ＭＥＭＳプロセス技術の調査研究

坂井　朋之[*1]　宮口　孝司[*3]　佐藤　健[*1]　丸山　英樹[*5]
須貝　裕之[*4]　小林　豊[*1]　岡田　英樹[*2]

SAKAI Tomoyuki[*1], MIYAGUCHI Takashi[*3], SATOU Takeshi[*1] , MARUYAMA Hideki[*5],
SUGAI Hiroyuki[*4], KOBAYASHI Yutaka[*1]and OKADA Hideki[*2]

A Study on MEMS Process and Technology

抄　　録

ＭＥＭＳプロセス技術についての調査研究を行った。本研究では、ＭＥＭＳプロセスやその応用製品に関する研究開発の動向、マーケットの将来予測についての調査をした。また、この技術に関する県内の大学や企業の状況についても調査をした。さらに、ＭＥＭＳの基本的なプロセスの把握を目的として、光通信用導波路とＣＮＴ－ＦＥＤ電子銃の試作を行った。

１．緒　　言

「ＭＥＭＳ」とは Micro Electro Mechanical System の頭文字を並べたもので、文字通り微小電気機械システムのことである。数mm四方の小さなチップの上に、メカニカルに動く部分と、それを制御する電子回路がコンパクトに納められたもので、いくつもの部品や装置を使った大きなシステムと同じ働きをすることができる。その製造方法は、基本的には半導体製造プロセスを基盤としているが、メカニカルな部分があることから、より立体的かつ複雑な形状を含むのが特徴である。このために基板平面上の線幅ルールでは、半導体ＩＣほどの微細化は進んでいないが、より深く掘るというような特殊な技術が含まれている。

ＭＥＭＳの応用例として代表的なものは、光通信用デバイス、各種センサ類あるいはインクジェットヘッドなどがあるが、将来はエネルギーや医療など、幅広い産業への応用が期待されている。

本研究では、このＭＥＭＳプロセス技術に注目し、技術やマーケットの動向、大学や企業の研究状況を調査した。さらに代表的なＭＥＭＳ製品を実際に試作することにより、ＭＥＭＳの基本的なプロセスについての理解を深めた。

２．MEMS の概要と技術動向

２．１　MEMS 製品とプロセス技術

ＭＥＭＳの例として、自動車に使われている「エアバッグシステム」がある。

従来の機械式エアバッグシステムでは、自動車の衝突に連動して移動するオモリ、これを支えるバネ、バネ長さの変化を検出する装置、爆薬に点火する電気信号処理装置などが必要である。ＭＥＭＳによるエアバッグシステムでは、これらのすべてが微細化され、１０mm四方ほどの一つのチップに収められている（図１参照、写真中央部がオモリに相当し、周囲に検出機能が配置されている）。

また、機械式センサでは、オモリやバネ、検出器など個々のユニットを最適に組み上げる熟練した技能が必要であったが、ＭＥＭＳでは１チップ化されるためその必要がなく、高い信頼性が得られる。

*1 研究開発センター
*2 下越技術支援センター
*3 中越技術支援センター
*4 県央技術支援センター
*5 県央技術支援・加茂センター

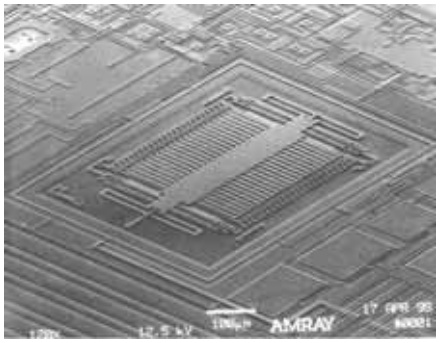


図１　アナログデバイセズ社の加速度センサ

このようなＭＥＭＳ製品の製造技術は、半導体ＩＣ製造プロセスを基盤としている。半導体ＩＣでは、様々な製造技術が使われるが、最も基本的な技術はフォトリソグラフィーである。これは“フォト（写真）”と“リソグラフ（石板画）”を合わせた造語であることからわかるように、写真のネガを印画紙に現像して行くのと似ている。

図２に基本的なフォトリソグラフィーのフローを示す。先ず、シリコンウェハーの表面にレジスト（液状の感光剤、この図はネガ型の例）を塗布する。ガラスマスクを通してＵＶ光を照射すると、遮光部のレジストは硬化しないために、現像液で除去され、マスクのパターンが形成される。更にレジストで被覆されていないシリコン表面を薬液や反応ガスでエッチングした後、レジストを剥離すると、マスクのパターンがシリコンに転写される。

このプロセスを繰返すことで、様々な形状や回路が形成され、デバイスが製造されている。

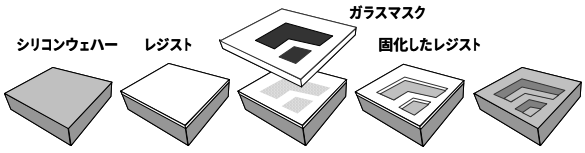


図２　フォトリソグラフィーの基本的なフロー

半導体ＩＣでは、平面上の集積度を上げるために、ライン幅で数１０ｎｍというような議論がなされているが、ＭＥＭＳプロセスでは、まだそれほど微細なパターンは必要とされておらず、ライン幅でサブミクロン程度が現在のレベルである。しかし、メカニカルな機能を持つ三次元構造を形成するために、“深堀り”、“異種部材の接合”、“形成物の保護護”などの半導体ＩＣとは異なった技術も要求されている。以下にその数例を挙げる。

（１）ボッシュ法エッチング

高異方性のディープエッチング技術。側壁をコーティングしながら底をエッチングして行くので、アスペクト比の高い形状をつくることができる（図３参照）。

（２）超臨界乾燥

高アスペクトの構造物が、洗浄後の乾燥時に液体の表面張力で破壊されるのを防止する。洗浄液に表面張力ゼロの超臨界流体を用いることにより、乾燥の際の破壊を防止できる。

超臨界流体としては、二酸化炭素が使われる。図４に、通常乾燥と超臨界乾燥の形状の違いを示した。

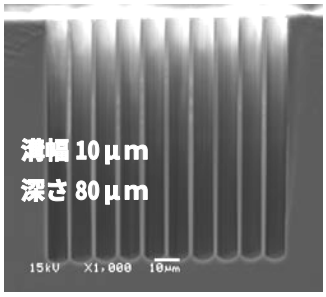


図３　ボッシュ法によるシリコンエッチング

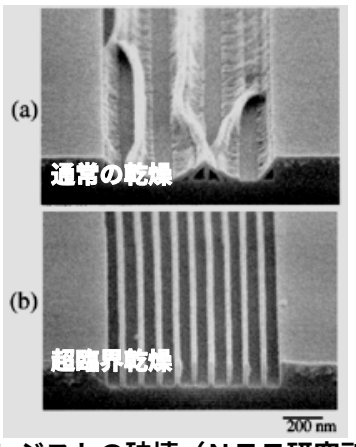


図４　レジストの破壊（ＮＴＴ研究所）

（３）陽極接合

シリコンチップを固定したり、パッケージングをするときに使われる接合法で、シリコンとガラスを接合する。

パイレックスガラスとウェハーの研磨面同士を重ね、４００℃程度に加熱してガラス側に数１００Ｖのマイナス電圧を印加する。電気的引力で接合するのでこのように呼ばれている。

このように，ＭＥＭＳプロセス技術は、半導体ＩＣの製造技術を基盤としながらも、より複雑な形状、機能を必要とするために様々な技術が取り入れられている。

２．２　ＭＥＭＳ市場と研究開発の動向

２．２．１　製品開発の動向

ＭＥＭＳプロセスは、基本的にダウンサイジングおよび高機能化のための製造技術であるので、その応用分野は多岐にわたっている。今現在大きな市場を形成している製品は、インクジェットヘッドや磁気ヘッドなどであるが、今後の発展が期待されるものとして以下の４分野が挙げられている。

（１）センサおよび光ＭＥＭＳ

マイクロセンサ分野の研究開発は、日本が技術的に進んでいると言われており、引き続き諸外国に対し優位を保つことが期待されている。光学分野では特に光ＭＥＭＳと呼ばれており、従来からの光センサ・ディスプレィ用素子の開発に加え、光通信用スイッチが注目されている。

（２）医療・バイオＭＥＭＳ

この分野は、一つ一つの製品としては市場規模が小さく、難しいシリコン加工技術を必要としない場合も多い。このため、大学等公的機関の小さな設備であっても、短期間の少量生産が可能であり、最もベンチャー企業が育ちやすい分野と考えられる。

（３）ＲＦ－ＭＥＭＳ

集積化というキーワードが最も端的に実現され、市場の大きさがあり、また、半導体製造技術の蓄積が最も有効に使えるのが、このＲＦ（通信デバイス用高周波）－ＭＥＭＳの領域である。コンデンサや抵抗などの受動素子もシリコンチップ内に混載することで配線長が短くなり、高周波域でＱ値という高速化のファクター向上が期待できる。さらに共振器などの可動部分や電源部分までをも１チップあるいは１パッケージに組み入れようとするものである。

（４）パワーＭＥＭＳ

マイクロ燃料電池やマイクロガスタービンなど微細なエネルギー供給システムである。マイクロ燃料電池は、現在、携帯機器用に検討されている小型燃料電池をさらにマイクロレベルまで微細化するという位置付けにある。現状の電池より長寿命化が達成できれば、携帯電話でインターネットを常時接続で利用することも可能になるため、市場の期待は大きい。まだハードルの高いターゲットとは言えるが、市場性のみならず社会的インパクトも大きく、最も期待されている分野である。

２．２．２　市場規模

ＭＥＭＳプロセスは応用分野が広いため、様々な製品のダウンサイジングに伴い、市場規模は拡大の傾向にあると考えられる。

図５の経済産業省の技術調査レポートでは、２００５年に約１兆円と予測しており、センサなど明らかにＭＥＭＳ技術に分類される項目に対し、その他の項目の比率も大きく、この技術が広範な応用分野を持つことの特徴と考えられる。通常、市場予測は各調査機関によって差が出てくるが、多くは２００５年で、国内２～３兆円、世界７～８兆円と推計しているようである。

調査した範囲では、どの機関も市場の伸び

を予測している。

また、ＭＥＭＳ製品はナノテクノロジーの市場予測と関連させて議論されることが多い。

それは、この技術がナノテク製品の生産技術として不可欠なものと位置づけられているためである。

表１に、三菱総研と日経新聞社の共同調査などに基づき算出した、ナノテクノロジー市場の予測を示した。これも大きな伸びを予測しているが、この表に挙げられている多くの製品はＭＥＭＳプロセスに関連しており、ＭＥＭＳ製品の市場はやはり大きくなると考えられる。

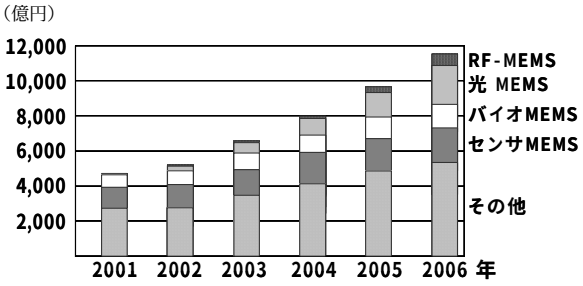


図５　ＭＥＭＳ市場予測

表１　ナノテクノロジー市場予測

産　業	2005年	2010年
バイオセンサ	443	1,193
医療用マイクロマシン	287	1,200
遺伝子診断	359	1,071
遺伝子治療薬	4346	4,510
バイオリアクタ	616	1,387
分子設計タンパク質	153	178
光触媒材料	583	1,826
高選択性･高性能触媒材料	581	680
インテリジェント材料	1026	1,139
フラーレン、ナノチューブ	143	292
マイクロマシン	5020	7,723
ナノメートル水準の検査機器	137	368
超精密加工装置	2025	2,963
半導体製造装置	24450	31,950
薄膜製造装置	1875	1,875
次世代超メモリ	5051	16,309
光メモリ用材料	10313	17,063
高密度記憶用磁気材料	27075	95,813
量子デバイス	282	1,380
分子エレクトロニクス材料	290	2,213
合　計	85055	191,133

（単位：億円）

２．３　大学や企業の状況

ＭＥＭＳ技術の研究については、東北大学ベンチャービジネスラボラトリーや立命館大学マイクロシステム技術研究センターなどが著名で、産官学連携により研究が進められている。“どう作るか”と同時に、“何を作るか”ということも重要視しているようである。他の大学でも産業界との連携が進んでいるが、ＭＥＭＳ技術を直接の研究対象とするよりは、ナノテクノロジーの研究の中で、ＭＥＭＳ技術を取り入れて行くことが多いようである。これは上述の市場予測の場合と似ている。

県内も同様で、新潟大学と長岡技術科学大学でも、直接的にＭＥＭＳ技術を研究している研究室はないが、微細な切削加工、ナノレベル計測、半導体リソグラフィーなどの研究がされている。

これらの大学研究者は、表２に示すように財団法人にいがた産業創造機構が主催する“にいがたナノテク研究会”のリーダーとして活動している。

企業では、圧力センサと磁気ヘッドの製造メーカーである日本精機（株）やアルプス電気（株）など、ＭＥＭＳ技術の有力企業をはじめとして、ナノテクノロジーに興味を持っている企業が多数参加している。

このような活動の中で、ＭＥＭＳプロセス技術は重要な位置を占めると考えられる。

表２　にいがたナノテク研究会に参加している研究者と企業

新潟大学	桝田	教授	微細加工
長岡技術科学大学	八井	教授	半導体プロセス他
	柳	教授	ナノ計測
	明田川	助教授	光学測定
	末松	助教授	ナノ粒子、ナノ薄膜成長
	安井	助教授	カーボンナノチューブ成長制御
	南口	助教授	ナノ材料、金属材料
参加企業	アイエスエンジニアリング / アイオムテクノロジー アクティブ / アドテックエンジニアリング / アルプス電 エルメック電子工業 / クリーン･テクノロジー サンデバイス / シンワ測定 / ツインバード / トッキ 永田精機 / ナミックス / 新潟三洋電子 新潟プレシジョン / 日本精機 / 八海クリエイツ プロデュース / マコーユニオンツール		

また、ＭＥＭＳについてはファウンドリービジネスや製造設備の中古市場が成立しつつあることも興味深い。製品が多品種少量生産の場合が多く、高価な半導体製造設備を整えるにはリスクが伴うからである。このため、受託生産を事業化する企業が現れている。また、線幅ルールでは最先端のＩＣほど微細ではないので中古設備でも対応が可能である。

３　MEMS プロセスによる試作

３．１　試作の目的

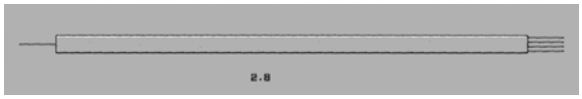
本研究では、技術動向や市場調査に加え、試作実験も課題の一つとした。これは、ＭＥＭＳプロセス技術の理解をより深めることを目的としている。試作ターゲットは、現在研究段階にあるもので、将来の市場性が見込まれていること、かつ、ＭＥＭＳの基本プロセスの把握に適切と考えられることから光通信用導波路とＣＮＴ－ＦＥＤ電子銃とした。

３．２　光通信用導波路

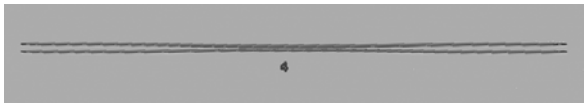
本試作では、光導波路のシミュレーション計算を行い、その結果からフォトマスクを作製した。また、このマスクを用いてシリコン層５μｍのＳＯＩ基板をエッチングし、光分岐結合器の基礎となる光導波路モデルを試作した。尚、光導波路の作製には日本精機株式会社の協力を得た。

図６は試作したＭＭＩカプラ（多モード干渉分岐素子）と方向性結合器である。ＭＭＩカプラは、光の干渉によって１本の光ファイバーを４本に分岐することができる基本的な光素子である。

方向性結合器は、２本の光導波路間の距離と結合距離を変えることによって、２本に等分に分岐したり、もう一方の光導波路に光を移すなど、光の分岐比率を可変でき、光送受信器などレーザーダイオードとフォトダイオードとを同一基板上に配置する場合に必要となる素子である。試作の結果、全体の形状は良く形成されている。



（ａ）ＭＭＩカプラ



（ｂ）方向性結合器

図６　シリコン製光導波路

図７に方向性結合器の最狭部分でのエッチング状況を示す。光導波路の幅とスペースは４μｍの設計である。２つ光導波路は完全に分離できているが、開口部が広がるという等方性エッチングの特徴が現れ、導波路の断面形状が台形となっている。

方向性結合器は、２つの導波路の距離や導波路の形状で特性が大きく変化するので、このエッチング条件では、特性を安定させるのが難しいと考えられる。

図８に試作したＭＭＩカプラモデルを示す。導波路幅の設計値は２．８μｍである。この例ではエッチングがオーバー気味で、光導波路部分の幅が狭く、高さも低くなっており、現実の製品に対して適用する場合には、エッチング条件の検討が必要である。

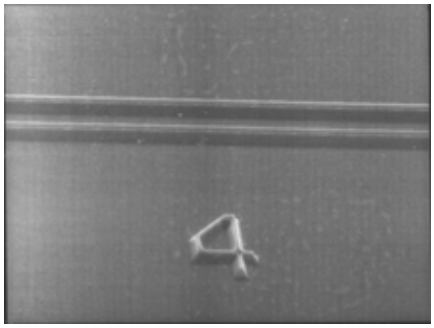


図７　方向性結合器最狭部

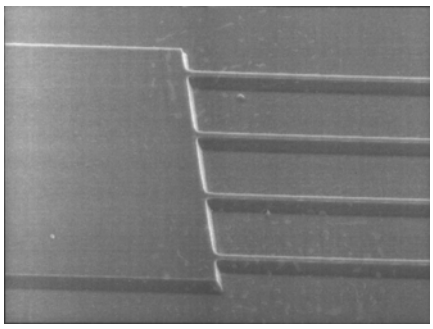


図８　ＭＭＩカプラ分岐部

３．３　ＣＮＴ－ＦＥＤ電子銃

ＦＥＤ（Field Emission Display）は、電子銃から電子を放出させて蛍光体を発光させるディスプレィである。発光原理はＣＲＴと同じだが、ＣＲＴが単一の電子銃を偏向して画像を表示するのに対し、ＦＥＤは小型の電子銃を画素毎に配置することが特徴である。電子を電界放出させるため、電子銃先端は針形状に形成されている。先端がより急峻な方が、低電圧で電子放出が可能となるので、銃の先端にＣＮＴ（Carbon Nano Tube）を配置する研究も行われている。

図９はＣＮＴ－ＦＥＤの一画素の構造断面図である。産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門では、２００２年４月にこのデバイスの試作を発表している。この例をもとに、シリコン基板に高さ５μｍのチップを１０μｍピッチで形成し、その先端にＣＮＴの成長を試みた。

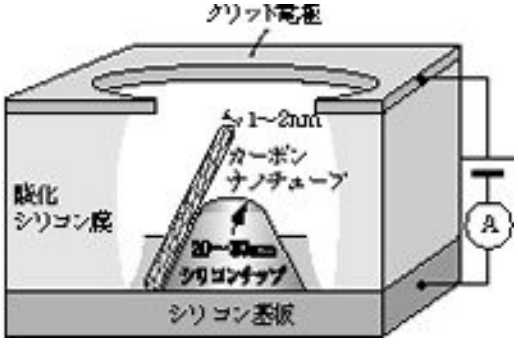


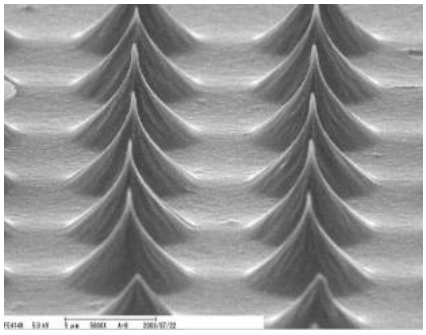
図９　ＣＮＴ－ＦＥＤの構造断面図

実験にあたっては、産総研に製造プロセス全般の指導を頂き、シリコンの加工は外部に委託した。ＣＮＴ成長は、長岡技術科学大学の協力のもと行った。

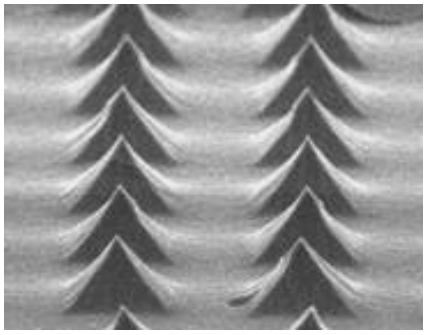
図１０は試作したシリコンチップである。シリコンウェハーにＣｒをスパッタし、ウェットエッチングで円形と正方形のマスクを形成した後、等方性ドライエッチングを行った。図はそれぞれ直径７μｍの円形マスク、一辺６μｍの正方形マスクにより作製した円錐型と四角錐型のシリコンチップであり、ほぼ狙い通りの形状を形成することができた。

この四角錐型チップにＣＮＴ成長触媒のＦｅを１０ｎｍ厚でスパッタリングし、７００℃のアニール処理を行い、エタノールを原料としてＣＮＴの成長を試みた。

図１１は、実験をした試料である。アニールにより触媒の微粒化はできているが、ＣＮＴ成長は確認できなかった。同条件の平面基板では成長を確認できているので、再現性が課題として残った。



（ａ）円錐型チップ



（ｂ）四角錐型チップ

図１０　試作したシリコンチップ

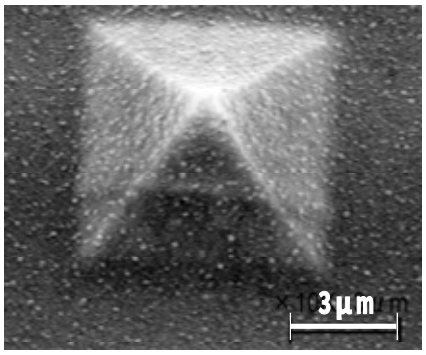


図１１　Ｆｅ触媒の微粒化

４　結　　言

（１）　ＭＥＭＳプロセス技術の調査研究をした。この技術は、半導体ＩＣ製造技術を基盤とし、三次元形状をつくるための様々な技術が含まれている。製品の小型高機能化、ナノテクノロジーの進展に伴い、広範な応用が期待でき、この技術を利用した製品の市場も拡大すると考えられる。

（２）　光導波路の試作においては、ＭＥＭＳの設計及び基礎的なプロセスを行い、概ね目標とする形状が得られた。より完成度の高いものにするためには、異方性エッチングによる垂直側壁の形成、エッチング形状の三次元的な寸法測定、表面粗さの定量的計測などが課題である。

（３）　ＣＮＴ－ＦＥＤの試作においては、目標とするシリコンチップの形状が得られた。ＣＮＴの成長については、触媒の微粒化はできたものの、成長は確認できず、再現性に課題が残った。今後条件の見直しなどが必要である。

５　謝　　辞

本研究の試作実験を行うにあたって、東京工業大学小林教授には、光導波路に関して多大な御指導を頂きました。

また、産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門松本統括研究員（現大阪大学教授）、長岡技術科学大学安井助教授には、ＣＮＴ－ＦＥＤに関してのご指導ご協力を頂きました。

ここに感謝の意を表します。