は、水上を走行可能な自律分散マイクロロボットチップの実現に向けた、CMOS回路とMEMS(Micro Electro Mechanical System)の同一基板上への集積に関する要素技術の研究開発について論じる。

MEMSは半導体加工技術を用いて作製され、電氣的・機械的な特性の融合によって大規模集積回路(VLSI)の新たな応用を拓く一つの切り札となるものと、近年特に期待が高まっている。その中でも特にMEMSとVLSIとを融合したMEMS-LSI集積システムは、いわゆる「ムーアの法則」の連続的な延長ではない新しいVLSIの地平を拓く(More than Moore)として期待が高まっている分野であり、LSIの発展のために今後必須のものとして世界中で注目されている。著しい発達を遂げたLSIの集積技術という資産を活かし、そこにMEMSという電気以外の物理量を扱うことができる多機能デバイスをも集積することで、今までのLSIだけでは実現できなかった新たなデバイスを実現できる。しかしまだこの分野は発展途上であり、現時点ではMEMS-LSI集積システムを使ったキラーアプリケーションが開発された例は少ない。この原因の一つに、デバイス作製に必要となるファブリケーション技術が未整備であり、MEMS-LSI集積システムの設計・製造メソッドロジーが確立されていないという点がある。MEMSは半導体加工技術を応用して作製されるものの、デバイスごとに材料や構造が多岐にわたり、LSIのようにプロセスを標準化することが難しいとされてきた。そのMEMSとLSIを集積したシステムが少数の例で研究されてきたが、製造コストの高さが課題となり、研究への挑戦の妨げとなっていた。

このような背景から本論文では新たなMEMS-LSI集積システムのアプリケーションとして水上自走式自律分散マイクロロボットチップをモチーフにし、その要素技術の研究を通じて、高い汎用性を持ち低コストで実現可能なMEMS-LSI集積手法を提案した。研究は大きく二つに分けることができる。一つはマイクロチップが水上走行するためのMEMS技術として提案した三次元流路内エレクトロウエッチングである。もう一つはそのようなマイクロチップ上のMEMSデバイスの駆動に必要な高耐圧CMOS素子の実現、そして高耐圧CMOSとMEMSの同一基板上への集積手法である。

第一章では本研究のモチーフとしてMEMS-LSI集積システムによって実現される水上走行自律分散マイクロロボットチップを扱う(図1)。水上走行マイクロロボットの実現に必要な要素技術をMEMSとLSIの両面から検討すると共に、それらを同一基板上へ集積する技術についても検討し、課題を明らかにした。

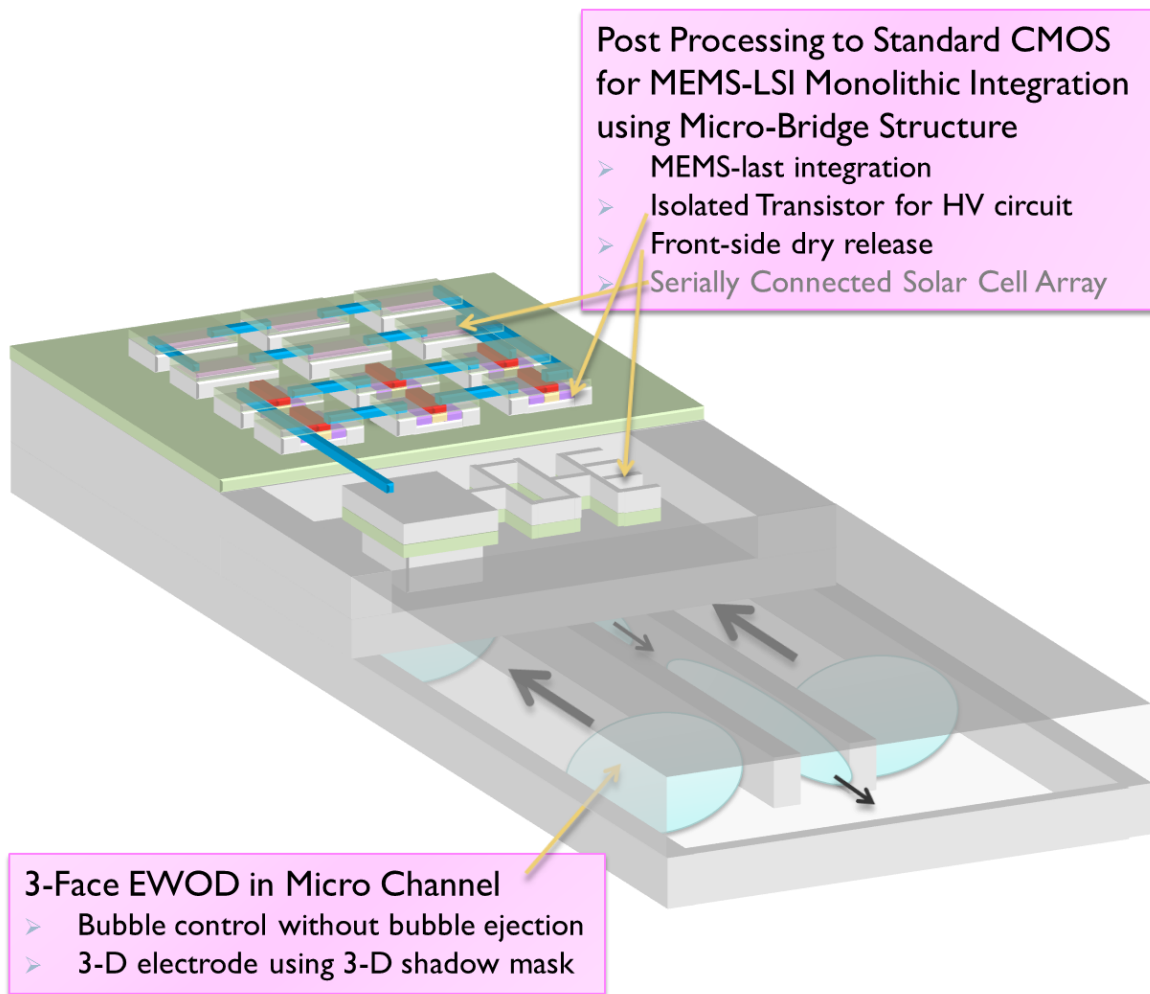


図1. CMOS-MEMS集積システムによる水上走行マイクロロボット

第二章ではMEMS側の要素技術として水上走行マイクロロボットの最重要課題である、泳ぐ技術を扱う。泳ぐためのMEMS技術を比較検討し、エレクトロウエットイングと呼ばれる基板表面上の浸水・疎水性をコントロールする技術を採用した。過去に提案されたエレクトロウエットイ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、それを解決する技術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エットイングデバイスを、三次元シャドウマスクを用いてマイクロ流路内へ集積する技術を提案した。従来の水上移動アクチュエータは平面上のエレクトロウエットイングを使用しており、移動の際に裏面に付着した泡を射出して推進力を得る。そのため移動のたびに泡を失うことが問題であった。泡を射出しなくても位置移動させるだけで水上移動を実現できることは明らかになっていたため、三次元の流路内で泡の位置操作を行うことができれば、射出すること無く水上移動が可能になると考えた。しかし従来の三次元シャドウマスクではエレクトロウエットイングを最も低電圧で実現可能な材料であるタンタルを成膜することができなかった。そこで垂直性の高い蒸着だけでなく、スパッタリングなどにも適用可能なポリメータ集積三次元シャドウマスクを提案した。これは重要な成果である。ポリメータは粒子の侵入角度を制限する機能を持つが、これをシャドウマスク内に集積することでデバイスの位置に合わせて粒子の侵入の調整が可能となる。またこれらの技術は本研究で扱うアプリケーションだけでなく、MEMS作製において広く使用可能なプロセス技術であるため、その汎用性について議論した。

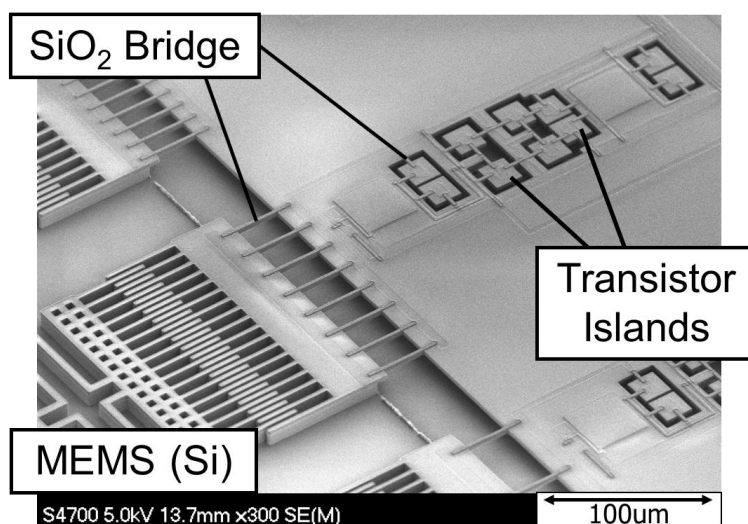


図2. CMOS作成済みSOIウェハへのポストプロセスによるMEMSの集積、MEMSとCMOSの基板絶縁、CMOSの高耐圧化

第三章では第二章で述べた水上走行MEMSやMEMSアクチュエータ、センサなどの駆動に必須であるCMOS回路とMEMSの集積について扱う(図2)。汎用性が高く低コストのCMOS-MEMS集積システムプロセスを実現するためには、専用のCMOSプロセス開発をすることなく、既存の汎用CMOSプロセスを取り入れることが必須だと考えた。そこでウェハだけをSilicon-On-Insulator (SOI)に変えた汎用CMOS作製済みのチップに対して、ポストプロセスによってMEMSを作製する技術を提案した。提案手法は異方性のエッチングと等方性のエッチングを組み合わせることで、ポストプロセスのみでCMOSとMEMSの基板絶縁やMEMS構造のリリースを実現した。しかしMEMSが同一基板上に作製可能となっても、近年のCMOS回路は、例えば1.8Vや1.2Vのように、低電圧化が進んでおり、市場で一般的に扱われているCMOSプロセスをそのまま流用するとCMOSとMEMSの間の動作電圧の差が問題となる。本研究で用いたCMOSテクノロジーは5V以下でしか動作しないのに対し、第二章で述べたエレクトロウェットティングは低いといっても15Vは必要とする。そこでこの電圧の差もポストプロセスによって解決する手法を提案した。提案手法はトランジスタをトレンチとSOIの中間酸化膜で囲むことで基板が周囲から絶縁された状態にし、各トランジスタの基板電位を任意の値にすることを可能とする。これにより基板上的LSIをディスクリートの四端子トランジスタのように扱うことが可能となるため、直列接続によってトランジスタの耐圧を超える電圧のスイッチングを実現した。

これらのプロセスはCMOS作成時にはレシピやシーケンスの変更は必要とせず、またポストプロセスにおいても一般的なMEMS作成に必要なエッチング装置のみを用いるため、プロセス開発に投資することなく市場のCMOSプロセスを使用可能であるため、低コストで高性能なCMOS-MEMS集積システムを実現できることを示した。

第四章ではここまでで提案した要素技術によって実現可能なCMOS-MEMS集積水上走行マイクロロボットについて扱う。泳ぐためのMEMS技術と、それをCMOS基板上に作成可能にするプロセス技術を提案したため、これらの技術を使って水上走行マイクロロボットをどのような形で実現できるかを議論した。従来の水上走行アクチュエータには実現できなかった連続水上走行や方向制御、遠隔制御技術などについて議論を行い、水上走行マイクロロボットの今後の展望を示した。

第五章では本論文で示した成果を総括し、結論を述べた。