

圧電薄膜の開発と角速度センサの実用化

藤井映志 パナソニック株式会社

小牧一樹 パナソニック エレクトロニックデバイス株式会社

山本幸二 パナソニック エレクトロニックデバイス株式会社

1. はじめに

ABO_3 で表される酸化物誘電体材料の中でも、 $PbTiO_3$ を始めとするAサイトにPbを有するペロブスカイト型強誘電体材料は、高いキュリー点を有すること、比誘電率が小さいこと、さらには自発分極量が著しく大きいことなどの種々の特長を有することから、強誘電性、焦電性、圧電性、さらには光学特性等に優れた性質を示し、様々なデバイスへの応用展開が可能な材料として注目されている¹⁾。特に $PbTiO_3$ と $PbZrO_3$ の固溶体である $Pb(Zr, Ti)O_3$ (以下、PZTと称する)は、極めて圧電性能に優れた材料で、歪み-電気変換素子として、角速度や加速度検知などの力学量センサ、またはインクジェットヘッドなどの圧電アクチュエータ等に広く用いられている²⁾。

近年、電子機器などのセットへの小型化や高性能化が進むとともに、これに伴って用いられる圧電素子にもさらなる小型/低背化、高性能化が求められてきている。この要望を満たすためのキー技術として、我々はスパッタリング法を用いてPZTを高性能の薄膜で形成する技術を開発してきた。一般的には、蒸気圧の高いPbを含んだPZTのような材料を安定に形成することは難しく、高性能のPZT薄膜を実現するためには、膜物性を高精度に制御可能な製法が必要不可欠となる。これまでも、c軸配向のPZT薄膜を用いることによって高性能のセンサ&アクチュエータが実現することが報告されている³⁾が、ここでは、圧電性に優れたPZT薄膜の形成方法について述べるとともに、これを用いたMEMS角速度センサを紹介する。

2. スパッタリング法を用いたPZT薄膜の作製

PZT薄膜の形成には、平行平板型の高周波マグネトロンスパッタ装置を用いた。図1に、代表的なスパッタ装置の概略図を示す。

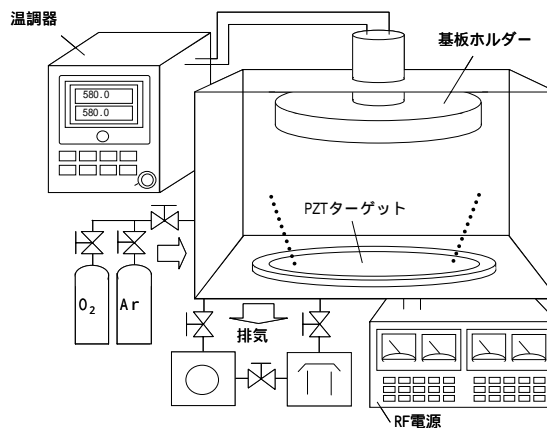


図1. PZT薄膜形成用スパッタ装置(代表例)

真空チャンバー内の下部プレート(陰極)にはPZTからなるセラミック焼結体ターゲットを設置し、さらに上部プレートには基板加熱ヒータを内設した基板ホルダーを設置した。また、スパッタガスにはアルゴンおよび酸素ガスを用いた。

このようなスパッタ装置を用いてPZT薄膜を形成するための成膜技術について以下に述べる。PZT薄膜の形成は、Pb、Zr、Ti、そしてOからなるPZTターゲットから飛び出したスパッタ粒子を基板に到達させることによって行う。このような膜をスパッタリングによって形成する場合、高周波印加電力や、ガス圧、 Ar/O_2 ガス流量比といったスパッタパラメータの変化によって、プラズマ中の Pb/Zr や Pb/Ti といったスパッタ粒子の量比は著しく変化する。また、スパ

スパッタ中の基板は約600℃の高温で加熱されているために、膜から蒸気圧の高いPbが再蒸発を生じ、かつこの再蒸発量は基板加熱温度によって変化する。即ち、形成されたPZT薄膜中のPb組成は、ターゲットから供給されるPb量(TiやZrとの相対量)と、基板加熱によって膜から蒸発するPb量(同)との差によって決まることになる。PZT薄膜は他の材料に比べて優れた圧電特性が期待できる材料であるものの、一方で、材料中に蒸気圧の高いPbを含むことから、膜形成時に組成ズレを生じやすく、薄膜を形成する上での困難度が極めて高い。

十分に圧電性能の高いPZT薄膜を得るためには、組成、結晶性、応力、さらには粒径など様々な項目に対して高精度の制御が必要となる。特に、多くのスパッタパラメータを高精度に、かつ総合的に制御することによって、膜中のPb組成を最適にコントロールすることが、高性能のPZT薄膜を形成する上での重要なポイントである。

3. PZT薄膜の特性

図2に、形成したPZT薄膜のXRDパターンを示す。

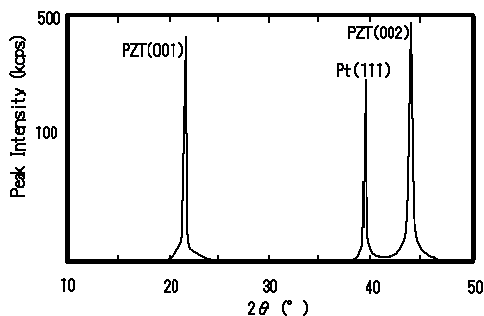
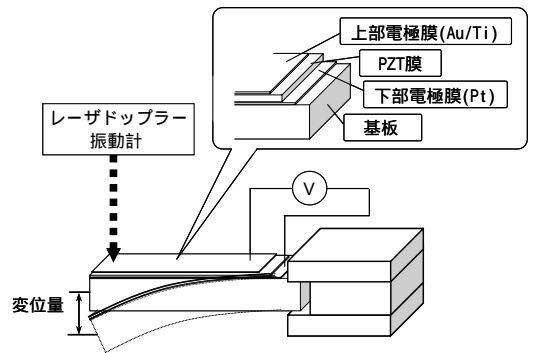


図2. PZT薄膜のXRDパターン

最適スパッタ条件にて形成したPZT薄膜の結晶性は、Pt/Si上においてもPZT(001)単一配向の優れた結晶性を有した。

次に、形成したPZT薄膜の圧電特性について述べる。圧電特性の測定に用いたサンプルの形状例を図3に示す。



$$\frac{3d_{31} s_1 s_2 t_1 (t_1 + t_2) l^2 V}{s_1^2 t_2^4 + 4s_1 s_2 t_1 t_2^3 + 6s_1 s_2 t_1^2 t_2^2 + 4s_1 s_2 t_1^3 t_2 + s_2^2 t_1^4} \dots \text{式(1)}$$

d_{31} : 圧電定数, V : 印加電圧
 s_1, s_2 : 基板及び薄膜の弾性コンプライアンス
 t_1, t_2 : 基板及び薄膜の厚み
 l : 試料の長さ

図3. 圧電特性の測定に用いたサンプル形状

サンプルは、PZT薄膜を形成した基板を、幅 = 3 mm、長さ = 14 mm程の短冊状に加工し、この端部を固定し、正弦波電圧を印加した際の先端変位量をレーザードップラー振動計で測定した。ここで、圧電定数 d_{31} は、測定検出した変位量から式(1)を用いて算出した⁴⁾。結果、圧電定数 d_{31} は形成するスパッタ条件に大きく依存するものの、最適条件下で形成したPZT薄膜の d_{31} は100pm/Vとなり、かつ印加電圧依存性の極めて小さな優れた圧電性能を示した。

4. MEMS角速度センサの作製

角速度センサは、物体の回転速度を検出するセンサである。この角速度センサの方式を検出原理で分類すると、光学式、回転式、振動式、流体式に分けられるが、これらの中で実際に普及している方式は、光学式と振動式の2つである。光学式のセンサとしてはリングレーザジャイロや光ファイバージャイロがあり、これらは光路が運動したときに光路長が変化したように見えるサニャック効果を利用したもので、十分な長さの光路が必要なため小型化できないという制約があるが、その高い検出精度と可動部を持たないことによる高信頼性ことから航空機の慣性航行装置等に用いられている。一方、振動式は回転座標系の中で移動する物質に加わる慣性力(コリオリ力)を利

用したもので、上述の光方式に比べ小型化が可能
なため、カーナビゲーション、カメラの手ぶれ検知等
に用いられている。

当社では振動式の角速度センサとして、図4に示
す音叉構造の振動子の開発を行ってきた。

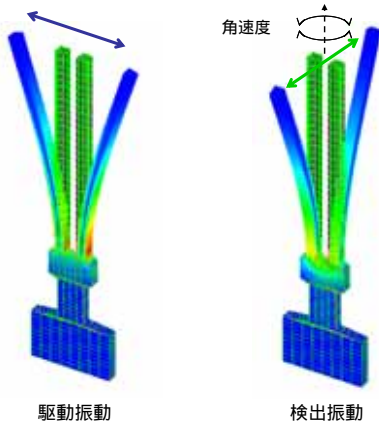


図4. 音叉構造の振動子

音叉構造の振動子では、2つのアームをアームが
並んでいる方向に互いに逆向きに振動させ、長軸
周りの角速度が加わった際に生じる振動方向とは垂
直の方向のアームの変形量を検出するものである。

ここで、振動子の小型化のために、構造体にはマ
イクロマシン技術が進んでいるシリコンを用いている。
シリコン音叉型振動子の構造を図5に示す。

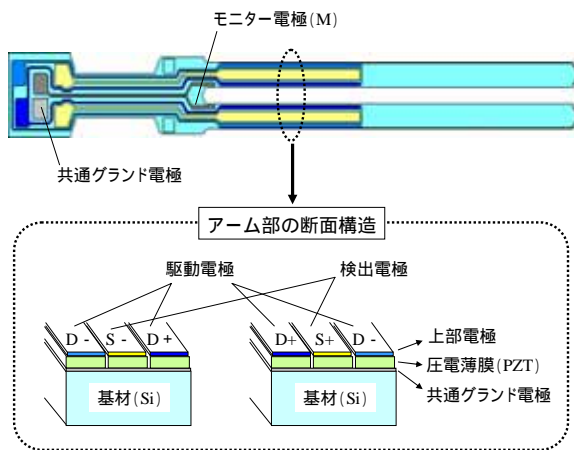


図5. シリコン音叉型振動子の構造

シリコン上には、下部電極、PZT薄膜、上部電極
の各膜を前述の方法によって形成しており、下部電

極を共通電極として、上部電極を駆動電極、検出電
極、モニター電極と分割することで、同一平面状に
形成したPZT薄膜で駆動・検出の両者を可能にし
ている。ここで駆動電極は一对の電極(D+, D-)をそ
れぞれのアームの両端に対象に配置しており、これ
らに互いに逆位相の電圧を印加して逆の伸縮を起
こさせることにより、アームを横方向に駆動している。
検出電極(S+, S-)はそれぞれのアームの中央に配
置しており、駆動の横振動によって発生する電荷は
検出電極内で相殺し、検出振動である垂直方向の
振動が発生した時のみ電荷が発生するようにしてい
る。またモニター電極(M)はそれぞれのアームの内
側に連結して配置しており、音叉の振動状態の常時
モニタリングを可能としている。

また、音叉の外形はシリコンのディープエッチング
技術を用いて加工しており、音叉の厚さは機械加工
技術を用いて調整している。ここで音叉のアーム幅
は駆動振動の共振周波数を決定し、アーム厚は検
出方向の共振周波数を決定する。このとき検出方向
の共振周波数は、駆動振動の影響を受けないよう
にしながら効率よく垂直方向の振動を検出するた
めに、駆動振動の共振周波数から数百 Hz 離して
設定している。また音叉のアームの断面形状が左右
非対称になると、駆動振動の際に検出方向である
垂直方向にも振動してしまい、検出のS/N比を低下
させるという悪影響が生じるため、音叉の外形加工
の側壁垂直度は0.3°以内になるよう制御している。

この音叉型振動子を駆動し、角速度を検出するた
めの駆動・検出回路の基本構成を図6に示す。

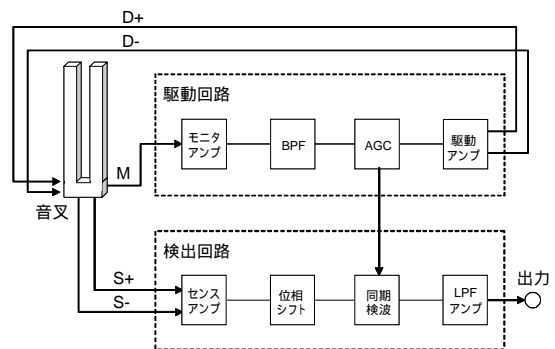


図6. 駆動・検出回路の基本構成

駆動回路部は、駆動電極(D+/D-)に電圧を加えて音叉を振動させ、音叉振動によってモニター電極(M)に発生する電荷をモニターアンプで電圧に変換し、AGC、駆動アンプを介して再び駆動電極に駆動電圧を加えるという発振ループで構成されている。モニター電極からモニターアンプに流れるモニター電流の大きさは音叉の振動振幅に相当するので、AGC回路によってこのモニター電流を一定に保つことにより、音叉の振動振幅(振動速度)を一定に制御している。検出回路部は、角速度が印加されコリオリ力によって検出電極(S+/S-)に発生した電荷をセンスアンプで差動増幅したのち、位相シフト回路で90°位相をシフトして同期検波に加えている。駆動回路の基準信号であるモニター信号で同期検波し、LPFアンプで平滑すると角速度に比例したDC電圧が得られる。実際のセンサにはこの基本回路に加え、出力調整回路や正常に動作しているかセンサ自身で確認を行う自己診断回路等が付与され、センサの制御ICとして1チップ化している。

このように形成したMEMS角速度センサは、超小型サイズでありながら、良好なセンサ性能を実現した。

5. MEMS角速度センサの実用化

まず、カーナビゲーションなどの車載用途においては、走行時の振動・衝撃といった外乱振動が大きい環境で使用される。そのため振動子(音叉)を内在する角速度センサにおいては、振動絶縁という意味での防振構造が必要不可欠な要素となっており、特に以下の2つの要件を両立させることが設計上重要である。

駆動周波数や検出方向の共振周波数などの音叉固有の振動を外部と遮断する。(音叉振動を外部に漏らさない。外乱振動を音叉に伝えない。)

外乱振動、衝撃の印加によって音叉に回転運動を発生させない。

このためセンサの構造は、まず音叉を制御ICとともにセラミックパッケージ内に接着固定し、ワイヤーボンディングで結線した後、リッド溶接にて気密封止を

行う。この音叉と制御ICを封止したセラミックパッケージを樹脂ベースに実装し、キャップをかぶせて完成させる。樹脂ベースは、樹脂フレームと板バネのリードフレーム構造となっており、ここで前述の外乱振動の減衰を行い、振動子への外乱印加による誤出力を防止している。

一方、カメラの手ぶれ補正用等の民生用途の場合には、車載用に比較して外乱振動のレベルが小さいため防振構造が不要であり、全体構造を大幅に簡略化している。セラミックパッケージに制御用ICと2本の音叉を互いに直交する方向に接着固定し、ワイヤーボンディングで結線した後、セラミックキャップを接着する構造としている。この2本の音叉は互いの振動が干渉しないように異なる駆動周波数に設定しており、これに合わせて制御用ICには2回路分の制御回路が搭載されている。

以上のような用途に加え、さらにセンサを構成する制御回路、パッケージ構造の最適な設計技術を生かすことで、車載、民生分野にとどまらず、幅広い用途への展開が期待できる。例えば、多軸の角速度検出が可能となると、ゲーム機のモーション検知や、入力デバイスとしての3Dリモコンなどが実現可能となる。さらには、加速度センサと組み合わせることにより、あらゆる動きの検出が実現できることから、健康医療分野やロボット分野など新たな用途への展開も期待できる。

参考文献

- 1) 川端, 大森, 電子・電気材料光学, 培風館, (1987)
- 2) P. Muralt, *PZT thin films for microsensors and actuators: Where do we stand?*, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics. Freq. Control*, **47**, 903-915 (2000)
- 3) Eiji. Fujii, Ryoichi. Takayama *et. al.*, Preparation of (001)-oriented Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films and Their Piezoelectric Applications., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics. Freq. Control*, **54**, 2431 (2007)
- 4) J.G. Smits and W. Choi, *IEEE Trans. Ultrason.*

Ferroelectrics. Freq. Control, **38**, 256 (1991)

5) A. Lawrence, *Modern Inertial Technology 2nd Ed.*,
Springer-Verlag(1998)

6) 多摩川精機株式会社編: ジャイロ活用技術入門,
工業調査会, (2002)

7) 藍他, 次世代センサハンドブック, 培風館, (2008)

8) 大内, 角速度センサ, 関西電子工業振興センター,
211, 30-35, (2009)

9) 小牧, 村嶋, 寺田, 月間機能材料, シーエムシー
出版, **12**, 12-20(2008)