

特集

半導体センサプロセス技術動向*

Technology Trends of the Fabrication Process of Semiconductor Sensors

磯部 良彦

Yoshihiko ISOBE

The fabrication technology of semiconductor sensors has evolved by adding very unique sensor fabrication technology to the conventional Si wafer fabrication technologies which are represented by LSI and established a distinctive technical field called MEMS (Micro Electro Mechanical Systems.) Pressure sensors were launched to market as the first product of MEMS, and drove MEMS technology in its early stages at DENSO. This paper describes the approach to the improvement of process accuracy of the Si wafer process with a focus on the pressure sensor fabrication process and the future prospects of the semiconductor sensor fabrication technologies in addition to WLP (Wafer Level Package) technology, which is able to respond to the requirements for high accuracy, down-sizing, and low cost of sensors, including the bonding and electrode-forming processes.

Key words : MEMS, WLP, Si Etching, Bosch Process, Piezo effect, Pressure Sensor, Acceleration Sensor

1. 黎明期の加工技術と進化

半導体式センサは、LSIに用いられる半導体加工技術を活用することによりデバイスサイズの小型化と高精度リニア出力化を両立させ、近年、幅広い分野で活用されている。最も早い時期に車両に搭載された半導体式センサである圧力センサは、1980年代のエンジン制御用吸気圧センサから始まり、サスペンションの油圧や、エアコンの冷媒圧へと幅広い分野へ応用が広がっている。これらに適用された加工技術は、その後、慣性センサ等各種センサ加工に活用されている。なお、

Table 1 Properties of Solid State Si

	Si	Fe
Density(g cm ⁻³)	2.33	7.86
Young's modulus(GPa)	190(111)	210
Melt point(°C)	1412	1534
Specific heat(J g ⁻¹ K ⁻¹)	0.76	0.64
Thermal expansion coefficient(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	2.6	11.8
Heat conduction(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	168	48

半導体技術を活用したウエハプロセスによる半導体センサは、材料としての安定性、半導体加工技術の適用が可能なことから一般的にSiが用いられることが多い。材料として用いられたSiは、Table 1に示すように鉄に匹敵する物理特性を持っていることが知られている¹⁾。

(1) 圧力センサ用加工技術

- ・ 圧力センサのプロセスフロー

圧力センサの検出方式として一般的なピエゾ抵抗式圧力センサのプロセスフローをFig. 1に示す。加工は、LSIプロセスの不純物拡散工程を適用しピエゾ抵抗素子を形成する表面加工工程と独自工程であるダイアフラムを形成する裏面加工工程に分かれる。ピエゾ抵抗の特性から一般的には、不純物としてはBをSiは(100)又は(110)面方位のものを使用することが多い²⁾。最初にSi表面を酸化し、その後の不純物拡散のマスクとなる酸化膜を形成する。その後、ホトリソグラフィ技術を使い、ピエゾ抵抗形成エリアのみのレジストを開口し、酸化膜を除去

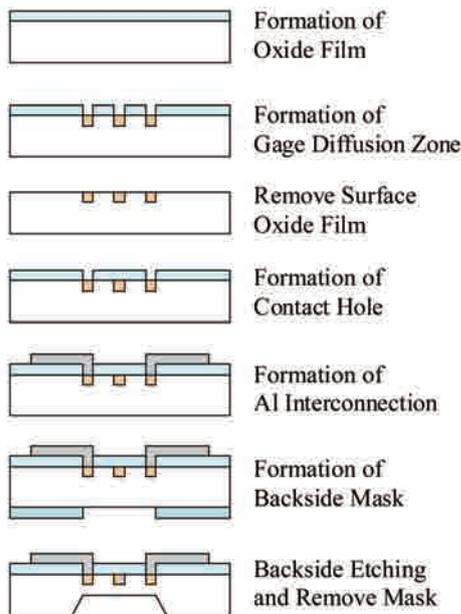


Fig. 1 Process Flow of Pressure Sensors

*2012年9月14日 原稿受理

Table 2 Si Etchant and Characteristic Features

Etchant	Crystal Anisotropy	Mask Material
HF+HNO ₃	isotropy	Si ₃ N ₄ , Au, SiO ₂
KOH	anisotropy	SiO ₂ , Si ₃ N ₄
Hydrazine	anisotropy	SiO ₂ , Al

する。その後、熱拡散又はイオン注入により所望の場所に不純物を注入する。次に拡散炉を用い1000℃以上の高温で不純物を活性化させた後、Si表面の酸化膜を前面除去し絶縁用の酸化膜を新たに形成する。さらに、ゲージ拡散抵抗とのコンタクト部にホトリソグラフィ技術を用いて選択的に酸化膜を除去しコンタクトホールを形成する。続いてAl電極を形成することによりゲージ拡散抵抗を外部と電氣的に接続できるようにする。ここまでが表面加工工程である。この後、裏面にP-SiN膜を形成、両面アライナを用い表面の形成されたピエゾ抵抗位置に合わせてダイアフラム用開口部のP-SiNをエッチングする。P-SiNマスクでKOHによりSiの異方性エッチングを行い所望の厚さのダイアフラムを形成する。

・ KOH異方性エッチング

Siのエッチングには、等方性エッチングと異方性エッチングがあるがほとんどの場合、異方性エッチングが利用される。代表的なエッチャントとエッチング特性をTable 2に示す。ここでの異方性エッチングとは、結晶面によるエッチレートの違いを利用したものであり、通常のLSIプロセスで用いられる垂直エッチングのことを示すものではない。従って、結晶面方位によって異方性エッチングの形状は異なることになる。シリコン単結晶の場合、3種類の結晶面(100)、(110)、(111)が重要になる。CMOSプロセスでは、界面準位の低さから(100)面が、

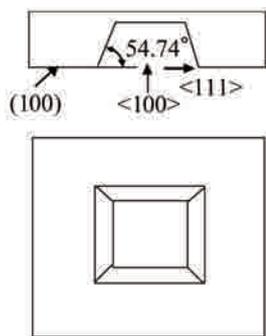


Fig. 2 Si Anisotropic Etching

バイポーラプロセスでは、伝統的に(111)面が用いられMEMSプロセスでは、(100)面、または(110)面が使われることが多い。KOHに代表されるSi異方性エッチでは、(100)面と(111)面のエッチング速度比が非常に大きくなり、(100)面を加工した場合にはFig. 2に示すような角度を持った形状になる。異方性エッチングの問題点は、以下の3点である。

- ・ 等方性エッチングに比べてエッチング速度が遅い(～数μm/分)
- ・ エッチング速度の温度依存性が大きい
- ・ 通常100℃以上に加熱するため、レジストマスクが使えない

上記問題を解決する1つの手法として、近年、Siドライエッチ技術が注目されている。Siドライエッチ技術は、LSI製造技術から発展したものであるが、エッチング形状制御を行いながら深いエッチング(～数百μm)に適用できるまでエッチングレートを上げる技術開発が精力的に行われている。

(2) 加工技術の高精度化

- ・ 電気化学エッチング(加工膜厚制御)

微小な圧力変化を検出するための極薄ダイアフラム形成では、ウエハ裏面からのエッチング量管理では、出来上りのダイアフラム膜厚分布が大きくなる問題があった。このような場合には、エッチングを所望の膜厚で止める技術が用いられる。代表的な方法として①不純物濃度差を利用する方法、②電気化学エッチングの二つがある。①は、ウェット異方性エッチングにおいて、不純濃度が高いとエッチング速度が速くなる傾向を示すことを利用するものであり不純物濃度差を設けることで高精度エッチングが可能である。しかし、この場合、エッチング速度比を大きくとることができないため高精度化には限界があった。②の電気化学エッチングは、Fig. 3の模式図に示すようにSiのPN接合を利用するものである。PN接合に逆バイアス電圧を印加し、接合部に

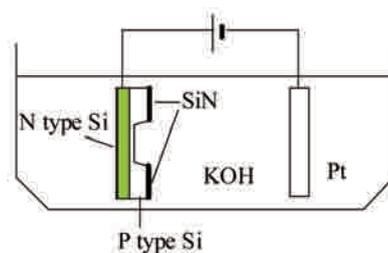


Fig. 3 Schematic of Electrochemical Etching

空乏層を形成，陽極酸化が起こることによりエッチングの化学反応を抑制するものであり，空乏層エリアで確実にエッチングを停止することができる。

・ Si深掘り技術（加工寸法制御）

数百マイクロサイズのダイアフラムを形成するために圧力センサで採用されたSi加工技術は，その加工サイズから高精度な加工寸法を求められることは無かった。ところが，1990年代に開発された加速度センサは，Siで形成された微細な櫛歯電極間の容量変化を検出する方式であり横方向の加工寸法の高精度化が要求されるようになった。しかし，当時のLSIで用いられていたSiドライエッチ技術は，高密度プラズマを使い，サンプルを低温に冷やす方法が用いられていたが，数マイクロの深さのエッチングであり，加速度センサで要求される10マイクロ以上の深さをエッチングする方法は無く，メタルベースでコストが高いX線を用いたLIGA (Lithographie Gaivanoformung Abformung) プロセスが使われていた。1992年にエッチングとエッチング側面の保護を繰り返して行うSi深掘り技術がドイツのロバートボッシュ社によって開発された。ボッシュ法では，エッチング切り替え時の段差が残る課題があるが，アスペクト比（エッチング深さ/エッチング幅）の高いエッチングが可能となった。研究

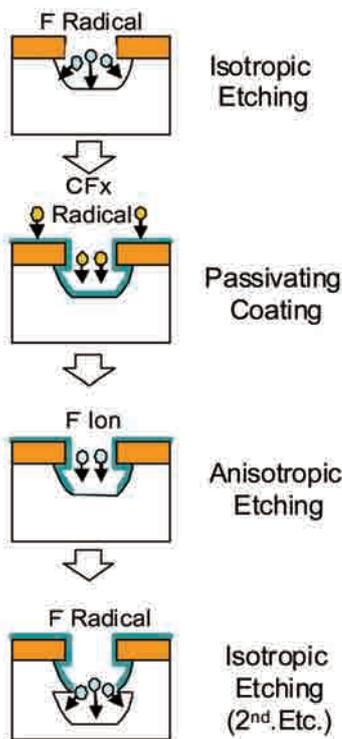


Fig. 4 Principle of the Bosch Process

段階や特定のパターンに最適化した場合はアスペクト比を100程度にすることもできる。Fig. 4に示すようにプロセスは以下の2つの処理を繰り返す。場合によってはさらにステップが増えることもある。

- ・ エッチングステップ：主にSF₆を用いて等方エッチングを行う。底面の保護膜を除去する働きもある。
- ・ 保護ステップ：テフロン系のガス（C₄F₈など）を用いて側壁を保護する。側壁を保護することで横方向のエッチングを抑制する。

保護膜により横方向のエッチングが抑制されるため高アスペクト比（細く深い）穴を掘ることができ。側壁の角度はほぼ垂直にすることができる特徴があるが，スキヤロッピングと呼ばれるエッチング切り替え時にできる側壁の微細な段差が問題になることがある。近年，反応ガスの高速切り替えによりスキヤロッピングを抑えてより高精度な加工を実現する装置も開発されている。

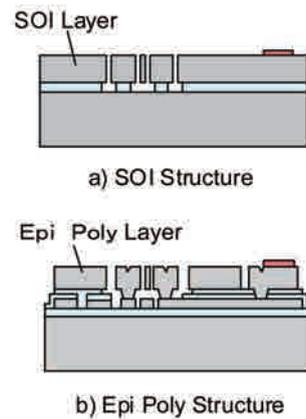


Fig. 5 Comparison of Moving Structures

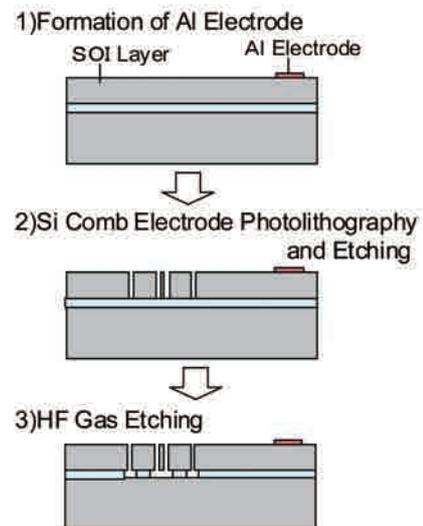


Fig. 6 Process Flow of SOI Structures

2. Si可動体形成プロセス

慣性センサの分野では、Si歯の可動体をチップ内に造りこむ必要がある。これを実現する技術は、絶縁分離ICで使われているSOI基板を用いる方法とSi Epiプロセスを用いるEpi Polyプロセスの二つに大別される。代表的な構造をFig. 5に示す。DNでは、可動体となるSi層をウエハ貼り合わせにより形成することから物性的に安定した単結晶Siを可動体として使うことができるSOI基板を用いたプロセスを採用している。Fig. 6にプロセスフローを示す。SOI方式は、ウエハ工程内で可動体層を形成できないため複雑な構造を実現するのは不得意である。一方、Epi Polyプロセスは、ウエハ加工工程内で可動体となるEpi Poly層を形成するため、下部電極形成後に可動体層を形成することが可能であり、上下電極のような複雑な構造体形成に適している。ただし、Epi層堆積レートが数十nm/minであるため厚膜化が困難であること、低温で成長させたSi Epi層の信頼性等の課題がある。

今後の慣性センサでは、高感度、低コストの要求が強まると予想される。高感度化の最も簡単な手法は、可動体Si層の厚膜化であり、複雑な構造が無く高感度化が実現できるSOI方式が有利と考えられる。また、慣性センサの多軸化においては、上下電極が簡単に形

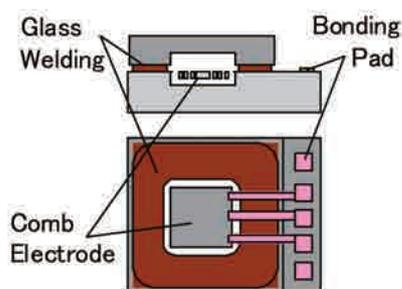


Fig. 7 Si Cap Structure Using Low Melting Glass

成できるEpi Polyプロセスが有利であったが、後述す

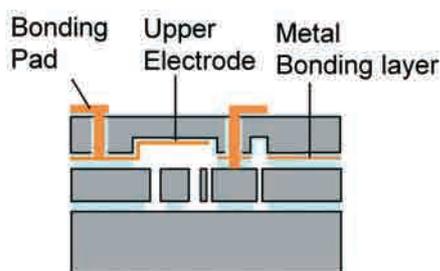


Fig. 8 Si Cap Structure Using Metal Bonding Technology

るWLP (Wafer Level Package) プロセス技術の登場により、Siキャップ部分に上下電極が形成可能となりEpi polyプロセスの優位性が小さくなってきている。

3. WLP(Wafer Level Package)技術

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を使ったセンサでは、可動体がチップ内に形成されておりこれを外界から保護する目的でチップ上にキャップ層を形成することが多い。キャップ層の材質は、Siチップとの相性 (熱膨張係数等)、モールド樹脂からの応力に耐える強度の点から単結晶Siが用いられる場合が多い。現在、Siキャップの接合には、Fig. 7に示すような低融点ガラスを用いたガラス溶着法が主流であるが、ガラス塗布工程の追加、大きな接合代 (~500 μ m) が必要となる課題があった。近年、ウエハレベルでの接合技術の研究が盛んに行われており、Si表面活性化による直接接合やFig. 8に示すような金属共晶を使った接合等が報告されている。金属間接合は、既に民生製品への展開が始まっており、接合代が数十 μ mレベルのものまで報告されておりこれらを用いた接合の展開が期待されている。

4. これからの半導体センサ加工技術

将来に向けた構造、加工技術の課題を以下のように捉えている。

①微細加工：ナノレベル加工の実現によるより多機能を1チップに集積

現在の電極の加工寸法は、ミクロンレベルであるが、無線・給電機能まで含めたチップの実現、飛躍的な高感度化による新規分野への対応のためには、ナノレベルの微細加工が必要になる。先行するLSIの加工技術にセンサ特有の深さ方向の精度を加えることがポイントになる。一部研究機関では、研究が進んでおり、デバイス構造設計も含めた実用化が期待されている。

②微細接合：WLP技術によるウエハ間接合のナノレベル接合代の実現

金属間接合採用により飛躍的な接合代の縮小が可能となるが、ナノレベルで加工されたデバイスでは、デバイス内部からの電極取り出し部等、従来のミクロンレベルの接合ではなく、ナノレベルでの接合技術が要求される。

③材料技術：Si同等の材料特性を持つ材料での構造構築

センサデバイスの中に異種材料を使用すると熱膨張係数の違いにより温度特性を劣化させる。すべてを同じ材料で構成するのが理想である。現在、金属等の大きく特性が異なる材料では、センシング部への距離を離して対応しているが、微細化が進むと同様の手法を採用することは困難になる。

半導体センサ用の加工技術は、先行しているLSIの加工技術をうまく取り入れながら、独自の加工技術をプラスすることで進化してきた。今後は、外部から技術を取り入れながら、ナノ構造体の実現のための材料物性制御、新規材料の開発等、センサ独自の技術開発の比重が増えると予想される。多岐にわたるセンサ構造（圧力、慣性、磁気、光、湿度）を見据えながら加工技術の共通性を確立していくことがキーになると考えている。

＜参考文献＞

- 1) 鈴木康利 “車載半導体センサ技術の動向” デンソーテクニカルレビュー Vol.9 No.2 2004
- 2) YOZO KANDA IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. ED-29, No.1, JANUARY 1982



＜著者＞



磯部 良彦
 (いそべ よしひこ)
 半導体プロセス開発部
 半導体センサデバイス・
 プロセス開発