ＭＥＭＳプロセス技術の開発研究（第１報）

渡邊　健次郎*　坂井　朋之*　長谷川　直樹*　佐藤　健*

Development of MEMS Process Technology

WATANABE Kenjirou*, SAKAI Tomoyuki*, HASEGAWA Naoki* and SATOU Takeshi*

抄　録

MEMS プロセス技術についての研究を行った。この研究は、MEMS プロセスの要素技術、シミュレーション技術や MEMS 製品の試作を目的として、3 か年の予定で行う。本年度は、要素技術である、微細パターン露光技術、エッチングの異方性等方性制御、CNT の成長制御についての検討を行った。また、光導波路についてのシミュレーションも行った。

1. 緒　　言

「MEMS」は Micro Electro Mechanical Systems 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。図 1 に、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」のセンサーを示す。

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等が必要である。MEMS によるエアバッグシステムでは、これらが、10mm 四方ほどの一つのチップに収められている。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。

この製造技術は、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、より深くエッチングするといった特殊な技術が使われている。

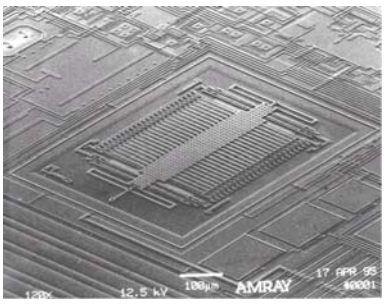


図１　加速度センサー
（出展：アナログデバイセズ社ＨＰ）

MEMS 技術は、光通信用デバイス、各種センサ類やインクジェットヘッドなどの製品はもとより、将来はエネルギーや医療等、幅広い産業への応用が期待されている。

昨年度の先導的戦略研究[1)]において、MEMS プロセス技術の調査研究を行ったが、本研究ではさらに MEMS プロセスの要素技術を詳細に検討し、将来的には、県内企業のニーズに沿った製品試作を行うことを目的とする。

今年度は、微細パターン露光技術、エッチングの異方性・等方性制御技術、CNT の成長実験についての検討を行った。さらに光導波路のシミュレーションも行っており、これについても報告する。

＊ 研究開発センター

2. MEMSプロセスの基盤技術

MEMS プロセス技術は、半導体 IC の製造プロセスを基盤としているが、最も基本的な技術はフォトリソグラフィーである。

フォトリソグラフィーの基本フローを図２に示す。先ず、シリコンウェハー等の被加工物に感光性レジスト（図はネガレジストの例）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部分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基板に転写された形状が得られる。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る。

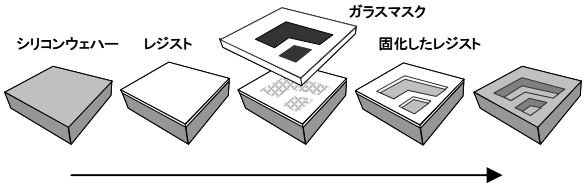


図２　フォトリソグラフィーのフロー

この工程を行うには、スパッタリング装置、スピンコータ、マスクアライナー、エッチング装置等が必要となる。

本年度は、マスクアライナーを導入し、露光実験に使用した。

スパッタリング装置、ドライエッチング装置については、NICO ナノテク研究センターに導入される装置を使用した。これらの導入に当たっては、当所でも装置選定など技術的な協力を行った。

3. 微細パターン露光技術

3.1　検討の概要

マスクアライナー装置（ユニオン光学に製作委託）を導入し、露光技術の検討を行った。

4 インチウェーハ用のコンタクト露光装置であり、UV ランプとレンズ系を g、h、i 線のインテグレータ方式、フォトマスクとウェーハのコンタクトモードを 3 方式（プロキシ、ソフト、ハード）とした。波長フィルターも搭載できる仕様とし、種々の実験パラメータを検討できるようにした。

メーカーの解像保証値はラインアンドスペース（以下、L/S）で 3μm であるが、条件の最適化により 1μm の解像を目標とした。

3.2　実験

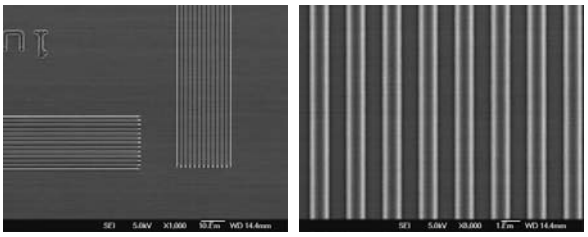
基板には、4 インチのシリコンウェーハ、同ウェーハに 0.32μmの酸化膜を成膜したウェーハを使用した。酸化膜は芝浦メカトロニクス製スパッタリング装置 CFS－4EP－LL を用いて成膜した。

基板にスピンコータで HMDS を塗布し、続いてポジ型フォトレジスト（東京応化製 OFPR800）を厚さ 1μm でスピン塗布、乾燥した後、マスクアライナーで 1、2、3μｍの L/S パターンを照射し、現像した後に顕微鏡で観察した。

3.3　結果と考察

種々の条件を検討した結果、コンタクト方式は窒素吹き上げによるハードコンタクト、露光量 30mJ/cm2 で行ったものが最も良く解像した。

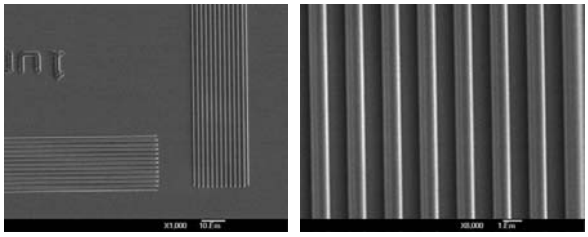
図 3 は、シリコンウェーハに 1μm の L/S パターンを形成した写真である。（1）はパターン全体、（2）は拡大したもので、この条件では、1μm の L/S を解像できているのがわかる。



（１）１μｍパターン　（２）Ｌ／Ｓ部拡大

図３　Ｓｉウェーハ上のＬ／Ｓパターン

また、図 4 には酸化膜付シリコンウェーハを用いたときの現像後の状態を示す。コンタクト方式は、シリコンと同様ハードコンタクトとしたが、露光量は 40mJ/cm2 とした。この基板でも 1μm の L/S を解像できた。



（１）１μｍパターン全体（２）Ｌ／Ｓ部拡大

図４　酸化膜付ウェーハ上のＬ／Ｓパターン

4. エッチングの異方性・等方性制御

4.1　エッチングの方式

シリコンのエッチングにはウェットとドライ方式がある。前者は薬液、後者は反応性ガスによりエッチングをするのでこのような呼び方をする。等方性エッチングの場合、ウェットとドライのどちらも起点から等方的に削られるので側壁が丸まった形状になるのに対し、異方性の場合は方式により異なる。

ウェットの異方性エッチングの場合は、エッチング速度がシリコンの結晶面により異なる性質を利用する方法であり、最終的にはシリコンの特定の結晶面が現れた形状になる。エッチング液には、KOH 水溶液や TMAH などのアルカリ溶液が使用される（等方性では、弗酸、硝酸、酢酸の混合液を使用する）。

ドライの異方性エッチングは、ボッシュプロセスと呼ばれる、シリコンを削るエッチングガス（SF6）と側壁を保護するデポジションガス（C4F8）を交互に切替えることで、高アスペクト比の溝形状が得られる。

それぞれの概略図を図 5、6 に示す。

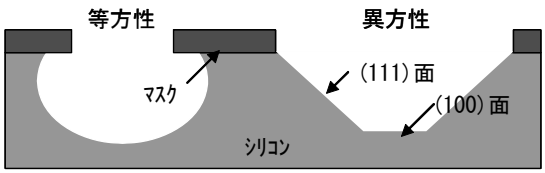


図５　ウェットエッチングの溝形状

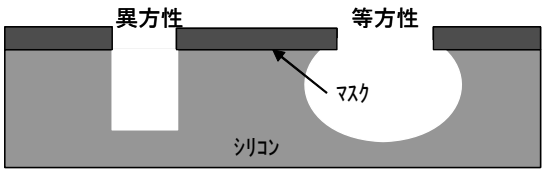


図６　ドライエッチングの溝形状

4.2　ウェットエッチングの検討

4.2.1　実験

（100）シリコンウェーハに酸化膜 0.32μm をスパッタリング装置（芝浦メカトロニクス製 CFS－4EP－LL）で成膜した。

この基板にスピンコータでフォトレジスト（東京応化製 OFPR800）を厚さ 1μm で塗布し、ベーク、露光、現像を行い、レジストマスクを形成した。さらにホットプレートで 165℃10 分のポストベークをした。

3%HF 水溶液に 1 分間浸漬し、レジストに被覆されていない部分の酸化膜を除去し、マスクを形成した。

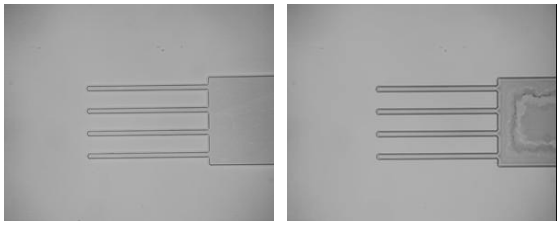
加熱した 50%KOH 水溶液に基板を浸漬し、シリコンのエッチングを行った。

4.2.2　結果と考察

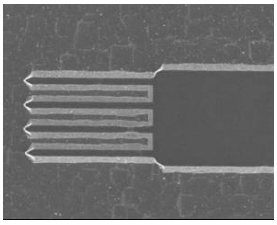
レジスト形成後、酸化膜除去後、エッチング後の状態を図 7（1）～（3）に示す。エッチングは 66℃に加熱した液で 20 分間行った。その結果、シリコンは約 6μm エッチングされていた。

図 7（1）、（2）より、レジストパターンの形成と酸化膜除去は外観上良好であった。

また、（3）より、シリコンをエッチングした後の状態は、斜めに側壁が現れている。これはシリコンの（111）面であり、異方性エッチングの特徴が現れていることがわかる。ただし、直線部分を詳細に観察すると、形状に凹凸があり、エッチング条件の最適化に課題を残した。この原因としては、フォトレジストと酸化膜の密着性が十分でなく、酸化膜マスクに微小な欠陥があること、シリコンウェーハの結晶方向とパターン形状のアライメントが不十分であったことなどが推測される。



（１）レジスト形成後（２）酸化膜除去後



（３）シリコンエッチング後

図７　ウェットエッチングの状態

4.3　ドライエッチングの検討

4.3.1　実験

４インチのシリコンウェーハに前項と同じ条件でレジストを塗布し、1、2、3μmの L/S パターンを形成した。さらにホットプレートで 125℃5 分のポストベークをした。

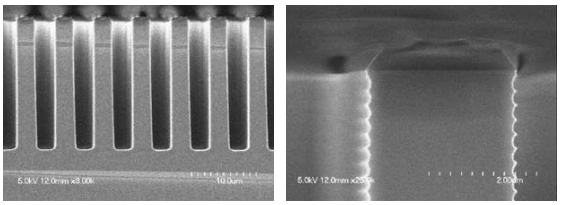
次にドライエッチング装置（住友精密製 MUC－21）を用いて、ボッシュ法によりエッチングを行った。エッチングレート 2.5μm の設定で処理時間を 8 分とした。

4.3.2　結果と考察

3μm L/S パターンでエッチングしたシリコン基板の断面を図 8 に示す。図 8（1）は、全体形状を観察したもので、3μm の幅で 22μm の深さまでエッチングされており、高アスペクト比の溝が形成できている。側壁角度を計測した結果、89.5°であり、表面に対してほぼ垂直にエッチングがなされている。

図 8（2）は、溝の一つを拡大したものである。ボッシュ法では、デポジションとエッチングを交互に繰り返すため、原理上スカロップと呼ばれる凹凸が側壁に形成されてしまうのが、この方式の特徴でもある。スカロップはエッチング条件により変化するが、この条件では 56nm と比較的小さい値となっている。試作するデバイスにより条件の調整が必要である。

また、図示はしないが、1μm と 2μm の L/S パターンでは、レジストマスクがプロセス中に剥離するなどの不具合により、適正な形状が得られなかった。レジストの耐性を高めるなど、プロセス条件や材質の検討が必要である。



（１）エッチング断面　（２）マスク部拡大

図８　ドライエッチングの状態

5. カーボンナノチューブの成長制御の検討

5.1　概要

カーボンナノチューブ（以下、CNT）は、その形状や電気的性質が、今後 MEMS デバイスの中で活用されていくことが予想される。例としてフィールドエミッションディスプレーの電子銃、単電子トランジスタ、AFM プローブの探針などが挙げられる。

このようなデバイスに応用するには、CNT を位置、直径、長さなどを制御して成長させる必要がある。本研究でも CNT の成長技術を MEMS プロセスの要素技術の一つととらえ、その成長制御を検討した。

5.2　実験

成長装置は管状炉（いすず製作所製 EPKRO-14K）とガスコントロールユニット（自作）を組合わせて製作した。加熱部は内径 55mm の石英管とし、ガスはアルゴン、メタン、水素の３系統とした。

シリコン基板と石英基板に触媒となる鉄、コバルト、ニッケルをスパッタリング装置（エリオニクス製 ESC-101）で 10 分間成膜した。膜厚を計測するとそれぞれ約 10nm の厚さで成膜されていた。この基板を管状炉に入れ、次の条件でＣＮＴを成長させた。

アルゴン 1000sccm の気流中で 900℃まで約 80 分で昇温し、900℃に達した時点でアルゴン

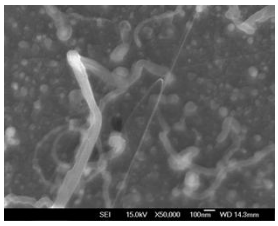
を止め、原料ガスのメタンと水素をそれぞれ900sccm、180sccm を流した。20 分維持した後、再び原料ガスからアルゴンに切り替え、室温まで自然冷却した。

また、ニッケル触媒について、成膜の厚さをパラメータとして成長実験を行った。厚さは、2、5、10nm の 3 水準とし、上と同様にスパッタリングで成膜した。なお、基板はシリコン、成長時間は 15 分とした。

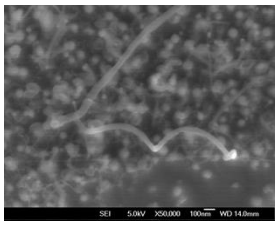
5.3　結果と考察

図 9（1）～（3）にシリコン基板に成長させた結果を示す。すべての触媒で CNT の成長は確認されたが、CNT の直径や成長方向にはバラツキが大きかった。

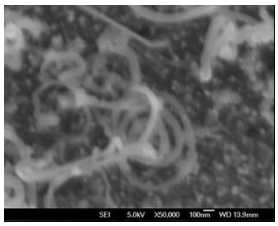
また、図示はしないが石英基板についても各触媒による成長が確認された。



（1）Ｆｅ



（2）Ｎｉ



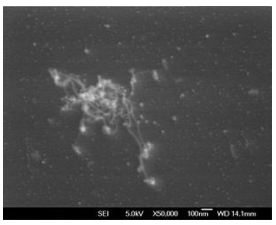
（3）Ｃｏ

図９　シリコン基板上のＣＮＴ成長の状態

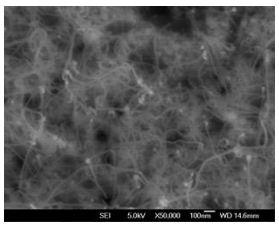
図 10 にニッケルを触媒の厚さを変えて CNT を成長させた結果を示す。

触媒厚 2nm では、成長が局所的で量も少なかった。また、10nm でも同様に成長は少なく、径のばらつきも大きかった。しかし、5nm では、他の条件に比べて、成長密度は高く、径も揃っていた。図からもわかるように、触媒は nm オーダで成膜されているので、実験温度では、融点以下であっても容易に微粒化する。CNT は触媒粒子を起点として成長するので、触媒の微粒化の状態と密接に関連する。

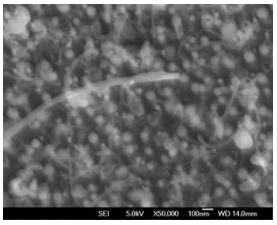
したがって、CNT の成長には、触媒の膜厚が重要なパラメータの一つである。



（1）２ｎｍ



（2）５ｎｍ



（3）１０ｎｍ

図１０　ＣＮＴ成長の状態（ニッケル）

6. 光導波路の設計と試作

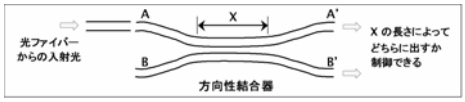
6.1　概要

日本アールソフトデザイングループの設計解析ソフトを使用して、光導波路のシミュレーション計算を行った。光デバイスを試作する上で基本的な素子となる方向性結合器のシミュレーションを行った。

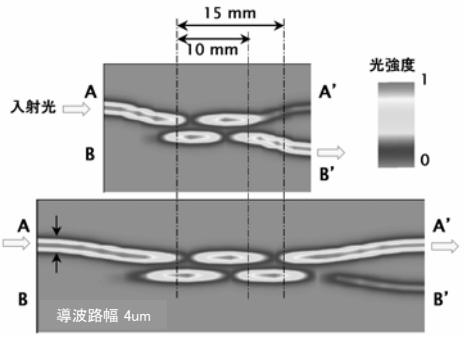
6.2　解析

方向性結合器は、2 本の光導波路間の距離と結合長さ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を同一基板上に配置する場合に必要な素子である。

図 11（1）に模式図、（2）に導波路の近接部の長さを 10mm と 15mm で設計したときの光路を計算した結果を示す。なお、導波路の幅を 4μm、近接部の距離を 3μm として計算した。図より、近接部の長さにより光路が変化する様子がわかる。



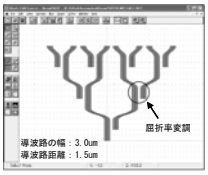
（１）方向性結合器の模式図



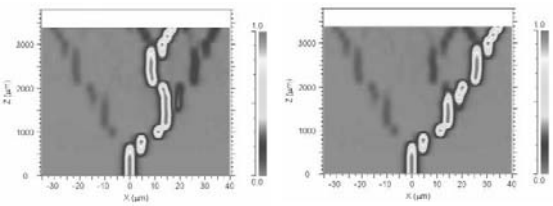
（２）近接長による光伝播の変化

図１１　方向性結合器の解析

図 12 は、方向性結合器を組み合わせた光スイッチである。(1) は設計図で、丸で囲んだ近接部に屈折率変調を加えた場合の光路変化を (2) に示す。出力位置が変化する様子がわかる。このように方向性結合器は、近接部の長さを変化させる方法の他に外部からの作用で導波路の屈折率を変化させることにより、光スイッチとして機能させることができる。



（１）設計図と変調領域



（２）屈折率変調を加えた場合の光路

図１２　方向性結合器を用いた光スィッチ

今年度は、上のように基本的な光素子の解析を開始した状況であるが、今後は AWG（光波長合分波器）など、より複雑な光素子の設計、試作を検討する予定である。

7. 結　　言

（１）　微細パターン露光の検討を行い、フォトマスクと基板のコンタクトモード、露光量の最適化により、シリコンウェーハ、酸化膜付シリコンウェーハで 1μm の L/S を解像した。

（２）　シリコンの異方性エッチングをウェットとドライの方式で行った。ウェットでは、異方性は現れていたが、マスクの形成、結晶軸とのアライメントに課題が残ったが、ドライではボッシュ法により、高アスペクト比の溝形状が得られた。

（３）　CNT の成長実験を行い、鉄、ニッケル、コバルトを触媒として、CNT が成長することを確認した。触媒の厚さが成長に関する重要なパラメータであることがわかった。

（４）　基本的な光素子である方向性結合器の光路解析を行った。今後は AWG などの光素子の設計、試作へ展開を検討する。

８　謝　　辞

本研究の試作実験を行うにあたって、大阪大学松本教授、長岡技術科学大学安井助教授には、CNT の成長実験について、東京工業大学小林教授には、光導波路の設計についての御指導を頂きました。

また、東北大学江刺教授には、MEMS プロセス全般について、多大な御指導を頂きました。

ここに感謝の意を表します。

参考文献

１）坂井他“MEMS プロセス技術の調査研究”，工業技術総合研究所工業技術研究報告書 No.33（2004）, p97-103.