

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月17日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成23年度～平成24年度

課題番号：23760233

研究課題名（和文） PZT/PZT 薄膜バイモルフ構造の評価と応用

研究課題名（英文） Characterization and Application of Thin-Film PZT/PZT Bimorph

研究代表者

神田 健介 (KANDA KENSUKE)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20446735

研究成果の概要（和文）：

薄膜 $\text{Pb}[\text{Zr,Ti}]\text{O}_3$: PZT の 2 層構造である PZT/PZT バイモルフ構造の MEMS デバイスへの応用を目的とした。スパッタ法による成膜において、2 層の PZT 薄膜の成膜温度および電極金属の構造を含む成膜条件の最適化により、5.4 μm 厚の PZT/PZT 構造の成膜に成功した。電気特性・圧電特性評価より、従来の単層成膜した PZT と同等の特性を有しており、上下層の PZT が極めて一致した特性を持つことを確認した。MEMS ミラーを試作し、電圧印加時の変位を測定した結果、単層のみを駆動するユニモルフ駆動時と比較してバイモルフ駆動では 2 倍の変位が得られた。加えて、薄膜の密着性が MEMS デバイス利用に際し十分であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

Double layer $\text{Pb}[\text{Zr,Ti}]\text{O}_3$ (PZT, Lead Zirconate Titanate) thin films was realized for MEMS applications. The total thickness of the bimorph PZT/PZT structure is 5.4 μm , which is much thicker conventionally reported ones (typically 1 μm). In addition, the electric and piezoelectric characteristics for top and bottom PZT layers were consistent with each other. By fabricating MEMS mirror with four PZT/PZT bimorph beams, the applicability of the PZT/PZT bimorph to MEMS fabrication process was confirmed. The bimorph beams doubled the deflection of the MEMS mirror compared with unimorph actuators. These results demonstrate that the PZT/PZT bimorph is effective to MEMS actuators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：知能機械学・機械システム

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス

1. 研究開始当初の背景

2 層の圧電層で構成されるバイモルフ型圧電素子は非圧電の弾性層と圧電層から成るユニモルフ型と比べて発生力や変位を大きくできるため、幅広く市販・実用化されている。このバイモルフ型素子は、2 枚の焼結体セラミックス板で金属の弾性材を挟むよう接着されることで製造されており、マイクロセンサやアクチュエータ等の MEMS

(Micro-Electromechanical Systems) デバイスに利用するためには、ファブリケーションプロセスへの適用性の点で問題がある。例えば、焼結体のような一般に厚い板材を利用する場合には、微細加工するために、ウエハへの貼り付け後に研磨することで薄くする必要がある他、接着に用いる材料のプロセス耐性等である。そのため、ゾルゲル法やスパッタ法によって成膜された 2 層の圧電層を持つ薄

膜圧電バイモルフ構造の研究も行われてきた。しかしながら、従来報告されている薄膜圧電バイモルフ構造の厚みは $1\mu\text{m}$ 程度であり、MEMS デバイスに用いるためには機械的強度が弱く、利用上制約がある。また、アクチュエータとしての印加可能電圧やエネルギーハーベスタにおける出力電力は圧電膜の厚さに直接関係するため、厚膜化は非常に重要である。

研究開始当初の時点において、申請者らは優れた圧電材料である $\text{Pb}[\text{Zr},\text{Ti}]\text{O}_3$: PZT に着目し、スパッタ法によって単層 $1.5\mu\text{m}$ (2層で $3\mu\text{m}$) の PZT/PZT バイモルフ構造を実現していたが、リーク電流が大きく、薄膜の基板密着性の点でも問題があった。厚膜化する場合、下層の PZT は上層の PZT 成膜時にも高温下に暴露されるため、上下層で受ける温度履歴が異なって種々の特性に差が表れやすいことや、上層 PZT 成膜時には下地が下層 PZT 上に成膜した中間電極となるため粗さが大きく、成膜後の PZT 膜にクラック等が生じやすいなどの問題がある。一般に単層の PZT 薄膜を用いた MEMS デバイスにおいても、厚膜化はその利用上重要なテーマである。

2. 研究の目的

本研究では、薄膜 PZT/PZT バイモルフ構造の MEMS デバイス応用を実現することを最終的な目的としている。そのため、薄膜 PZT/PZT バイモルフ構造を MEMS デバイスに利用するのに十分な厚さおよび圧電特性を同時に実現し、さらに、実際の MEMS デバイスを試作することによって、プロセス適用性の可否を検討することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) バイモルフ構造の製作

PZT/PZT バイモルフの構造を図 1 に示す。本研究では、各電極層や PZT 層をシリコン基板上にスパッタ法により順次成膜した。スパッタ法では、ゾルゲル法に比べてスループットが高く、凹凸のある面上においても成膜が可能であるため、将来の多自由度な MEMS デバイスへの応用にも有用である。このバイモルフ構造の作製上問題となる上下 PZT 層の熱履歴の違いや中間電極表面の粗さを解消するため、成膜条件を最適化した。

(2) PZT/PZT バイモルフの評価

上層、下層の各 PZT 層に対し、結晶性、電気・圧電的、機械などの各種特性評価を行い、MEMS デバイスへ応用するために十分な特性を有しているかを確認し、成膜条件との対応関係を体系的に整理した。

また、MEMS プロセスに適用できるかどうかの確認も含め、バイモルフカンチレバーを試作して圧電特性の評価も行った。

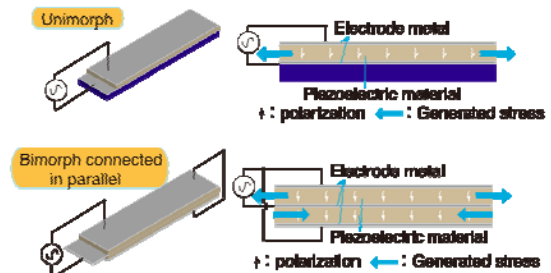


図 1 圧電バイモルフ片持ちはりの概念図

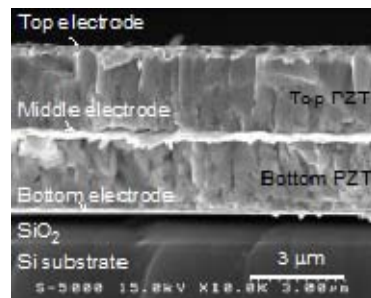


図 2 PZT/PZT 積層構造の断面 SEM 像

(3) MEMS への応用可能性の確認

MEMS ミラーを試作することにより、プロセスへの適用性、薄膜の密着性等についての確認を行った。

4. 研究成果

(1) 2層 PZT/PZT の成膜

上述のように、良好な圧電特性を有する 2 層の圧電 PZT 薄膜を連続的に作製する上で、問題となるのは、下層と上層の PZT 薄膜における成膜状態の違いである。

- ① 熱履歴の違い(下層 PZT は長時間高温に曝される)
- ② 下地の違い(上層 PZT 成膜時の下地:下層 PZT 成膜後表面の粗さが大きい)

これらの問題を解決するため、上下層 PZT の成膜温度および中間電極層の厚さと構造を変化させて成膜した際の PZT 薄膜の特性を評価した。この成膜条件最適化の結果、上下 PZT 層をともに 550°C で成膜し、中間電極層を厚さ $100/10/100\text{nm}$ の Pt/Ti/Pt 構造とすることで、上下層における諸特性が極めて一致した良好な PZT/PZT 薄膜を得ることに成功した。加えて、従来報告されていた圧電薄膜のバイモルフ構造の厚さが $1\mu\text{m}$ 程度であったが、本研究では $5.4\mu\text{m}$ 厚の成膜に成功した。

成膜条件を最適化することで得た PZT/PZT バイモルフ構造の電子顕微鏡像を図 2 に示す。上層、下層の PZT 層はそれぞれ $2.7\mu\text{m}$ の厚さであり、PZT/PZT では $5.4\mu\text{m}$ の厚さ、電極層も含めると $5.8\mu\text{m}$ の厚さとなっている。この画像から明らかなように、成膜した上下 PZT 薄膜がクラックや孔の無い柱状成長した結晶構造を有していることが分かる。

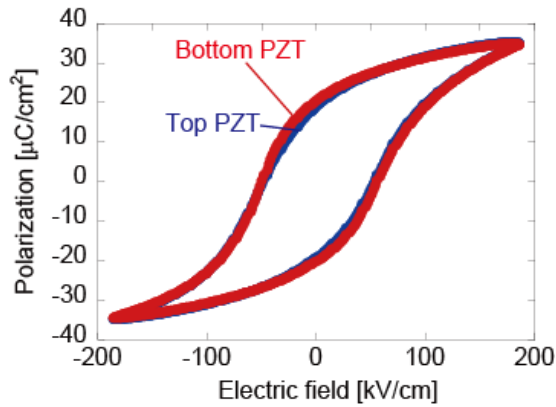


図3 上下PZT層の分極電界曲線. 1 kHz 1V において測定.

表1 上下層PZTの電気的特性測定結果

	上層PZT	下層PZT
$2P_r$ [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	39.0	40.5
$2E_c$ [kV/cm]	101.5	105.2
比誘電率 ϵ_r	968	1018
誘電損失	0.026	0.024

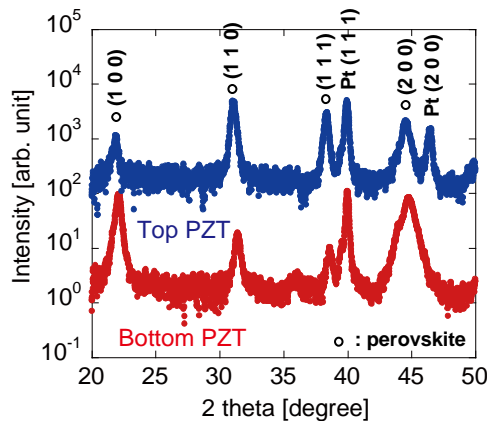


図4 X線回折パターン

次に、電気的特性の評価を行った。LCRメータによる誘電率、誘電損失等の電気的特性の測定の結果を表1に示す。上下層間で極めて特性の一致したPZT薄膜が得られたことが分かる。また、強誘電特性評価装置による分極-電界曲線の測定結果を図3に示す。分極が電界に応じて反転していることから、上下PZT薄膜が強誘電特性を有していることが明らかであり、表1にあわせて示した、上下PZT層に関する残留分極値、抗電界の値も極めて一致していることが分かる。これら電気および強誘電特性評価より、非常に良好な上下PZT層が得られていることが分かった。

さらに結晶性の評価を行うため、上下PZT各層においてX線回折パターン測定した。この結果を図4に示す。上下層ではやや異なる

配向のPZTが成膜されているが、準安定なパイロクロア相や酸化鉛等の不純物のパターンは見られず、PZTおよびPt電極の回折パターンのみが得られている。

(2)PZT/PZT バイモルフカンチレバー

成膜に成功したPZT/PZT薄膜構造をMEMSデバイスに応用するため、PZT/PZTバイモルフカンチレバーの試作を行った。試作に際しては、電極およびPZT薄膜層をすべて成膜後に、各層に対して順次ドライエッチングによる除去加工を施すことでカンチレバー作製を行った。図5は作製したカンチレバーアレイである。作製は4インチのシリコンウエハを基板とし、完成まですべてバッチプロセスにより行われた。

このカンチレバーに電圧を印加した際、逆圧電効果によりカンチレバーは曲げ方向に変位する。この際の変位をドップラー振動計により測定した。測定に際しては、単層のPZTのみに電圧を印加するユニモルフ駆動と、上下層に電圧を印加するバイモルフ駆動それぞれの印加方式による変位を比較した。図6は印加電圧と変位の関係である。2層のPZTの逆圧電効果を利用するバイモルフ駆動では、ユニモルフ駆動のおよそ2倍の変位が得られていることが分かる。また、印加電圧と変位の間には明らかに線形関係があることが分かる。この印加電圧と変位の関係より、圧電 d_{31} 定数を見積もると、 $-45\text{pm}/\text{V}$ 程度であり、従来報告されているPZT薄膜の値と同程度の値となっていることが確認できた。なお、この測定は共振周波数よりもずっと低い周波数において行い、準静的な状態として圧電定数の見積もりを行っている。

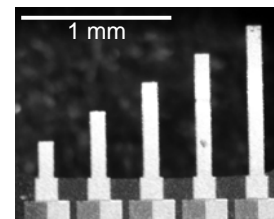


図5 PZT/PZT バイモルフカンチレバー

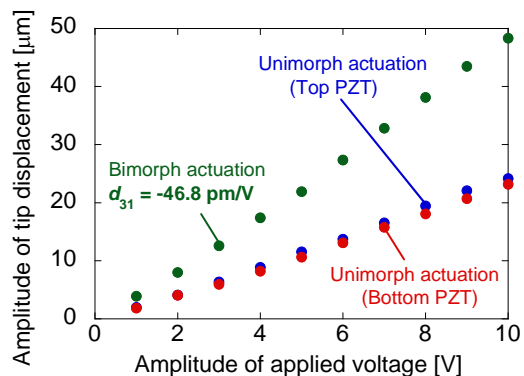


図6 カンチレバーの電圧変位特性

(3)ミラーデバイス試作

MEMS プロセスへの適用可能性およびバイモルフ構造体の有用性の確認のため、ミラーデバイスの試作を行った。4本のPZT/PZT バイモルフはりがミラーを支えている形状を設計、試作を行った結果が図7である。複数の形状のミラーを試作しているが、報告書執筆段階では、デバイスについての十分な評価を行っていない。図7の(c)のタイプに対する静的な電圧-角度特性について、白色干渉計を用いて測定した。この結果について図8に示す。バイモルフカンチレバーと同様、ユニモルフ駆動と比較してバイモルフ駆動では約2倍のミラー角度が得られていることが分かる。また、デバイス作製時・駆動時ともに各層の剥がれや亀裂等は生じず、十分な密着性および剛性を有するバイモルフデバイスの作製に成功したことが確認できた。

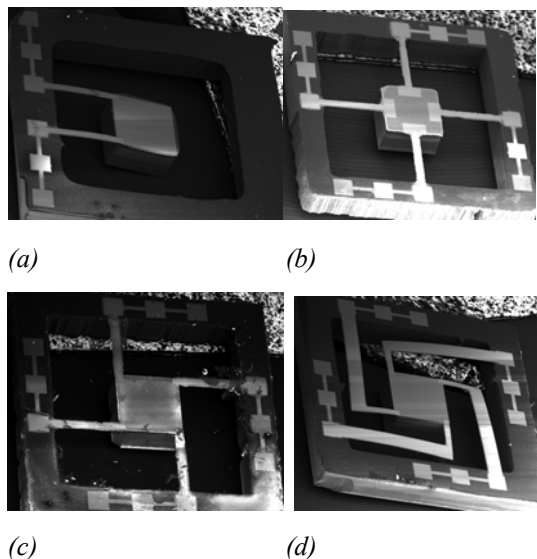


図7 試作したMEMSミラーのSEM画像。全て4mm角のチップであり、1mm角のミラーを1mm長さのバイモルフはりで支える構造となっている。

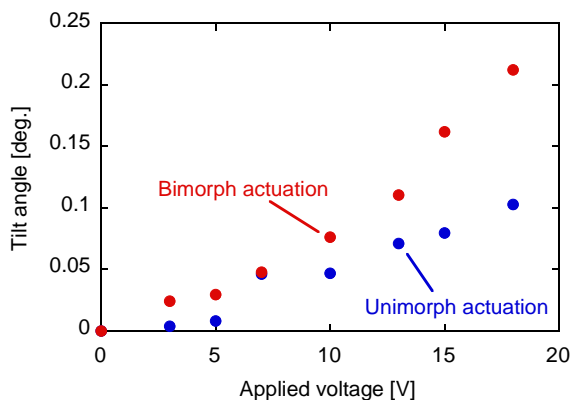


図8 PZT/PZTバイモルフによるMEMSミラーの電圧動作角度特性(静的動作)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- (1) K. Kanda, J. Inoue, T. Saito, T. Fujita, K. Maenaka, Fabrication and Characterization of Double Layer Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films for Micro-Electromechanical Systems, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, 2012, 09LD12
DOI:10.1143/JJAP.51.09LD12
- (2) K. Kanda, T. Saito, Y. Iga, K. Higuchi, K. Maenaka, sensors, Vol. 12, 2012, 16673-16684
DOI:10.3390/s121216673

[学会発表] (計10件)

- ① 塩野祥平, 濱田浩幸, 蔣永剛, 樋口行平, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, P(VDF/TrFE)薄膜を用いた柔軟な心拍・呼吸センサ, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2011年6月30日, 東京工業大学(東京都)
- ② 齋藤誉司, 神田健介, 伊賀友樹, 樋口行平, 前中一介, 構造上での演算機能を有する3軸加速度センサ, 第28回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2011年9月27日, 船堀タワーホール(東京都)
- ③ 神田健介, 明石優, 藤田孝之, 前中一介, 低アスペクト比構造体のPZT薄膜による側面方向駆動, 第59回春季応用物理学関係連合講演会, 2012年3月15日, 早稲田大学(東京都)
- ④ K. Kanda, K. Nagata, T. Yamakawa, T. Fujita, K. Maenaka, Miniaturization of Vibratory Beam Accelerometer by using PZT, 26th European Conference on Solid-State Transducers, 2012年9月12日, クラクフ, ポーランド
- ⑤ K. Kanda, Y. Akashi, T. Fujita, K. Maenaka, Fabrication and Characterization of Lateral-Directional Actuator Using Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films, 2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, 2012年11月5日, イーグレ姫路(兵庫県)
- ⑥ J. Inoue, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka, Fabrication and Evaluation of Bimorph Comprising of Double Pb[Zr,Ti]O₃ Thick Films, 2013 IEEE Joint UFFC, EFTF, and PFM Symposium, 2013年7月25日発表予定, プラハ, チ

- エコ共和国
- ⑦ 神田健介, 永田和幸, 山川隆洋, 藤田孝之, 前中一介, MEMS のための薄膜 PZT/PZT バイモルフ, 第 29 回強誘電体応用会議, 2012 年 5 月 24 日, コープイン京都 (京都府)
 - ⑧ 神田健介, PZT の微細加工とセンサへの応用, マイクロシステム融合研究会, 2013 年 1 月 10 日, 東北大学(宮城県)
 - ⑨ 神田健介, PZT の微細加工とセンサへの応用, 第 67 回次世代センサ協議会, 2013 年 3 月 8 日, 兵庫県立大学 (兵庫県)
 - ⑩ 井上純一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, MEMS デバイス向け厚膜 PZT/PZT バイモルフ構造, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 29 日, 神奈川工科大(神奈川県)※講演奨励賞受賞

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 健介 (KANDA KENSUKE)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20446735

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし