

MEMS 技術を用いた圧電型超音波センサの開発

Development of Piezoelectric Ultrasonic Sensor Using MEMS Technology

田中 恒久* 金岡 祐介* 宇野 真由美*

Tsunehisa Tanaka Yusuke Kanaoka Mayumi Uno

村上 修一* 山下 馨**

Syuichi Murakami Kaoru Yamashita

(2012 年 6 月 25 日 受理)

キーワード：超音波センサ, MEMS, 薄膜, 圧電, PZT, チタン酸ジルコン酸鉛

1. はじめに

自動車のバックソナーやロボットの障害物検知センサとして、超音波センサが用いられている。従来から市販されている超音波センサではバイモルフ型の超音波センサが良く知られている。センサ数は単素子でパッケージサイズは約 $\phi 10$ mm である。センサにバルク型の圧電素子を使用しているため超音波の送受信が可能であり、単素子で物体の検出、二素子で超音波信号の伝達が可能である。周波数特性は共振型であり共振周波数は 40 kHz である。立体像計測用にセンサをアレイ化しようとした時、センサ単体の外寸法が大きくセンサパッケージ同士が干渉するためにセンサ配置の狭ピッチ化が難しい。

近年、MEMS 技術を用いて作製された小型の音波センサが MEMS マイクロフォンという名前で販売されている¹⁾。MEMS とは、Micro Electro Mechanical Systems の略で、フォトリソグラフィを基本にした立体的微細加工技術を用いてシリコン基板等に作製されたセンサやその他微細構造体等を集積化したデバイスのことである。MEMS マイクロフォンは、携帯電話等の電子機器内部に実装されている単素子型の受信専用センサである。パッケージ寸法は約 4 mm 角である

が、今後小型化されていくと考えられる。センサ構造は従来型のコンデンサ型マイクロフォンと同様、非常に狭い間隔で薄膜と電極とが対向して配置されている。音波が薄膜を振動させると、薄膜と対向電極間の静電容量値が変化し、その量を電気信号に変換して出力される。周波数特性は可聴域での感度特性はほぼ一定であり広い周波数帯域を持っている。ただしセンサの構造上、水分の進入があると薄膜が電極に貼り付く恐れがあり、使用する周辺環境に気を使わなければならない。

本報告では、MEMS 超音波センサのもう一つの型である圧電型超音波センサについて紹介する。超音波の検出部分に圧電薄膜を使用しており、対向電極を持たずに超音波の検出を行っている。その利点は水で薄膜と電極が貼り付く恐れが無いことと、製造プロセスが簡単なことである。MEMS 技術を用いるため基板上にアレイセンサを一度に作製でき、バッチ処理による大量生産が可能である。

2. 圧電型 MEMS 超音波センサの設計

2.1 断面構造

圧電型 MEMS 超音波センサの断面構造について、図 1 に示した断面模式図を用いて説明する。単結晶シリコン基板を支持体としたダイアフラム構造になっている。支持体は固有の角度 (35.26°) のテーパ角を

* 制御・電子材料科

** 京都工芸繊維大学

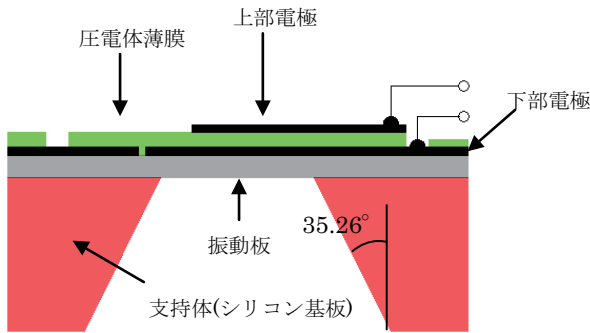


図1 MEMS 超音波センサの断面模式図 (I)

持っている。本テーパ構造は、面方位(100)の単結晶シリコン基板を、強アルカリ溶液を用いて結晶異方性エッチングをすれば、結晶方向に準じて自然に作製されるものである。ダイアフラム構造の薄膜部は、振動板となる薄膜と、その上方に電極薄膜に挟まれた圧電体薄膜とで構成される。振動板には、SOI(Silicon on Insulator)基板のデバイス層を使用する。その理由は、デバイス層が単結晶シリコンであり、機械的強度、振動特性が優れていると考えられるためである。試作したセンサの振動板は、デバイス層を熱酸化して、 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$ の3層膜としている。圧電体材料には圧電定数が大きく、バルク型超音波センサに用いられているチタン酸ジルコン酸鉛(以下PZT)を用いる。下部電極には白金を使用する。理由は白金上に作製されたPZT薄膜の結晶性が良いためである。上部電極にも白金を使用する。上部電極材料は、白金以外にも金等の金属材料の使用が可能である。

2.2 表面構造

圧電型MEMS超音波センサの表面構造について、図2に示した写真を用いて説明する。強アルカリ溶液による結晶異方性エッチングを基板の裏面から行った場合、振動板の形状はほぼ矩形になる。図2で示された振動板には光の陰影による四つ葉の形状が見えるが、これは振動板の撓みである。振動板の中心部分に形成された上部電極/圧電薄膜/下部電極部の残留応力の影響により振動板が撓むと考えられる。振動板自体の表面形状はほぼ正方形であり大きさは $1300\ \mu\text{m}$ 角である。振動板中心部分の上部電極の大きさは $240\ \mu\text{m}$ 角である。高感度化のためには振動板や圧電薄膜の大きさの最適化が必要である。上部電極と下部電極の絶縁には圧電体薄膜が使用されている。寄生容量を少なくするため、振動感知部以外のオーバーラップは必要最低限にする。

2.3 薄膜構造

MEMS超音波センサの振動板の構成について説明

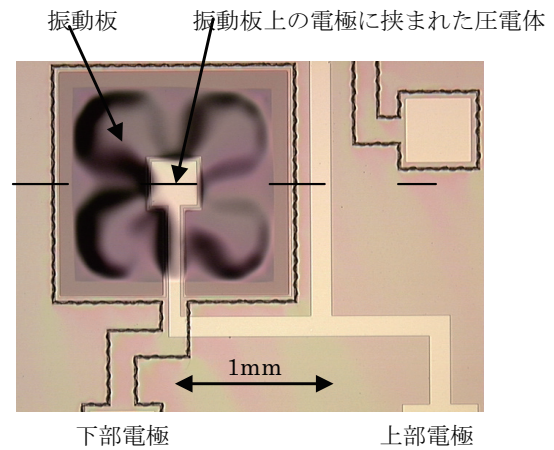


図2 MEMS 超音波センサの表面写真

する。良好な受信感度を持つセンサを開発するには、超音波受信時に振動板が大きく振動する構造にする必要がある。そのためには振動板を薄膜化して曲げ剛性値を下げ、音波を受ける面積を大きくすると良い。

MEMS超音波センサはその構造上、固有振動数をもつ共振型の超音波センサである。従って超音波センサを設計する際に、あらかじめ必要な共振周波数を決めて、その共振周波数に合う設計をしなければいけない。一辺の長さが a の正方形ダイアフラムの共振周波数は次式より求めることができる^{2,3)}。

$$f_r = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{(1-\nu^2)\rho t a^4}} \quad (1)$$

$$K = \sum_{i=1}^N E_i I_i = \sum_{i=1}^N E_i \int_{h_{i-1}}^{h_i} (z - z_0)^2 dz \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^N E_i \int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz}{\sum_{i=1}^N E_i t_i} \quad (3)$$

ここで α は振動モードによる係数であり、正方形板の最低次は α が35.99である。 K はダイアフラムの曲げ剛性、 ν はダイアフラム全体のポアソン比、 ρ はダイアフラム全体の体積質量密度、 t はダイアフラムの全厚である。 E_i は第 i 層のヤング率、 Z_0 は中立面、 h_i は第 i 層の高さ、 t_i は第 i 層の膜厚である。

共振周波数は振動板の面積に反比例するため、振動板の面積を変化させれば容易に共振周波数を調整できる。曲げ剛性値はヤング率に比例し、振動板の膜厚の3乗に比例する。曲げ剛性値を小さくすれば、超音波を受信して振動し易くなる。しかし振動板の膜厚を薄くし過ぎると機械的強度が低下し歩留まりや信頼性が低下するので注意が必要である。

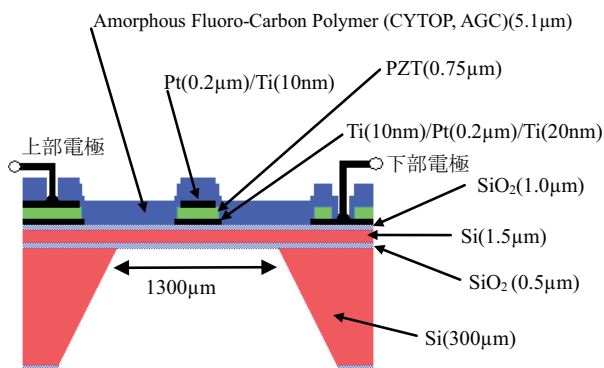


図3 MEMS 超音波センサの断面模式図 (II)

図3に試作したMEMS超音波センサの断面模式図を示す。本断面模式図は、図2の上面写真図内に描かれている点線部分の断面模式図である。振動板の中央部分以外の圧電薄膜、下部電極を除去し、振動板の曲げ剛性値を下げて受信感度の向上を図っている。

振動板の上層にアモルファスフッ素系樹脂である旭硝子(株)製のサイトップ(CYTOP) CTL-813NMX(濃度13%)を使用している。サイトップ膜はスピニングによりセンサ表面に均一に作製可能であり、特性ばらつきを改善する効果があると考えられる。サイトップは高分子膜のため、他材料より柔らかく曲げ剛性の増加にあまり繋がらないので感度特性への影響も限定的と考えられる。

振動板を設計する場合、薄膜の残留応力に注意する必要がある。薄膜の振動膜は引張応力に弱く容易に断裂する。そのため応力が少し圧縮応力気味になるように設計すると良い。振動板体の残留応力は次式により求めることができる⁴⁾。σ_{total}は振動板の残留応力、t_iは第i層の膜厚、σ_iは第i層の残留応力である。

$$\sigma_{total} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (4)$$

振動板の残留応力値を表1に示した残留応力値を

表1 薄膜のヤング率と残留応力

材料	ヤング率(GPa)	残留応力(MPa) + 引張, - 圧縮
Si (デバイス層)	179 ⁵⁾	+35 ⁶⁾
SiO ₂	66 ⁷⁾	-269*
Pt	170 ⁸⁾	-424*
PZT	10~40 ⁹⁾	+80~+100 ⁹⁾
Cytop	1.2 ¹⁰⁾	+12

* 測定値

(4)式で計算すると、圧電薄膜部を含む振動板が42.4 Mpaの圧縮応力、圧電薄膜部以外の振動板が35.8 Mpaの圧縮応力となる。

3. 圧電型 MEMS 超音波センサの作製

3.1 圧電薄膜

圧電型MEMS超音波センサの振動板上に圧電薄膜を作製する。超音波により振動板が振動すると、圧電薄膜に歪みがかかり、圧電効果により電荷が発生する。圧電材料として、大きな圧電定数を持つPZTを使用した。圧電薄膜の作製方法について下記に示す。PZT圧電薄膜の作製には市販のゾルーゲル前駆体溶液を用いる。製品名は三菱マテリアル株式会社製PZT薄膜形成剤(A6)である。図4にゾルーゲルPZTの作製プロセスを示す。作製手順は、回転数500 rpmで5秒間、回転数3000 rpmで20秒間スピニングした後、400℃のホットプレート上に置き空気中で熱分解させる。本プロセスを3回繰り返して3層成膜した後、酸素雰囲気中で600℃にて10分間アニールする。これらを4回繰り返し最終的に12層堆積し、膜厚約0.75 μmのPZT薄膜を作製する。作製したPZT薄膜の誘電特性を、ラジアントテクノロジー社製強誘電体測定装置RT6000にて測定した。測定結果の一例を図5に示す。

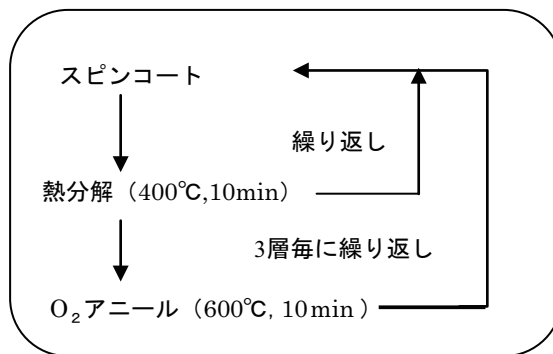


図4 ゾルーゲルPZT作製プロセス

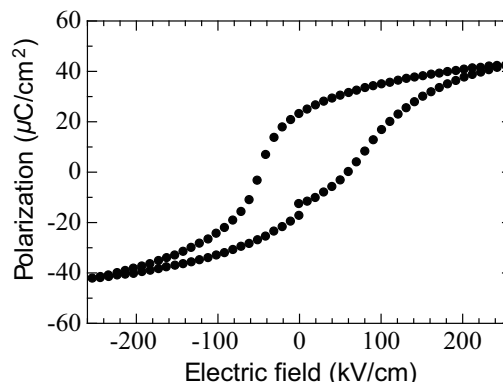


図5 PZT薄膜のP-Eヒステリシスループ

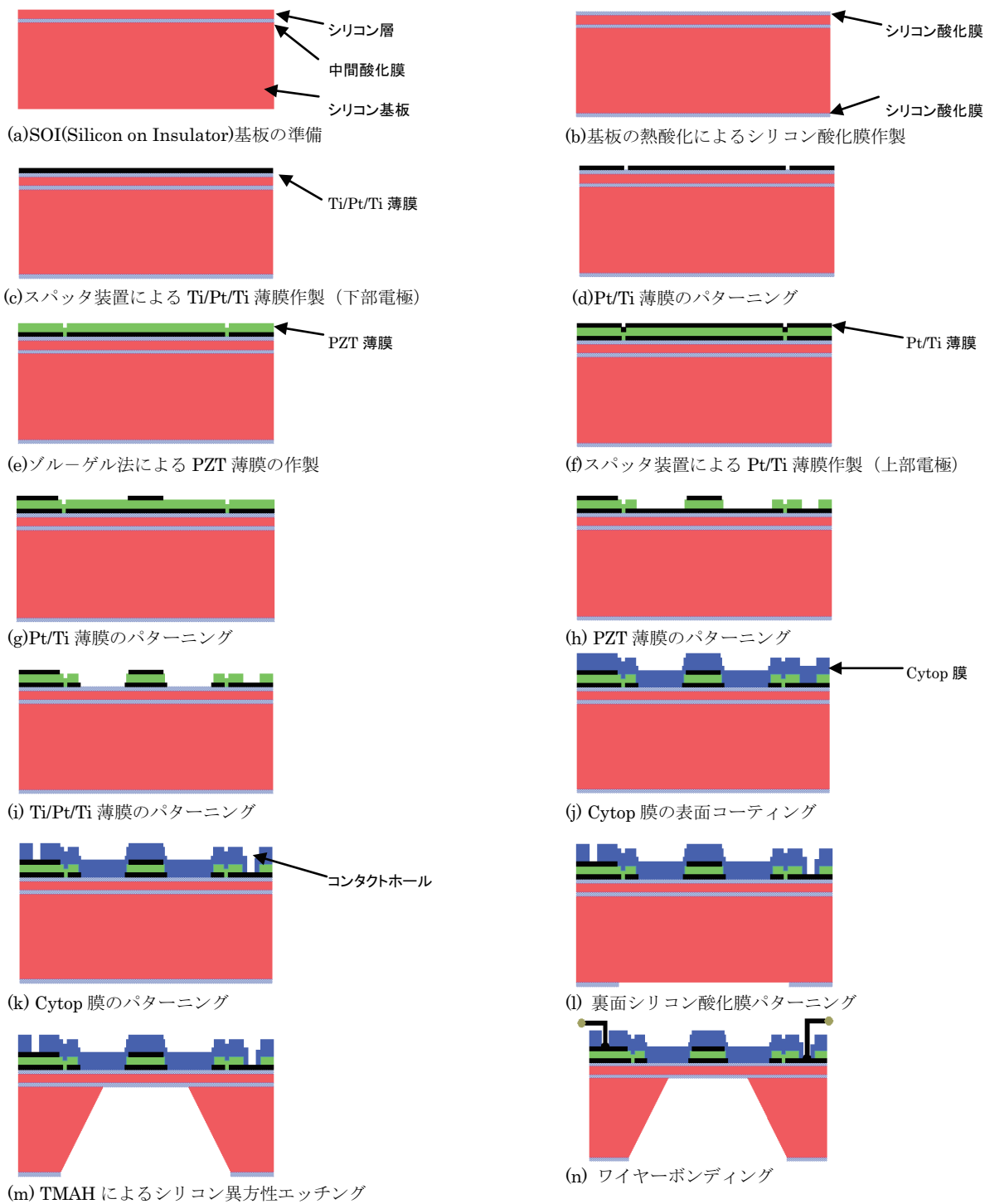


図 6 作製プロセス

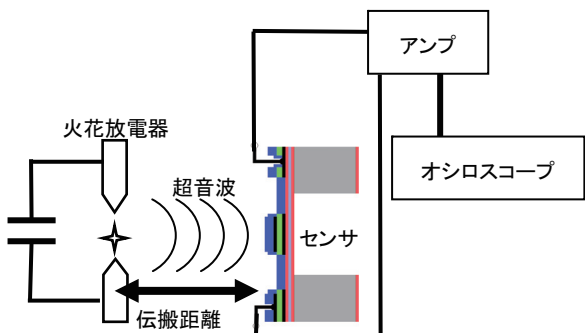


図 7 受信特性評価実験の概略図

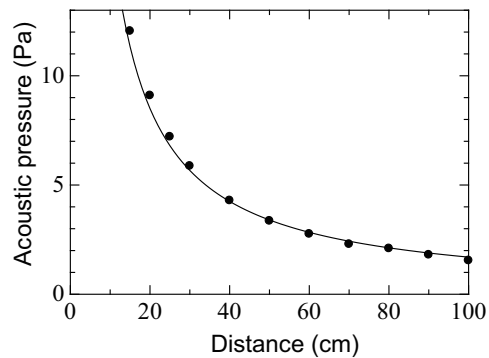


図 8 音波の音圧と伝搬距離の関係

す。横軸は電界強度，縦軸は分極である。図より，残留分極 P_r 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ，抗電界 E_c 50 kV/cm である。強誘電体薄膜特有の P - E ヒステリシスループを示している。

3.2 作製プロセス

シリコン異方性エッチングを使用した超音波センサの作製を行う。作製プロセスの一例を図6に断面模式図を用いて示す。全てのプロセスは産技研にて実験可能である。以下作製プロセスについて述べる。

- (a) 基板として市販のSOI(Silicon on Insulator) ウェハ(活性層 2.0 μm ，中間酸化膜 0.5 μm ，支持層は単結晶 Si (100) 方位 Φ 100 mm，基板厚 300 μm)を用いる。
- (b) 下部電極間の絶縁のためと異方性エッチング時のマスクのためにウェハ両面を熱酸化する。電気炉の炉内温度 1140 $^{\circ}\text{C}$ ， O_2 5 l/min で5分間ドライ酸化後， O_2 5 l/min + H_2 4.5 l/min で170分間ウエット酸化する。酸化膜厚は 1.0 μm で，TMAH による異方性エッチングに十分耐える厚さである。
- (c) 下部電極として Ti/Pt/Ti を RF スパッタ装置により製膜する。Ar ガス流量 50 sccm，1 Pa の雰囲気において，まず Ti を 500 W で1分，次に Pt を 200 W で10分，そして Ti を 500 W で30秒スパッタすることにより，それぞれ膜厚 0.02 μm ，0.2 μm ，0.01 μm を得る。
- (d) 下部電極のパターニング用のリソグラフィを行う。次に下部電極を ICP-RIE でエッチングする。ガスは塩素と Ar ガスを用いる。
- (e) ゴルーゲル法により圧電層として PZT 薄膜を製膜する。膜厚は 0.75 ~ 1.0 μm 程度とする。
- (f) 上部電極として Pt/Ti を RF スパッタにより製膜する。製膜工程は工程(c)と同じで膜厚は，0.2 μm と 0.01 μm である。
- (g) 上部電極の Pt/Ti をリソグラフィの後，ICP-RIE でエッチングする。
- (h) PZT 薄膜をリソグラフィの後，フッ硝酸 ($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:1:100$) でエッチングする。0.75 μm の厚みの PZT をエッチングするのに要する時間は 10 ~ 30 秒で，サイドエッチ量は 5 ~ 10 μm である。スカムの除去には希塩酸を用いる。
- (i) 下部電極の Ti/Pt/Ti をリソグラフィの後，ICP-RIE でエッチングする。
- (j) 表面保護膜として，フッ素系樹脂をコーティングする。フッ素系樹脂は，市販の旭硝子(株)製 CYTOP CTL-813NMX を用いる。3000 rpm にてスピコート後 100 $^{\circ}\text{C}$ で20分間乾燥し，3層コート

した後，200 $^{\circ}\text{C}$ で2時間キュアを行う。膜厚 5.1 μm の製膜が可能である。

- (k) 表面保護膜の CYTOP のコンタクトホールをリソグラフィ後，酸素プラズマアッシングにてエッチングする。
- (l) 両面リソグラフィとバッファードフッ酸により，基板裏面にシリコン異方性エッチング用窓をパターニングする。
- (m) 異方性エッチングによりダイアフラム構造を形成する。エッチャントは TMAH (濃度 25%) を 90 $^{\circ}\text{C}$ で使用する。エッチングレートは 0.83 $\mu\text{m}/\text{min}$ である。
- (n) ダイシングソーを用いて4インチ Φ ウェハから 18 mm 角のチップを 12 個切り出す。チップをステム上に接着後，ワイヤーボンダーを使用してパッドとピン間に Φ 30 μm の金線を配線する。

4. 圧電型 MEMS 超音波センサの特性評価

4.1 評価方法

作製した圧電型 MEMS 超音波センサの受信特性を評価する。受信特性評価実験の概略図を図7に示す。音波の発生源には自作した火花放電器を使用する。火花放電器の構成は，2本の先端の尖った針を距離約 4 mm で対向させて設置し，その両端に高電圧発生装置を接続する。そして数 kV の電圧が両端に印加された時，空中放電が発生し音波が発生する。火花放電器から放射された音波は無指向性の球面波であり，周波数帯域が広いため作製した超音波センサの受信特性評価の音源に最適である。図8に音波の音圧と伝搬距離の関係を示す。音圧は距離にほぼ反比例して減衰する。伝搬距離 40 cm での音圧は 4.3 Pa，伝搬距離 100 cm での音圧は 1.6 Pa である。

受信特性測定する超音波センサを，音源に対向させて，一定の距離を離して設置する。超音波センサから出力される電気信号は微弱なためプリアンプで数百倍に電気増幅をした後に，デジタルオシロスコープに接続し受信特性を評価する。超音波センサの受信感度は，(5)式により与えられる。ここで s は感度， V はセンサ出力信号の最大振幅値， P はセンサに入射した音波の音圧である。

$$s = \frac{V}{P} \quad (5)$$

4.2 評価結果

試作した MEMS 超音波アレイセンサの全体写真を図9に示す。表面はセンサ面，裏面はシリコンエッチ

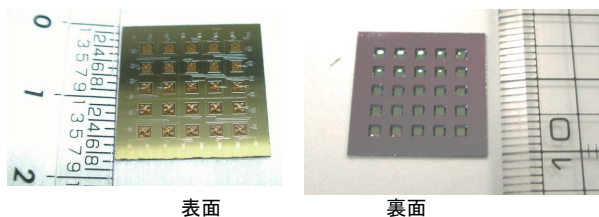


図9 試作した超音波アレイセンサの外観

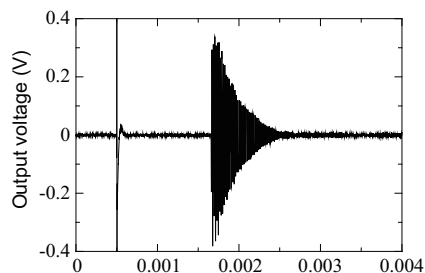


図10 MEMS 超音波センサ (単素子) の受信波形

ング面である。18 mm角のチップ上に1.3mm角の超音波センサが2.8 mm間隔で5行5列25個配置されている。チップ上の25個の全てのセンサの特性評価を行った。伝搬距離40 cmでの単素子の受信波形を図10に示す。単振動に近い減衰振動でノイズが少ない波形である。この波形の周波数特性を図11に示す。ほぼ単振動であり共振周波数が56.6 kHz、Q値が28である。アレイセンサの共振周波数分布を図12に示す。共振周波数は平均56.9 kHz、最大58.7 kHz、最小54.7 kHz、標準偏差1.3 kHz(2.3%)である。フェイズド・アレイ方式ではアレイセンサからの出力を遅延加算するため超音波波形の位相のずれが問題になるため、共振周波数分布をさらに改善する必要がある。受信感度は0.22 mV_{pp}/Pa、-73 dB (1 V/Pa=0 dB)である。圧電体素子からの出力電圧は小さいが、プリアンプと組み合わせれば出力を増幅可能である。以上より開発した超音波センサの立体計測装置への利用可能性が示された。

5. まとめ

MEMS技術を用いた超音波センサの試作例について構造設計、圧電薄膜、センサ構造の作製方法、特性の評価方法の順に紹介した。紹介した作製プロセスは全て産技研で実験可能である。評価結果より試作したMEMS超音波センサの受信波形はSN比が良く、アレイ内のセンサの共振周波数特性ばらつきが少ないことがわかった。この結果より開発した超音波センサの

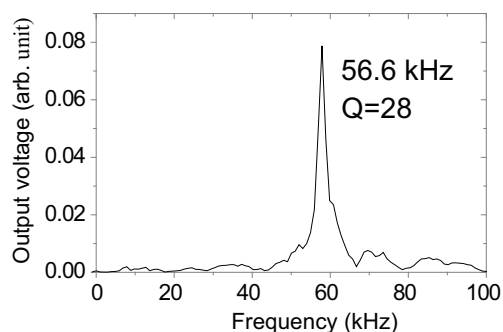


図11 MEMS 超音波センサ (単素子) の周波数特性

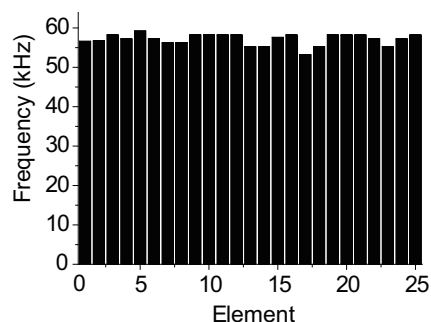


図12 アレイセンサの共振周波数分布

立体計測装置への利用可能性が示された。MEMS超音波センサの作製方法は、今回紹介した強アルカリ溶液を使ったシリコン異方性エッチング以外にも、ボッシュ方式のドライエッチング技術、表面マイクロマシンニング技術等、多様な方法がある。今後既存技術の改良や新技術の活用により、高性能で生産性に優れたMEMS超音波センサの開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) KNOWLES Surface Mount MEMS Microphones: http://www.knowles.com/search/product.htm?x_sub_cat_id=3
- 2) D. Young: Journal of Applied Mechanics, **14** (1950) 448.
- 3) 入江敏博：機械振動学通論，朝倉書店(1969) 107.
- 4) O.Tabata, K.Kawahata, S.Sugiyama, I.Igarashi: Sensors and Actuators, **20** (1989) 135.5) B.Bhushan, X.Li: Journal of Materials Research, **12**, 1 (1997) 54.
- 5) B.Bhushan, X.Li: Journal of Materials Research, **12**, 1 (1997) 54.
- 6) J.Camassel, A.Tiberj: Applied Surface Science, **212-213** (2003) 742.
- 7) M.M.Gauthier: Materials Park, OH (1995).
- 8) IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Napa Valley, California (1990) 174.
- 9) IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan (1991) 118.
- 10) G.Ogawa, N.Sugiyama, M.Kanda, K.Okano: Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd., **55**. (2005) 47.