

マイクロマシニング技術とマイクロセンサ



技術解説

原田 謹爾*

Micromachining Technology and Micro Sensors

Key Words : Micromachining, Micro Sensor, Sensor, Resonant Sensor

1. はじめに

最近、マイクロマシニング、マイクロセンサ、マイクロマシン、マイクロロボットといった言葉を耳にする機会が多い。マイクロマシニング技術はフォトリソグラフィ、薄膜形成、不純物の拡散・注入等の半導体製造技術に、異方性エッチング、犠牲層エッチング、直接接合等の三次元加工技術を組み合わせた技術である。マイクロマシニング技術のセンサやアクチュエータへの利用は、近年研究段階から抜け出し、実用化面でも広がりを見せ始めた。本稿ではまずマイクロマシニング技術の概要を解説し、次にそれを利用したセンサについて筆者らの開発事例を中心に紹介する。

2. マイクロマシニング技術

IC, LSI等の半導体電子デバイスの製造工程で使用される微細加工技術は、以前からセンサの製作に利用されてきている。Si(シリコン)のピエゾ抵抗効果を利用した圧力センサがその代表例で、10年以上も前からプロセス工業、自動車、家電等の分野で使用されてきた。しかし、マイクロマシニングという言葉が注目を浴びるようになったのは比較的最近のことで、1987年に日本で開催された固体センサ国際会

議(Transducers'87)あたりからである。この会議では、MITやBell研究所のグループからSiを使用したマイクロモータやマイクロアクチュエータの試作例が報告されて、大きな反響をよんだ。

センサの製作に利用されるマイクロマシニング技術は、半導体電子デバイスの製造に使われているフォトファブ리케이션技術と同様な技術である。しかし、電子デバイスではSi基板を深さ方向で数 μm 程度しか使用しないのに対し、センサでは深さ100 μm 以上の構造物を三次元的に作ることもあり、その加工方法が重要な技術になる。

材料には、ガラス、水晶、GaAs、ニオブ酸

表1 マイクロマシニング技術

加工方法	内 容		特徴, 用途等
エッチング (除去加工)	ウエット エッチング	異方性	KOHを利用した結晶軸異方性エッチング等
		等方性	HF/HNO ₃ 等のエッチング液を使用
	ドライ エッチング	異方性	RIE(反応性イオンエッチング)が代表的
		等方性	プラズマエッチング等
成 膜 (付着加工)	CVD (化学気相堆積)		多結晶膜(SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , poly-Si)の形成
	エピタキシャル成長		Si単結晶膜の形成
	蒸 着		金属膜等の形成
	スパッタ		金属膜等の形成
	熱酸化		Si表面の改質(SiO ₂)
	拡散, イオン打ち込み		半導体不純物質の形成
接 合	拡散接合		高温で加圧
	直接接合		高温で平滑な表面の張り合わせ
	陽極接合		比較的低温で電圧を印加



*Kinji HARADA
1937年9月21日生
1960年大阪大学精密工学科卒業
現在、横河電機(株)、センサ開発センター、センサ開発センター長
TEL 0422-52-5699

リチウム (LiNbO₃) 等も使用されるが、中核をなすのはSiである。表1にマイクロマシニング技術の概要を示す。この中でセンサを製作する上で特に重要な技術について、以下に簡単に説明する。

2.1 エッチング技術

希望する微細な形状を作るためにエッチングが利用される。基板のエッチング手法は大きくドライエッチングとウェットエッチングとに分けられる。さらにそれらには等方性エッチングと異方性エッチングがある。いずれも金属薄膜、酸化膜、レジスト等をマスクにして、ドライエッチングではプラズマ、イオン、ガス等を、ウェットエッチングでは化学エッチング液を用いてエッチングが行われる。Siのエッチングによく用いられる方法とそれぞれの特徴を表2-1および表2-2に示す。これらのエッチング手法と、マイクロマシニングとの重要な関わりについて以下に述べる。

(1) 異方性エッチング

異方性エッチングとは、結晶面や基板の方向によってエッチング速度が異なるエッチングのことであり、等方性エッチングに比較してアスペクト比 (穴の深さ÷口径) が大きい加工を行うことができる。特にウェットエッチングでは、結晶方位とエッチング法 (液) を適当に選ぶことにより様々な形状の加工が可能になるので、広く利用される。

表2-1 シリコンのドライエッチング

エッチング法	異方性	特徴	マスク材料
RIE	あり	Si (100) : SiO ₂ = 3 ~ 2 : 1	レジスト
プラズマエッチング	なし	ダメージが少ない	レジスト
ECRエッチング	あり	高アスペクト比が得られる	レジスト
HClエッチング	あり	H ₂ 中で(100):(111)=1:0.71	SiO ₂

表2-2 シリコンのウェットエッチング

エッチング法	異方性	シリコンのエッチレート	マスク材料
HF/HNO ₃	なし	0.7 ~ 7 μm/min	レジスト
KOH	あり	(100) : (111) = 400 : 1	SiO ₂ , Si ₃ N ₄
EDP	あり	(100) : (111) = 35 : 1	SiO ₂ , Si ₃ N ₄
N ₂ H ₄ ・H ₂ O	あり	(100) : (111) = 10 : 1	SiO ₂ , Si ₃ N ₄
HF電解	なし		金属膜

(2) エッチングストップ

エッチングを自動的に希望の深さで止める技術である。Si中の不純物濃度の違いによるエッチング速度の違いを利用して、不純物濃度の異なる境界面でエッチングを止めたり、pn接合を利用して、n層に正の電圧を加えて陽極防蝕し、p層のみをエッチングするような手法である。薄いダイアフラムを希望の厚さに加工する場合等に重要な技術である。

(3) 犠牲層エッチング

基板から部分的に分離した構造を作るための技術である。基板の表面に犠牲層と呼ばれる層を成膜し、その犠牲層の上に希望する構造物を製作した後、犠牲層だけをエッチング液で溶かして空間的に分離した構造を作る。

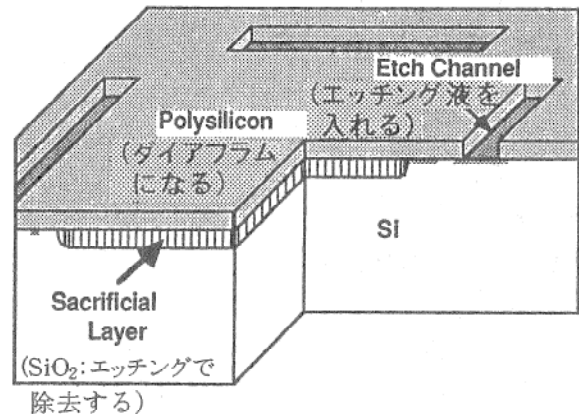


図1 犠牲層エッチングを利用した圧力センサ

図1にこの手法を用いて製作した圧力センサの例を示す¹⁾。犠牲層となるSiO₂膜上に多結晶Si膜を形成し、その表面の一部に不純物拡散により抵抗歪みゲージを形成 (図示せず) した後、SiO₂膜をHF系のエッチング液を使用して選択的に取り去り、厚さ数 μm のSiダイアフラムを製作している。

2.2 接合技術

微細加工したSi基板をセンサとして完成させるためには、支持体と接合する技術が重要である。センサの特性を生かすためには、弾性的、熱的、経年的に安定で信頼性の高い接合が要求され、平滑な表面を密着させて接着剤を用いないで固相のまま接合する方法が多く用いられる。Si基板とパイレックスガラスを両者の平滑な面を合わせて約300°Cに加熱し、ガラス側に

数百ボルトの負電圧を印加して接合する陽極接合、Si基板同志を1000°C以上の高温下で接合する直接接合等の技術が開発されている。

2.3 成膜技術

成膜には蒸着やスパッタのほかに単結晶Si薄膜の形成にエピタキシャル成長が、多結晶Si薄膜や金属薄膜の形成に化学気相成長(CVD)等が利用される。

3. マイクロマシニング技術を利用したセンサ

マイクロマシニング技術を利用したセンサの開発は非常に多くの測定対象について行われているが、ここでは振動式の圧力センサの例を紹介する。

このセンサは両端固定の梁に加わる張力変化によって梁の共振周波数が増加する現象を利用するものである。筆者らは以前に機械加工振動子を利用した種々のセンサを開発した²⁾。その後マイクロマシニング技術に着目し研究をシフトしてきたが³⁾、昨年世界に先駆けて、Siの微細な梁を内蔵し全体が単一の単結晶Siでできた振動式圧力センサを工業用センサとして実用化することができた^{3)~6)}。

センサの構造を図2に示す。Siダイアフラム表面にH形状の振動子の4端が固定されている。図中には1本の振動子しか図示されていないが、実際にはダイアフラムの中心部と縁部に、H形で1辺の寸法がおおよそ幅30 μm 、長さ500

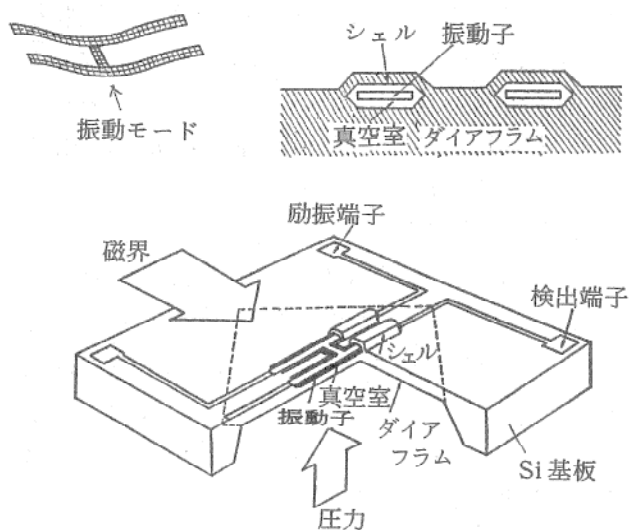


図2 振動式圧力センサの構造

μm 、厚さ5 μm の2本の振動子が配置されている。圧力が加わりダイアフラムが変形すると、振動子に張力変化が生じ固有振動数が変化する。一方に引っ張り力が加わると、もう一方には圧縮力が加わるようになっている。それぞれの振動子を固有振動数で自励発振させて、その周波数を計数する。2つの周波数の差を出力信号にする差動型構成にして、材料に起因する温度誤差のような2つの振動子に同様に作用する外乱の影響を除いている。

固有振動数を計数するために、電磁的な手法を用いて振動子を自励発振させる(図3参照)。

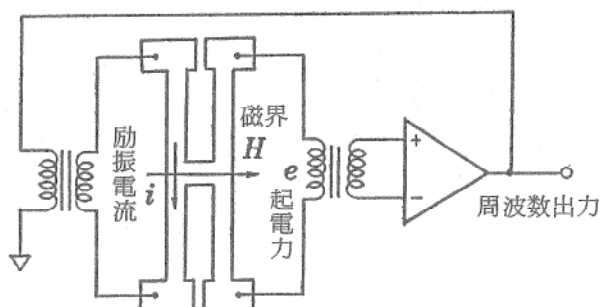


図3 振動子の自励発振回路

振動子を永久磁石の磁束と鎖交するように配置し振動子に交番電流を流すと、駆動力が生じ固有振動数で励振する。振動周波数は磁界中で振動する導体(Siの梁)に生じる電磁起電力として、振動子の両端から検出される。この信号を入力側に正帰還して、自励発振回路を構成している。

このように微細化した振動子を持ったセンサを実用化する場合に、大きな課題があった。すなわち、振動子を流体中で励振させると、振動周波数が流体の影響を受ける。周囲の流体密度が変わると、等価的に振動子の質量が変わったような挙動を示し、振動周波数が増減してしまう。また、周囲の流体によって制動を受けたり、流体を介して振動エネルギーが失われたりして、機械的Q(Quality Factor)の低下をきたす。極端な場合は励振が不可能になる。

これらの問題点を解決するために、図2のセンサでは振動子をそれと一体構造に作られた高真空室(シェル)の中に設置して、周囲の流体から隔離している。このような三次元構造をモノリシックなSiで実現できたことが開発成

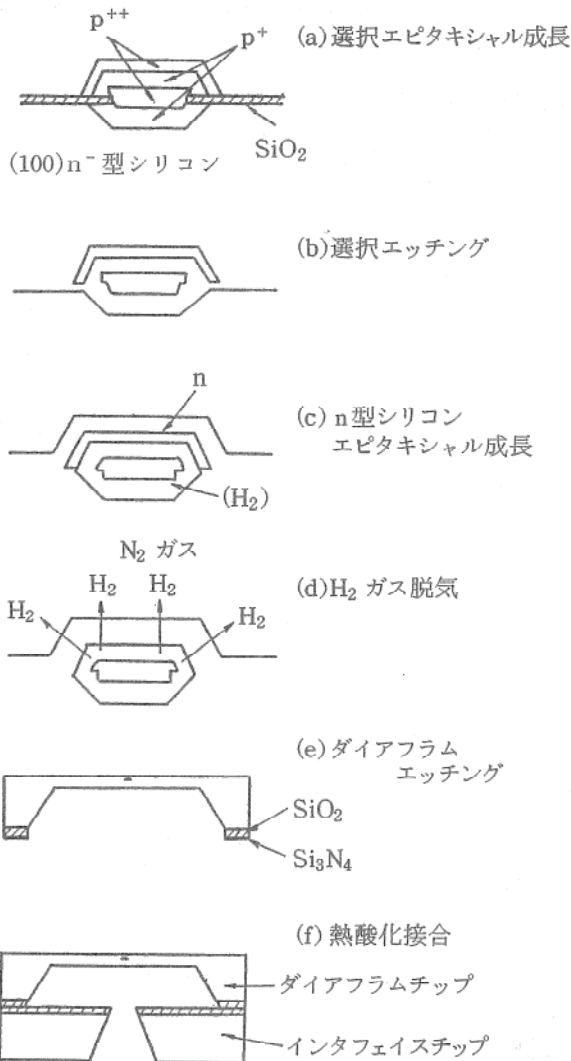


図4 センサの製作プロセス

功の最大要因であった。

以下にセンサの製作プロセスを簡単に説明する(図4参照)。(100)のn型Si基板の酸化膜(SiO₂)にあけた幅20μm程度の狭い窓からHClガスでSi基板をエッチングした後、不純物濃度を変えたp形Siを順次4層選択エピタキシャル成長(酸化膜上にはSiは成長しない)させる(a)。HF液で酸化膜を除去した後、ヒドラジン液(N₂H₄・H₂O)で1層目と3層目のp⁺層を取り除く(b)。2層目と4層目のP⁺⁺の高濃度ボロン層はエッチングされないで、振動子と真空室のシェルとして残される。次にn型Siを全面にエピタキシャル成長させて基板とシェルとの隙間を塞ぐ(c)。この際エピタキシャル成長時のキャリアガスである水素ガスが室内

に残っているが、窒素ガス雰囲気中で高温に上げると、水素ガスは外部に拡散してシェル内は1mm Torr以下の高真空になる(d)。続いて反対側からアルカリ液を用いた異方性エッチングでダイアフラムを形成し(e)、インタフェイスチップに熱酸化膜を介して直接接合して(f)、圧力センサが完成する。

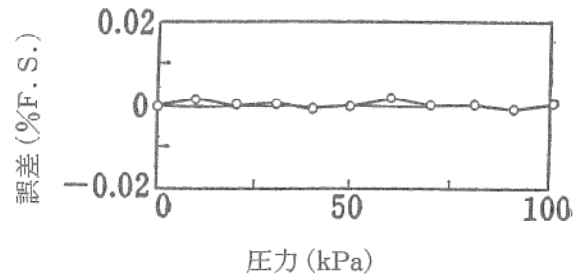


図5 圧力センサの校正特性

センサチップ部の特性の1例を図5に示す。従来の抵抗式や容量式のセンサに比べて、直線性、ヒステリシス特性、再現性等が著しく改善された。

このSi振動式圧力センサはプロセス計測用差圧伝送器の検出部として昨年始めより実用化が始まったばかりであるが、フィールドでの実績が急速に伸びており、今後ますます用途が広がっていくことが期待されている。

4. まとめ

マイクロマシニング技術とそれを利用した圧力センサの開発例を紹介した。マイクロマシニング技術の計測分野への利用はセンサにとどまらず、マイクロバルブ、マイクロランプ、微小真空管、マイクロピンセット等のデバイスへと研究対象が広がってきている。一昨年からスタートとした通産省の「マイクロマシン大型プロジェクト」は、このような技術をマイクロロボットに利用しようとする野心的なプロジェクトである。マイクロセンサの開発は今後アクチュエータや信号処理系を一体化して、複合化、インテリジェント化の方向に進んでいくものと思われる。

参考文献

- 1) H. Guckel, et al. : Digest of Technical Paper, Transducers '87, 277/282(1987)

生産と技術

- 2) 原田, ほか: 計測と制御, 24-8, 757/764 (1985)
- 3) 原田, 桑山: 計測と制御, 28-6, 509/513 (1989)
- 4) 三枝, ほか: 横河技報, 36-1, 21/28 (1992)
- 5) 三枝, 山県: 計測と制御, 31-6, 689/691 (1992)
- 6) 原田: SICE くまもと科学・技術フォーラム予稿集, 18/25 (1992)

