MEMS 製作のためのエッチング加工の動向 (シリコンを例として)

田中 浩^a, 金尾 寛人^b

^a愛知工業大学 工学部(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

^bSPP テクノロジーズ(株)(〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-10)

Trend in Etching of Silicon for MEMS Fabrication

Hiroshi TANAKA^a and Hiroto KANAO^b

^aFaculty of Engineering, Aichi Institute of Technology(1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi 470-0392)

^bSPP Technologies(1-10 Fuso-cho, Amagasaki-shi, Hyogo 660-0891)

Keywords : MEMS, Wet etching, Dry etching, Silicon

1. はじめに

近年においては、多様な材料を活用した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems, 微小電気機械システム) デバイスが開発、製造されている。しかしながら、基板ならびに SOI (Silicon On Insulator) を構成する材料であるシリコンは、依然として MEMS の主要構成材料である。ここでは、シリコンを例として、古くから研究開発が進み、現在もさらに新しい技術開発が行われているエッチング加工技術の動向について述べる。

2. ウエットエッチング加工

2.1 ウエットエッチングの特徴と方法

加工したい部分以外を保護し、液体の化学薬品へ浸漬して、被加工部を溶解させる方法をウエットエッチングという。シリコンの MEMS 製作においても古くは Lee 氏がヒドラジン水溶液について異方性エッチング加工特性を報告¹⁾し、Petersen 氏が書いた“Silicon as a mechanical material”と題した代表的解説では多くのシリコン MEMS 製作においてウエットエッチングが利用されている²⁾。ウエットエッチング

は、図 1 に示すように、薬液の安全面をしっかりとすれば安価な装置で加工を行うことができるという大きなメリットがある反面、エッチング液が浸入できなかつたり、構造体同士が表面張力で付着したりして、より微細な構造体を加工する際には注意が必要である。

通常はエッチング液を加熱し、エッチング速度を高めて使用するのが一般的である。エッチング溶解反応は、図 2 に示すように、大きく分けて 3 つの過程に分けられる。①と③は液中を反応種あるいは反応生成物が拡散する過程(拡散律速)、②は反応種が被加工材料と電子的やり取りにより溶解する過程(反応律速)である。所望のエッチングがどの過程に当てはまるかを調べるためには、エッチング速度の温度依存性を調べればよく、アレニウスの式から求められた反応のための活性化エネルギーの値で判断が可能である。エッチング方式は、上記の律速過程を考慮して選定する必要がある。拡散律速であればエッチング液を均一に攪拌するような方式、反応律速であればエッチング液の温度を均一にする方式である。また、液を加熱する方法として、図 3 に示すように間接加熱、あるいはヒーターを直接液に投入する直接加熱法がある。温度調節を精密に行いたい場合は、試料の入れ方を工夫する必要があるが、直接加熱方式にすることで、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下は十分に達成できると思われる。

長所 ・簡易な設備で加工が可能
(ドラフトと恒温槽で実現可能)
・複数のウエハの一括加工が容易
・加工表面にダメージが入りにくい

短所 ・構造体のアスペクト比が低い
(液が入らない、抜けにくい)
・薄く、細い構造体は、付着、破損する場合がある
(最終工程に、洗浄、乾燥工程が必要)

図 1 ウエットエッチングの特徴

②の反応が速度を決める時 : 反応律速
①, ③の拡散が速度を決める時 : 拡散律速

図 2 エッチング溶解過程の概要図

図3 エッチング液の加熱方式
(a) 間接加熱, (b) 直接加熱

2.2 アルカリ水溶液によるシリコン異方性エッチング

2.2.1 シリコン異方性ウエットエッチングの原理と今後の課題

アルカリ水溶液にシリコンを浸漬するとシリコンの結晶方位によりエッチング速度が大きく異なることを利用でき、シリコンの3次元構造体等を容易に形成することができる。代表的なエッチング液は、水酸化カリウム水溶液(以下 KOH 水溶液)と水酸化テトラメチルアンモニウム水溶液(以下 TMAH 水溶液)である。詳細なエッチング機構については、表面シリコン原子のダングリングボンド数による説明から、全結晶方位の加工特性把握やモンテカルロシミュレーション等により、詳細に機構解析がなされている^{3),4)}。古くからシリコン MEMS の量産工程でも使用されている異方性ウエットエッチングであるが、近年は IC プロセスに適合するエッチング液である TMAH 水溶液が毒物に指定されたり、エッチング条件が高温・高濃度であったりする等、使い勝手の問題が散見される。すなわち MEMS 加工の基本技術として用いられてきたシリコン異方性ウエットエッチング加工技術については進展させる必要性が残っている。特にエッチング液の低濃度化(例えば KOH 水溶液は 5 wt% 以下では劇物ではなくなる)は大きな着目点と考えられる。また、決まりきった結晶方位に限定された角度でしか構造体を製作できないというデメリットもある。以下に述べる近年の研究の進展、高速・平滑化、界面活性剤添加による結晶異方性・平滑性制御、そして、環境にやさしいプロセスの検討は今後のシリコン MEMS 製品の創りやすさにも大きく影響すると考える。

2.2.2 高速・平滑化技術

シリコン MEMS を製作する場合、エッチング加工面は平滑に、かつ速く加工したい。エッチング加工の基本条件は、エッチング温度、液濃度を決定することである。図4は例として KOH 水溶液濃度を変化させた場合の(100)結晶面のエッチング速度と表面粗さを示した。一般的には 80℃で 35 wt% KOH 水溶液などの条件が用いられる。KOH 水溶液の場合 10 wt% KOH 水溶液より高濃度側では反応律速であることが分かっていることから⁵⁾、更に高速で加工したければ、エッチング温度を上げることが速度向上の有効な方法の一つである。エッチング温度 100℃以上とするためには、容器の耐久性や蒸発対策等の検討が必要であるが、例えばエッチ

ング温度を 120℃とすることで、80℃でのエッチング速度の約 5 倍の速度が得られる。また、アルカリ水溶液への還元剤添加効果として 25 wt% KOH 水溶液に、ヒドロキシルアミンを添加することで、エッチング速度が 4 倍以上に向上することが報告されている⁶⁾。

低濃度のアルカリ水溶液では、エッチング加工面が大きく荒れることが知られている⁷⁾。MEMS によく使われる結晶面である(100)面ではマイクロピラミッドという微小な凹凸が発生する。図5(a)は、1 wt% KOH 水溶液を使用し、エアバブルを当てながら加工したエッチング表面の SEM 写真である。エアバブリングを使用した際のエッチング表面には大きな凹凸は確認されず、これはマイクロピラミッドの発生原因の一つである凹凸頂点に存在しなくてはならないマスク効果のある物質が、バブリングにより速やかに除去されているためと考えられている⁸⁾。

2.2.3 界面活性剤添加による平滑化・異方性制御技術

近年、界面活性剤を添加し、積極的に結晶異方性を変えて、従来得られなかった曲面を持つ形状やアンダーカットのない形状のエッチング加工が実現されている^{9),10)}。詳細な機構や方法は文献10)に詳しいが、例えば、25 wt% TMAH 水溶液に 0.1 wt% の非イオン系界面活性剤(Triton-X-100)を添加してエッチングを行うと図6に示すように、円形のマスクパター

(a)

(b)

図4 KOH 水溶液濃度を変化させた場合の Si (100) 結晶面のエッチング加工特性

(a) エッチング速度, (b) エッチング表面粗さ

ンに沿ったそのままの状態に構造体を形成できる⁹⁾。

また、低濃度 KOH 水溶液に界面活性剤を添加した時の状況も報告されている¹¹⁾。図 7 (a) は、5 wt% KOH 水溶液に Triton-X-100 を 1 ppm 添加したときのエッチング表面の SEM 写真である。界面活性剤を添加することで、マイクロピラミッドが消滅し平滑面が得られている。しかしながらエッチング速度は界面活性剤を添加しない場合の約 1/5 まで低下するため、界面活性剤添加については平滑性と速度の両立が今後の課題と考えられる。

2. 2. 4 環境にやさしいエッチングプロセス

化学薬品を利用するプロセスの主たる課題の一つとして、地球環境への影響および安全面を考慮したプロセスに変えていくことが必要である。その鍵となるのは薬液の低濃度化と考えられ、この考えに基づき、低濃度の KOH 水溶液でのエッ

図 5 Si(100)エッチング表面の SEM 写真
(a)エアバブルを加工面に供給有,
(b)供給なし(1 wt% KOH 水溶液, 70 °C)

図 6 Si(100)面ウェハ上円形パターンをエッチングした試料の SEM 写真
(25 wt% TMAH 水溶液, 60 °C, 0.1 wt% Triton-X-100 添加)

チング加工特性を調査した結果がある¹²⁾。図 8 には 1 wt% KOH 水溶液でのエッチング速度の温度依存性を示す。エッチング温度 90 °C まではエッチング速度は増加していくが、さらに高温でエッチングするとエッチング速度は逆に低下する。低濃度エッチング液、特に高温でのエッチングでは、反応種の減少や濃度ムラが出来易く、速度が低下する可能性を示すと考えられる。今後は反応種をエッチング表面に均一に過不足なく供給する手法の検討等が必要と考えられる。

図 7 Si(100)エッチング表面の SEM 写真
(a) 1 ppm Triton-X-100 添加,
(b) 添加なし(5 wt% KOH 水溶液, 80 °C)

図 8 1 wt% KOH 水溶液での Si(100)エッチング速度の温度依存性

3. 異方性ドライエッチング加工

シリコンのドライエッチング技術において用いられるプラズマの励起方法としては、電子サイクロトロン共鳴(ECR)やヘリコン波、そして誘導結合(Inductive Coupling)などの低圧高密度プラズマ生成技術が主に使われている。その中でも誘導結合プラズマ(ICP; Inductively Coupled Plasma)装置は、最も安定した広いプロセスウィンドウを持つ装置の一つに挙げられる。

ここでは、ICP 装置を用いたドライエッチング技術について述べる。また、シリコンウェハをエッチングする場合、10 μm 以上の深さを対象とすることが殆んどであり、シリコン深掘り技術について紹介する。

3. 1 シリコン深掘り技術(Bosch プロセス¹³⁾)

シリコンウェハのドライエッチングにおいては、その取り扱いの容易さ、エッチング速度の速さから、通常四フッ化炭素(CF₄)や六フッ化硫黄(SF₆)のようなフッ素を含むガスが用いられるが、プラズマ内で生成されたフッ素ラジカル(Fラ

図9 Bosch プロセス

ジカル)とシリコンの反応は自発的であるため等方的にエッチングが進み、そのままではマスク通りの加工(異方性加工)が出来ない。その解決策の一つとして、 -100°C 程度の低温でエッチングを行うと、自発的の反応を抑え異方性が向上することが報告されているが¹⁴⁾、そのためには液体窒素による基板冷却が必要で、装置が複雑化し、維持管理費が増大する。

より簡単に異方性加工を実施する方法として、適当なガスを添加してエッチング側面を耐エッチング性の高い材料で覆う方法があるが¹⁵⁾、この方法では被エッチング面にもエッチング阻止層が形成されるためエッチング速度が低下し、深溝加工には大きな問題となる。この様な状況の下、阻止層生成とシリコンエッチングを交互に繰り返すプロセスが、独 Robert Bosch 社により開発され深溝加工が容易になった¹³⁾。Bosch プロセスと呼ばれるこのプロセスは、Laermer 氏と Schilp 氏により発明された特許に基づいており、エッチングステップ処理(SF_6 プラズマ)とパッシベーションステップ処理(オクタフルオロシクロブタン(C_4F_8)プラズマ、デポジションステップ)を交互に行ってシリコンをエッチングする^{15),16)}。このプロセスの概略を図9に示す。パッシベーションステップでは、CF系重合膜がマスクを含めて全面に等方的に堆積される(図9(a))。次にエッチングステップでは、基板にバイアスを印加しておくため、まず、エッチングされるパターンの底部の重合膜はイオンによるエッチングで除去される(図9(b))、イオンの方向性のため、側壁の重合膜は除去されずに残る。その後、エッチングパターン底部の露出したシリコンのみがFラジカルによりエッチングされる(図9(c))。以上のシーケンスが繰り返されて、後述する高アスペクト比や高マスク選択比対応で、マスクアンダーカットなどの問題

の無い異方性エッチングができる。

3. 2 高アスペクト比エッチングプロセス【パラメータランピング】

シリコンウェハを使ったMEMSデバイスに対する加工技術においては、より高アスペクト比(エッチング深さ/エッチング幅)でかつ、高精度な加工が要求されている。

高アスペクト比パターンのエッチングにおける問題点としては、アスペクト比が高くなるにつれ、トレンチやホールの先端において、先細りの形状になるになる場合が多い(図10)。この要因の一つとしては、エッチングパターンの高アスペクト比化が進むと、そのコンダクタンスが低下し、底面へのエッチング種の輸送や、反応生成物の放出が悪くなるためと考えられる。この問題を解消するには、一般的にプロセス圧力を低下させることやバイアス電力を上げることが考えられる。しかし、一方で低圧力にするとラジカルの量が減少するためエッチング速度が低下し、高バイアス電力化では入射イオンのエネルギーが増大するためマスク選択比の低下が起こる。

高アスペクト比エッチングにおいて、エッチング速度やマスク選択比の低下を抑えて良好なエッチング形状を達成するためには、プロセス条件をエッチング時間とともにプロセスパラメータを変更させる方法(パラメータランピング)が有効である^{16),17)}。図11にそのコンセプトを示す。通常のプロセスでは、プロセス中にプロセスパラメータは一定である(図11(a))。パラメータランピングでは時間とともにプロセスパラメータを変化させ、常に最適な条件でエッチングを行う(図11(b))。図12にパラメータランピングの適用例を示す。通常圧力ではトレンチの先端が細くなる(図12(a))。先細り形状は圧力の低圧力化で改善するが、マスク選択比、及び

図10 高アスペクト比パターンでのトレンチ底部先細り形状
($0.8\mu\text{m}$ 幅, $58\mu\text{m}$ 深さ)
(a) 全体図, (b) トレンチ上部拡大, (c) トレンチ底部拡大

図11 パラメータランピング

エッチング速度は大きく低下する(図 12 (b))。通常の圧力条件から低圧力条件のランピングプロセスによりマスク選択比を維持し、エッチング速度を大きく低下させずに形状の改善を達成できた(図 12 (c))。

3. 3 高マスク選択比エッチングプロセス【MPP：マルチフェーズプロセス】

シリコンウェハを貫通させるプロセスにおいては、エッチング深さが 500 μm 以上のシリコン深掘りプロセスの適用が必須であり、マスク選択比の高い Bosch プロセスを適用したとしても、従来のマスク厚では足らず、厚膜レジスト、メタルマスク等に対応することが多い。しかしながらファブ리케이션の変更を伴うため、現有のマスク厚での対応を求められる場合が多い。

また、高アスペクト比エッチングを適用するアプリケーションは、さらなるパターン幅の微細化(=高アスペクト化)が進んでおり、それに伴いマスク厚さも薄くなる方向である。このため、微細パターンでの高アスペクト比エッチングプロセスにおいては、さらなるマスク選択比の向上が必要となっている。

これらの要求に対応するために、従来の Bosch プロセスを見直した新たなプロセス：MPP (マルチフェーズプロセス：米国特許 7306745, 国内特許 4865948)が開発され、さらなるマスク選択比向上が実現できた¹⁸⁾。これは Bosch プロセスにおけるデポジションステップとエッチングステップの切り替えの工夫をすることによって、高アスペクト比エッチングを高マスク選択比で且つストライエーション(側壁の縦筋)の無い加工を可能としたものである。

図 13 に MPP を適用した高マスク選択比プロセスの結果を示す。もともと高いマスク選択比を特長とする Bosch プロセスであるが、MPP の適用により、さらに高いマスク選択比

図 12 パラメータランピング適用例

図 13 RPC 実施例(トレンチ幅: $\phi 100 \mu\text{m}$, エッチング深さ: 200 μm)

が達成可能である。図 14 に MPP を適用した高アスペクト比で、高マスク選択比エッチングの結果を示す。アスペクト比: 66.5 (エッチング深さ: 53.2 μm , エッチング幅: 0.8 μm), 酸化膜マスク選択比: 60 という非常に高い選択比で、トレンチ先端の先細りの無い高アスペクト比エッチングが達成できている。

3. 4 SOI ノッチレスプロセス

シリコンウェハとシリコンウェハの間に酸化膜を挟み込んだ SOI ウェハを用いて、各種の MEMS センサが製造されている。この酸化膜上にあるシリコンの貫通エッチング後、酸化膜を犠牲層としてシリコン構造体をリリースして、MEMS センサが製造される。この場合、センサデバイス特性に影響を及ぼすシリコン加工精度の確保のため、酸化膜界面におけるノッチング形状は避けなければならない最重要項目である。

図 15 にノッチングの発生メカニズムと実例を示す。ノッチングの発生は、エッチングがシリコン層からストッパー層(酸化膜層)に到達した時に、酸化膜界面で正イオンが蓄積(チャージアップ)し、次に入射してくる正イオンが静電偏向によりトレンチ側壁をエッチングするために生じると考えられている^{19)~21)}。

例えば、SPP テクノロジーズ社の SOI アップグレードシステムは、酸化膜界面でのチャージアップを抑えるハードウェアで、試料台に印加するバイアスを工夫することでこのチャージアップ現象を緩和し、トレンチ側壁のノッチングを防いでいる(米国特許 6187685, 国内特許 4163857)²²⁾。高アスペクト比パターンにおいて、トレンチパターンでは底面の酸化膜界面のチャージは抜け難いこともあり、ノッチングは発生し易い。一方、残しパターンではノッチングはエッチン

図 14 高アスペクト比エッチング形状

図 15 ノッチング (a) ノッチング発生メカニズム, (b) ノッチング発生例

グ形状に大きな影響を及ぼす。図 16 には高アスペクト比トレンチ構造の SOI エッチング結果を、図 17 には高アスペクト比柱状パターンの SOI エッチング結果を示す。SOI アップグレードシステムの適用により、双方共ノッチの無い良好な結果が得られている。

3. 5 テーパーエッチングプロセス

図 18、図 19 にテーパーエッチング加工例を示す。主に $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$ プラズマによるノンスイッチングプロセスで、そのプロセス条件の調整によりマスクアンダーカット量、側壁角度の制御を行う。ウェハレベル CSP (Chip-Size-Package) アプリケーション向けの配線埋め込み工程のみならず、 μTAS 用流路作成等の種々のアプリケーションに対応させる上で、テーパー角の角度が制御できること、エッチング側壁面の粗さが少ないことが要求されている。

プロセス条件の適正化により図 18 に示すようなテーパー角度： 60° から 85° までの角度制御が可能である。また、図 19 に示すような平滑なエッチング側壁面も達成している。

3. 6 高レート、高精度エッチングプロセス

Bosch プロセスを用いたシリコン深掘り装置がリリースされた、1995 年以降、新しい MEMS デバイスの開発を目指すユーザーのより高度な要求に応えるために、側壁形状制御や側壁表面粗さ、マスク選択比、SOI 基板の酸化膜界面におけるノッチ防止、さらに大口径ウェハにおける均一性、等々の性能向上を図りながら、エッチング速度を大幅に向上させた(図 20)^{23),24)}。その集大成として、2005 年に Pegasus が市場に投入された^{25),26)}。

最新の技術要求は、2 分化されている。1 つ目はエッチング速度の向上である。2 つ目はエッチング速度の向上ではな

図 16 高アスペクト比トレンチパターン SOI エッチング例
($3\mu\text{m}$ 幅, $100\mu\text{m}$ 深さ)
(a)全体図, (b) SiO_2 界面拡大

図 17 高アスペクト比柱状パターン SOI エッチング例
($10\mu\text{m}$ 径円柱パターン, $100\mu\text{m}$ 深さ)

く、さらなる高精度加工や高均一性加工による収量向上、低スキャロップ・高速エッチングである。後者に対応するために、高均一プラズマ源や高速スイッチングの機能などを開発し、2012 年にデバイス形状の均一性を大幅に向上させた Predeus が完成した²⁷⁾。Predeus によるエッチング形状例で、 200mm ウェハの中心、中心から 97mm (周辺から 3mm) までのトレンチ形状を図 21 に示す。さらに、図 22 に上記トレンチ形状から求めた加工側壁の傾き(チルト量)を示す。 200mm ウェハの周辺 3mm まで均一な加工で、チルト量が $\pm 0.1^\circ$ 以下で、良好な結果である。

3. 7 超高レートエッチングプロセス

エッチング速度の更なる向上は、2015 年頃から MEMS デバイスメーカーより要望され、開発を開始した。その技術要望としては、従来量産装置 Pegasus と比べ、約 2 倍(Super Pegasus と比べ、約 1.5 倍)のエッチング速度であった。高均一プラズマ源や高速スイッチングの機能などを搭載していた Predeus (2012 年 7 月に販売開始)をベースに開発し、2016 年 10 月に超高速シリコン深掘り装置 Proxion が完成した。ハードウェアのみの開発ではデバイスメーカーの要求性能には達しなかったため、ガス供給メーカーと共同開発により、使用

図 18 テーパーエッチングプロセス例(1)

図 19 テーパーエッチングプロセス例(2)

図 20 シリコン深掘り装置の開発経緯

ガスの最適化を加えて、達成することができた。具体的には、温室効果ガスである C_4F_8 (地球温暖化係数：10,300) を使用せず、代替ガス ($HFO1234yf$, 別名 2, 3, 3, 3-テトラフルオロプロペン, 地球温暖化係数：4) を用いている。これにより、温室効果ガス排出量の削減で地球環境保護にも貢献している。また、処理時間が約半分になったことで、 SF_6 (地球温暖化係数：22,800) や消費電力を半減でき、省資源・省エネルギー効果もある。50 μm 幅のトレンチ構造に対し、250 μm エッチングした例を図 23 に示す。エッチング速度は 42.7 μm /分、Super Pegasus の約 1.5 倍 (Pegasus の約 2 倍) である。また、図 24 に量産対応のシリコン深掘り装置のポジショニング (性能比較) を示す。ユーザーのニーズに応じて、最適な装置選択が可能となった。

4. 等方性ドライエッチング加工

4. 1 シリコン犠牲層ドライエッチング技術

MEMS 製造プロセスにおける犠牲層のエッチング工程では、二フッ化キセノン (XeF_2 , シリコン犠牲層を対象) や無水フッ化水素 (HF , シリコン酸化膜犠牲層を対象) での等方性ドライエッチング、アルカリ水溶液での等方性ウエットエッチングなどがある。従来、犠牲層の除去にはウエットエッチングが用いられていたが、ウエットエッチングでは薬液の乾燥時に表面張力により、構造物が基板に張り付く問題が生じていた。シリコンを犠牲層とする構造に対し、 XeF_2 ガスを用いた等方性ドライエッチングにより、構造物の張り付きの問題を解決している²⁸⁾。

XeF_2 の特性は、室温で約 4Torr の昇華圧のある白色固体であり、様々な材料に対して高い選択性を示す。また、Si と XeF_2 の基本的な化学反応は、

図 22 Predeus によるエッチング特性
(200 mm ウェハ, 周辺 3 mm カット)

図 21 Predeus によるエッチング形状

である。そして、Si と XeF_2 の反応過程は、まず XeF_2 ガスがシリコン表面に吸着する。次に吸着した XeF_2 の一部が解離しフッ素原子となり、シリコンと結合して SiF_4 ガスと Xe ガスになり、シリコン表面から脱離する。

XeF_2 ガスは、水蒸気と反応して危険性のある HF を形成するが、換気装置と標準的な酸処理を行うことで、 XeF_2 結晶は安全に取り扱うことが可能である。またエッチング装置からの反応 XeF_2 ガスが HF を生成するので、真空ポンプからの排気は酸スクラバ装置あるいはフッ素系排ガス処理装置に

(a) Super Pegasus によるエッチング例

(エッチング速度：27.5 μm /分)

(b) Proxion によるエッチング例

(エッチング速度：42.7 μm /分)

図 23 Proxion によるエッチング形状
(トレンチ幅：50 μm , 加工深さ：250 μm)

図 24 量産対応のシリコン深掘り装置のポジショニング(性能比較)

接続する必要がある。

プロセス性能として、エッチング速度は開口面積などで異なるが、150 mm ウェハ全面エッチングで 0.2 $\mu\text{m}/\text{分}$ 、100 mm ウェハ開口率 10% で 1 $\mu\text{m}/\text{分}$ というデータが得られている。選択比に関しては、 XeF_2 ガスドライエッチングの場合、様々な材料に対して高い選択性を有し、例えば、 SiO_2 、フォトレジスト、Al、Cr、TiN などの材料に対して 1 : 1000 以上の選択比が報告されている。

図 25 は、Bosch プロセス後に XeF_2 エッチングされた事例を示す。このプロセスでは、Bosch プロセス時に発生したポリマーが保護膜として働き、シリコンの等方性エッチングにより容易に 3 次元のリリース構造の作製が可能である。また、上部の開口部を塞ぐことにより、チューブ構造も製作可能である。 XeF_2 ガスドライエッチングは、シリコン犠牲層エッチングだけでなく、構造体製作などにも適用されている。

5. おわりに

MEMS 製作技術においてシリコンエッチングは依然として主役を保っており、これについて最近の技術動向を述べた。今後は多様な材料のエッチングも必要不可欠であるが、これら加工技術を考える上でのベースともなると考える。紙面の関係上多くを網羅できない部分は、参考文献を参照し、詳細を把握して頂きたい。最後に、本解説を執筆するにあたり、アドバイスを頂きました愛知工業大学 佐藤一雄 教授に感謝いたします。

(Received May 18, 2017)

文 献

- 1) D. B. Lee ; *Journal of Applied Physics*, **40**, 4569, (1969).
- 2) K. E. Petersen ; *Proc. of IEEE*, **70**, 420, (1982).
- 3) 佐藤一雄 ; 表面技術, **51**, 756, (2000).
- 4) M.A. Gosálvez, K. Sato, A.S. Foster, R.M. Nieminen, H. Tanaka ; *Journal of micromechanics and Microengineering*, **17**, (4), S1, (2007).
- 5) H. Tanaka, S. Yamashita, Y. Abe, M. Shikida, K. Sato ; *Sensors and Actuators A*, **114**, 526 (2004).
- 6) 外赤隆二 ; 表面技術, **59**, 104 (2008).

図 25 Bosch プロセスと XeF_2 によるエッチング例
(Carnegie Mellon 大学 / Kaigham J. Gabriel 氏提供)

- 7) 式田光宏 ; 表面技術, **51**, 773 (2000).
- 8) Y. Saito, H. Tanaka ; *Proc. 8th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro/Nano Technologies (APCOT 2016)*, 5a-3, (2016).
- 9) H. Tanaka, H. Hida, K. Sato ; *Microsystem Technologies*, **19**, 1065, (2013).
- 10) P. Pal, K. Sato ; *Silicon Wet Bulk Micromachining for MEMS*, p.79 (Pan Stanford, 2017).
- 11) H. Tanaka, M. Takeda, K. Sato ; *Microsystem Technologies*, 20 March 2017 on line, (2017), DOI: 10.1007/s00542-017-3368-y.
- 12) 齋藤祐樹, 田中 浩 ; 日本機械学会第7回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 29pm3-PN-23 (2015).
- 13) F. Laermer, A. Schilp ; German Patent DE4241045 (1992).
- 14) E.H. Klaassen, K. Petersen, J.M. Noworolski, J. Logan, N.I. Maluf, J. Brown, C. Storment, W. McCulley, G.T.A. Kovacs ; *Proc. Transducers '95*, p.556 (1995).
- 15) J.K. Bhardwaj, H. Ashraf ; *Proc. SPIE Micromachining and Microfabrication Process Technology*, 2639, p.224 (1995).
- 16) J. Bhardwaj, H. Ashraf, A. McQuarrie ; *Proceedings of Microstructures and Microfabricated Systems at the Annual Meeting of the Electrochemical Society, Montreal, Quebec, Canada. May 4-9 (1997)*.
- 17) J.K. Bhardwaj, J. Hopkins, H. Ashraf, A.M. Hynes, B. Khamsehpour, M. Ryan, D. Haynes ; US Patent 6051503 (1997)., Japan Patent 3540129 (1997).
- 18) J.K. Bhardwaj, L.M. Lea, E. Guibarra ; US Patent 7306745 (2000)., Japan Patent 4865948 (2000).
- 19) T. Nozawa, T. Kinoshita, T. Nishizuka, A. Narai, T. Inoue, A. Nakaue ; *JJAP*, **34**, 2107 (1995).
- 20) N. Fujiwara, T. Maruyama, M. Yoneda ; *JJAP*, **34**, 2095 (1995).
- 21) A.A. Ayon, C.C. Lin, R.A. Braff, M.A. Schmidt ; *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, South Carolina*, 41 (1998).
- 22) J.K. Bhardwaj, J. Hopkins, H. Ashraf, A.M. Hynes, I. Johnston, L.M. Lea ; US Patent 6187685 (1999)., Japan Patent 4163857 (1999).
- 23) 神永 晋 ; 東北大学集中講義 : ナノ・マイクロ・システム技術の産業化に向けて (2004).
- 24) S. Kaminaga ; MEMS Engineer Forum 2010, PL-2 (2010).
- 25) 田中雅彦 ; セミコン・ジャパン2005 第9回マイクロシステム / MEMSセミナー, p.153 (2005).
- 26) 神永 晋 ; 日経マイクロデバイス, 2005年12月号, p.106 (2005).
- 27) 金尾寛人 ; *Electronic Journal*, 2012年7月号, p.78 (2012).
- 28) 野沢善幸, 金尾寛人 ; セミコン・ジャパン2003, 第7回マイクロシステム / MEMSセミナー, p.143 (2003).