

塑性加工によるマイクロマテリアルの Electro-Mechanical 特性の改変

京都大学 工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻
 教授 小寺秀俊
 (平成 11 年度研究開発助成 AF-99012)

キーワード：薄膜、圧電特性、MEMS、RF-MEMS、アクチュエータ

1. 研究の背景

近年 MEMS の利用範囲は急速に広がっており、図 1 に示すように、センサー・アクチュエータに始まった MEMS の分野は、自動車・航空宇宙・バイオ・医療関係へと利用範囲が広がり、様々な用途の MEMS が研究され、事業化されている。

MEMEの駆動原理として、静電アクチュエータが一般的であったが、今日では圧電アクチュエータの利用も多くなってきている^{1), 2), 3), 4)}。本研究の目的は、圧電薄膜の内部応力と圧電特性の関係を明らかにするとともに、圧電薄膜を成膜した基板に塑性加工を付与することにより、圧電薄膜の内部応力を制御することによる、圧電特性の改変の可能性を明らかにすることであった。

これは、以下の理由から着想したものである。

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の構造及び部品は CVD やスパッタ、リソグラフィなどの薄膜プロセスを用いて作製される。MEMS の構造を設計する場合、薄膜の電気的特性や機械的特性を把握する必要がある。

薄膜の特性に関する研究は多くなされており、その特性は成膜方法や材料の組成に依存することが報告されている^{5), 6), 7), 8)}。薄膜の特性が設計した部品において必要とする特性に合わない場合には、通常、材料の成分を変えたり、成膜の条件を変えたりすることが行われる。作製プロセスにより必要な特性を持つ薄膜を作製することができなければ、MEMSの構造及び部品の設計を変更しなくてはならない。もし、成膜した後に何らかの方法により薄膜の機械的特性及び電気的特性を改変することが可能になれば、薄膜を利用したMEMSの構造及び部品の設計の自由度を向上することができる。

そこで、本研究では上述したように、成膜後の薄膜に機械的な変形やひずみを与えることにより機械的特性及び電気的特性を改変する方法を提案し、その可能性を示した。

本研究では、圧電薄膜として、強誘電体材料である $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (以下PZT) を対象の圧電材料として用いた。

1. 2 これまでの圧電薄膜のひずみ依存性に関する研究例

MEMSのセンサーやアクチュエータに利用されているPZT薄膜はゾルーゲル法やCVD、スパッタリングなどにより成膜されており、その圧電特性を高くする為の成膜方法や成膜条件の検討が行われている^{9), 10), 11), 12)}。バルクのPZT材料の圧電特性はひずみにより変化することがよく知られており、DuboisらはPZT薄膜に引張ひずみを与えると圧電定数 e_{31} の絶対値が大きくなり、圧縮ひずみを与えると圧電定数 e_{31} の絶対値が小さくなることを報告している¹³⁾。しかし、Duboisらの実験は与えたひずみが 8.0×10^{-4} と小さく、PZT薄膜もバルクのPZT同様にひずみを与えると圧電特性が変化することを示したのみである。PZT薄膜の圧電特性を機械的な変形によるひずみを与えて改変するためには、基板が塑性変形をするオーダーのひずみを与える必要があり、大きなひずみを与えた場合の圧電特性の変化を明らかにする必要がある。

1. 3 研究の目的

本研究では、まず、ZrとTiの比が57:43のPZT薄膜の圧電特性が、成膜後に外部からひずみを与えることで、どのように変化するかについて明らかにする。また、熱膨張係数の異なる基板上に成膜したPZT薄膜は、結晶性が同じで残留ひずみが異なる。これらのPZT薄膜に圧縮又は引張りのひずみを与えて、内部ひずみが同じになるように調節した場合の比誘電率を比較し、ひずみがPZT薄膜の特性に与える影響について考察した結果を報告する。また、助成期間終了後に本研究に関連した研究成果についても報告する。

2. PZT 薄膜に与えたひずみと誘電率の関係

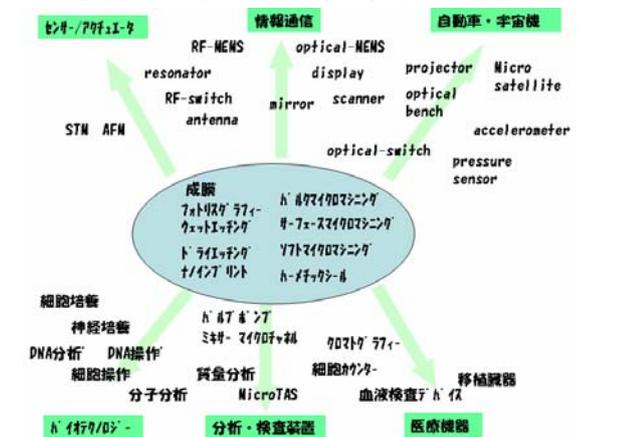


図 1 現在のマイクロマシンの要素デバイスと応用分野

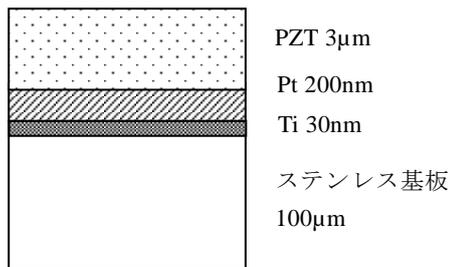


図 2 試験片の断面構造

PZT等の圧電性薄膜の圧電定数 d_{31} と膜厚方向の誘電率 ϵ_{33}^T の関係は次式となる。

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{s_{11}^E \epsilon_{33}^T} \quad (1)$$

ここで k_{31} は電気機械結合係数であり、 s_{11}^E は弾性コンプライアンスである。

電気機械結合係数及び弾性コンプライアンスが、電極に加えた電圧による変形中に変化しないと仮定すると、式(1)に示すように、PZT薄膜の圧電定数 d_{31} は膜厚方向の誘電率 ϵ_{33}^T の平方根に比例する。すなわち、圧電定数を測定する代わりに、比誘電率を測定することで、PZT薄膜の圧電特性を評価することができる。

MEMSでは、Si基板などを利用することがほとんどであるが、本研究では塑性加工により圧電薄膜にひずみを加えることから、脆性材料であるSiに代わって厚さ100 μm のステンレス基板を用いてその上にPZT薄膜を成膜した。PZTの成膜の前に、SUSの基板の上にTiおよびPtを成膜し、その上にPZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$)を厚さ3 μm まで成膜した(図2、表1成膜条件参照)。

表1 $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ 薄膜の成膜条件

Parameter	Conditions
Substrate	Pt/Ti/SUS304, Pt/Ti/SUS430 [$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$] $_{0.8}$ + [PbO]
Target	0.2
Substrate temperature	650 °C
Gas composition	Ar(9 sccm)+O $_2$ (1.0 sccm)
Gas pressure	4.0 $\times 10^{-1}$ Pa
RF Power	500 W
Deposition rate	17~20 nm/min

本研究では、加工による圧電特性の変化を調べることを目的としていることから、熱膨張係数の異なる2つのSUS基板(SUS304;熱膨張係数は $18.7 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$)とSUS430の熱膨張係数は $11.9 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$)にPZT(多結晶PZTの熱膨張係数($8.0 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$)¹⁴⁾)に加わる残留応力を変え、それぞれの特性を計測した後にひずみを加えて、薄膜内のひずみを一致させた場合と同じ圧電特性になるかどうかを計測することで、塑性加工による圧電特性の改変の可能性を示す。

図3にSUS304上に成膜したPZT薄膜の断面のSEM写真を示す。PZT薄膜は数百nmのグレインが、厚さ方向に結晶成長した柱状構造をしている。

基板に用いたSUS304の熱膨張係数は $18.7 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ であり、650 $^\circ\text{C}$ で成膜したPZT薄膜を室温(25 $^\circ\text{C}$)まで冷却した場合、PZT薄膜には約 6.7×10^{-3} の大きさの圧縮残留ひずみが生じていると考えられる。また、SUS430の熱膨張係数は $11.9 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ であり、その上にPZT薄膜を650 $^\circ\text{C}$ の基板温度で成膜し、室温まで冷却するとPZT薄膜とSUS430の熱膨張係数の差から、PZT薄膜には 2.4×10^{-3} の大きさの圧縮残留ひずみが生じると考えられる。

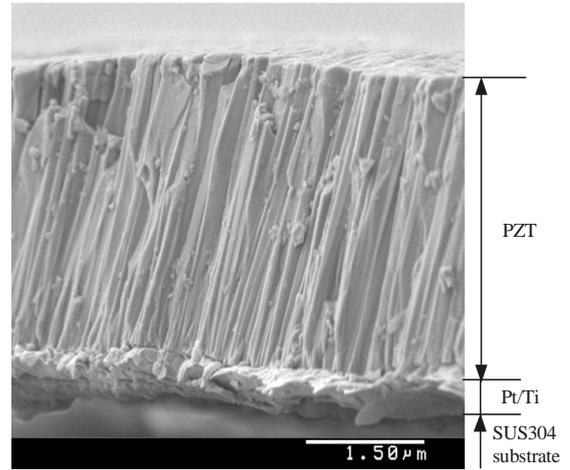


図3 SUS304 基板上の PZT 薄膜の SEM 像

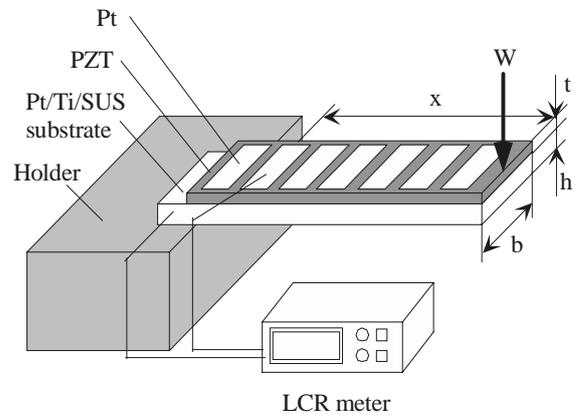


図4 ひずみと電気特性の評価装置の概略図

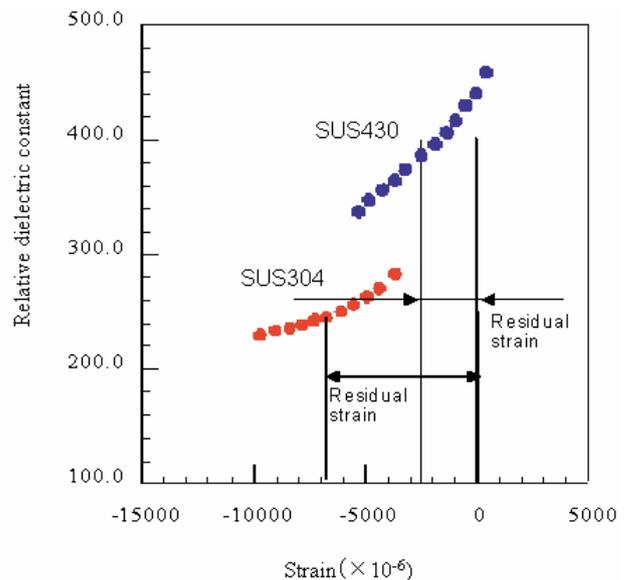


図5 PZT 薄膜特性のひずみ依存性

PZT薄膜の上に上部電極を成膜し、図4に示すようにステンレス基板の片方を固定し、他方の自由端に強制変位を加えることでPZT薄膜に圧縮又は引張のひずみを与えた。

ステンレス基板の厚さは 100 μm でありPZT薄膜の厚さに比べて十分に厚いこと及び曲げによる曲率が小さいことから、PZT薄膜の厚さ方向におけるひずみの分布は小さいと仮定できる。PZT薄膜に生じるひずみは次式により求めることができる¹⁵⁾。

$$\varepsilon_{PZT} = \frac{3t_s}{2\lambda^3} \cdot y \cdot x \cdots (2)$$

ここで、 t_s はステンレス基板の厚さ、 λ は固定端から強制変位を加えた点までの距離、 x は強制変位を加えるステンレス基板の先端から誘電率を測定する位置までの距離、 y はステンレス基板先端に加えた強制変位である。

PZT薄膜にひずみを与えた場合の誘電率の変化を図5に示す。縦軸はPZT薄膜の比誘電率、横軸はPZT薄膜のひずみである。SUSの基板 304 基板上に成膜したPZT薄膜に与えた圧縮又は引張りひずみの大きさは最大 3×10^{-3} であり、ステンレス基板の降伏領域近傍までひずみを与えた。PZT薄膜とステンレス基板の熱膨張係数の差によりPZT薄膜に生じている圧縮残留ひずみの大きさは 6.7×10^{-3} であるので、PZT薄膜のひずみは -9.7×10^{-3} から -3.7×10^{-3} まで変化しており、常に圧縮ひずみ状態にある。PZT薄膜の圧縮ひずみを大きくすると、PZT薄膜の比誘電率は小さくなり、PZT薄膜の圧縮ひずみを小さくすると、PZT薄膜の比誘電率は大きくなっている。ステンレス基板の降伏領域近傍のひずみが大きい領域においても、ひずみに対応して比誘電率が変化している。すなわち、基板に変形を加えるとPZT薄膜の圧電特性を変えることができると考えられる。

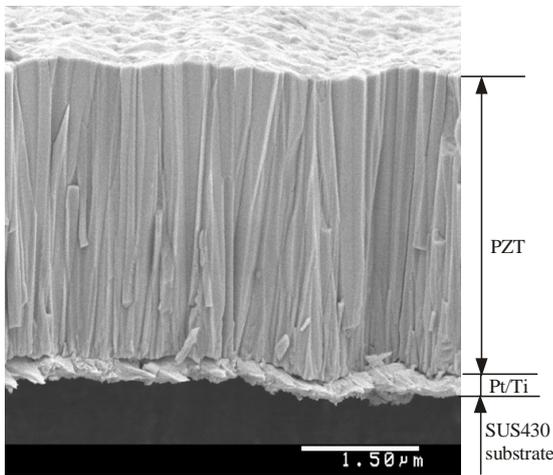


図6 SUS430 基板上の PZT 薄膜の SEM 像

SUS430 基板上に成膜した PZT 薄膜の断面の SEM 写真を図6に示す。SUS430 基板上の PZT 薄膜は図4に示す SUS304 上の PZT 薄膜の構造と同様に、数百 nm のグレインが厚さ方向に結晶成長した柱状構造をしている。異なる基板に成膜した PZT 薄膜の特性に与える機械的なひずみの影響を明らかにするためには、用いた 2 種類のステンレス基板上に成膜した PZT 薄膜の結晶性が同一である必要がある。そこで、PZT 薄膜の結晶構造を調べた結果を図7に示す。

SUS304 と SUS430 上の PZT 薄膜の XRD パターンにおいて、圧電特性を示す PZT のペロブスカイト構造の(001)面、(101)面、(111)面、(200)面を示す $2\theta=21^\circ$ 、 $2\theta=31^\circ$ 、 $2\theta=38^\circ$ 、 $2\theta=44^\circ$ のピークと下部電極として用いた Pt のピーク $2\theta=39.73^\circ$ が観察される。また、それぞれのステンレス基板上の PZT 薄膜の XRD パターンにおいて、(001) 面を示す $2\theta=21^\circ$ のピークが最大となっていることから、SUS304 と SUS430 上に成膜した PZT 薄膜は、ともに(001)面に優勢配向したペロブスカイト構造である。以上のことから、SUS304 上に成膜した PZT 薄膜と SUS430 上に成膜した PZT 薄膜とは同じ結晶性を持ち、PZT 薄膜と基板の熱膨張係数の差による残留ひずみのみが異なる薄膜であるということができる。

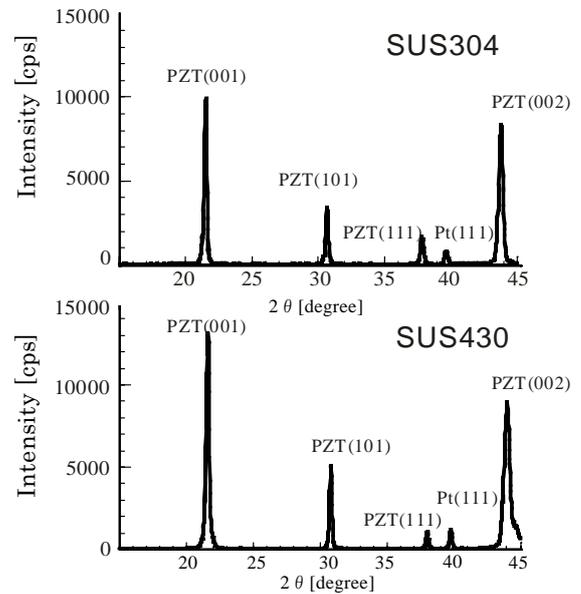


図7 ステンレス基板上の PZT 薄膜の XRD パターン

PZT薄膜に機械的なひずみを与えない場合、SUS304 上に成膜したPZT薄膜の比誘電率は 244 であり、SUS430 上に成膜したPZT薄膜では 384 である。このようにSUS430 上の PZT 薄膜の比誘電率はSUS304 上に成膜した場合に比べ、約 1.6 倍になっている。また、これらのステンレス基板上に成膜した薄膜の圧電定数 d_{31} を引張試験装置により測定した。その結果、SUS430 上に成膜したPZT薄膜の圧電定数 d_{31} は $-54.8 \times 10^{-12} [\text{C/N}]$ であり、SUS304 上の薄膜の圧電定数 d_{31} は $-40.4 \times 10^{-12} [\text{C/N}]$ であった。このようにSUS430 上に成膜したPZT薄膜の方が圧電定数 d_{31} の絶対値が大きく、高い圧電特性を示していた。熱膨張係数の違いによって生じる残留ひずみがPZT薄膜の圧電特性に与える影響は、与えた機械的なひずみがPZT薄膜の圧電特性に与える影響と同じであった。

SUS304 基板上に成膜した場合と同様に外部から機械的なひずみを与え同じひずみの状態にすることにより、比誘電率を計測した。もし、PZT 薄膜内部のひずみを変えるこ

とにより、比誘電率を所望の値に改変することが可能であれば、2種類の基板のひずみを機械的な変形により調整し、同じ比誘電率にすることができるはずである。

SUS430 上のPZT薄膜の比誘電率とひずみの関係を測定した結果(図4にSUS304 と示している)、SUS304 上のPZT薄膜の場合と同様に圧縮ひずみが小さくなるほど比誘電率が大きくなっている。2種類のステンレス基板上に成膜したPZT薄膜の性質が同じであり、PZT薄膜の比誘電率がひずみのみに依存して変化すると仮定すると、ひずみの大きさを同じにした場合、比誘電率は同じ大きさになるはずである。図8は基板にひずみを与えてSUS304 上とSUS430 上に成膜したPZT薄膜の圧縮ひずみの大きさを 3.5×10^{-3} , 4.5×10^{-3} , 5.15×10^{-3} になるようにした場合の比誘電率を比較した結果である。縦軸はSUS430 上に成膜したPZT薄膜の比誘電率であり、横軸はSUS304 上に成膜したPZT薄膜の比誘電率である。図中の破線は、両者の比誘電率が等しくなる場合を示す。図8に示すように本研究で作製したPZT薄膜においては、同じひずみの大きさの状態における比誘電率は近い値を示しており、その差は約20%である。本研究ではSUS304 上のPZT薄膜とSUS430 上のPZT薄膜に機械的なひずみを与えることによりPZT薄膜の結晶格子が同じ状態になると考えている。上記の差の原因としては、片持ち梁に強制変位を加えた際の試験片におけるひずみの分布や薄膜の密度、面内での結晶の方位などが考えられる。本研究ではこれら影響について検討をしておらず今後検討を要すが、本研究の結果から、ひずみを与えることによって、PZT薄膜の誘電率及び圧電特性を改変することができたと考えられる。

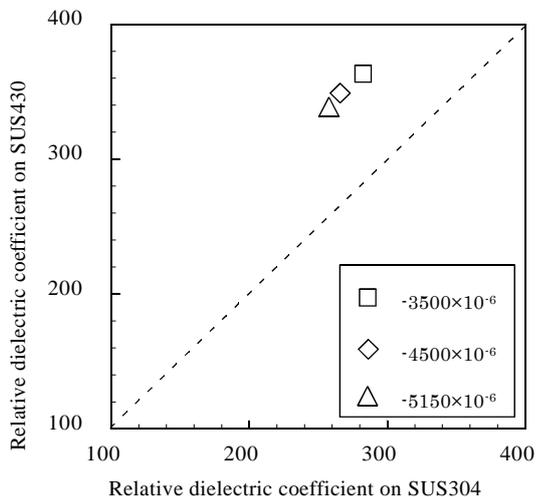


図8 SUS430 上の PZT 薄膜の比誘電率と SUS304 上の比誘電率対応

4. 結言

SUS304 上に成膜した PZT 薄膜にひずみを与えた場合の比誘電率の変化を測定することにより、PZT 薄膜に与えた機械的なひずみが比誘電率に与える影響を明らかにした。また、熱膨張係数の異なる SUS430 上に成膜した PZT 薄膜

の圧電定数と SUS304 上に成膜した PZT 薄膜の圧電定数を測定し、残留ひずみと機械的な変形により与えたひずみの影響が同じであることを示した。そして、2種類のステンレス基板のひずみが同じになるような機械的なひずみを与え、その時の比誘電率を比較することにより、機械的なひずみによる PZT 薄膜の特性改変について検討を行い、改変が可能であることを示した。

5. 最近の研究内容とその成果

我々は、PZT 材料の特性研究以降、PZT 材料に関する研究を行うとともに、その材料を用いて様々なマイクロデバイスを開発している。また、同時に NEDO の助成を得て平成 16 年から MEMS の設計解析支援システムを開発しており、その材料および知識 DB の中に前述の研究内容を含め、平成 18 年 12 月現在 MEMS-One アルファバージョンとして国内に対して無でリリースするとともに平成 19 年 5 月には β バージョンをリリースする予定である。

MEMS-One のシステム構造は図9の通りである。

また、PZT薄膜を利用したデバイスとしてAO (Adaptive Optics) 用のミラーおよびGHz帯のRF-MEMSスイッチの研究、さらにSUSの基板上に成膜したPZT薄膜を利用したマイクロポンプの研究開発を行っている。以下にその概要と図には作製方法と特性を示す。詳細に関しては各項目に関する論文を参照されたい¹⁶⁾⁻³⁶⁾。

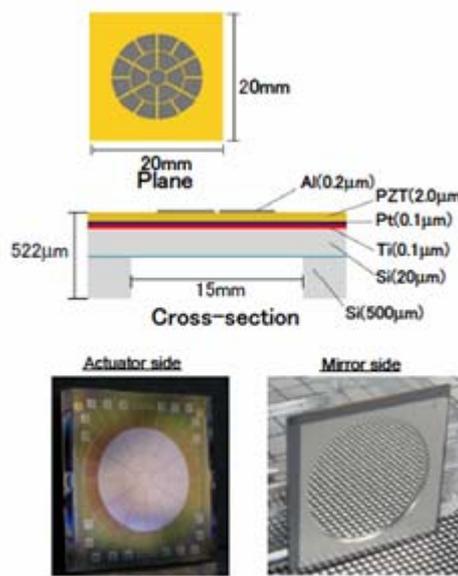


図9 AO用ミラーの構造とデバイスの写真

5.1 AO用ミラー

望遠鏡や眼底カメラなどでは、レンズに代表される光学系以外にレンズ系と被写体間の物質が、不均一性や揺らぎのためにその中を通過してくる光の波面が位相差を生じるためにそれを補正するための波面収差デバイスが必要である。一例としてスバル望遠鏡が挙げられるが、我々は眼底を検査するための光学系に必要な波面収差用の圧電駆動型の波面収差ミラーを開発している。基板として SOI 基板

を用い、PZT 薄膜を成膜し、駆動用電極パターンを作製した後、エッチングしてダイヤフラム形状にしてミラーにしている。静電型や液晶を用いた波面収差デバイスが開発されているが、我々は、構造が簡単で凹凸両方に駆動できる波面収差ミラーの実現を目指して現在開発中であり、基本的な特性評価まで至っている。

5.2 ミリ波用 RF-MEMS スイッチ

GHz 帯の電磁波はミリ波と呼ばれ光ネットワークの最後の 5m の接続を実現する通信手段として、ユビキタスネットワークの実現のため、重要視されている。ミリ波帯の通信にはミリ波の電波を送受信するための回路をスイッチングするための機械的なスイッチが半導体スイッチに対して必要視されている。RF-MEMS スイッチ素子の開発においても静電駆動型のスイッチが多く研究されているが、構造が複雑でかつ駆動電圧が高いことから、圧電駆動のスイッチが注目されている。図は我々が開発中のスイッチ素子の構造である。変形量 w 大きくするためには片持ち梁形状にすることがよいが、その場合、前述のように圧電材料が持つ残留応力によるソリが問題となる。そこで我々は、片持ち梁の変形自由度を残しながら残留応力によるソリの影響を受けないような X-Bar 型のスイッチを開発している。

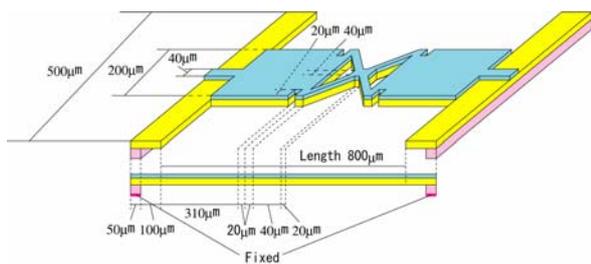


図 10(1) 圧電駆動型ミリ波用 X-bar 型 MEMS スイッチの構造

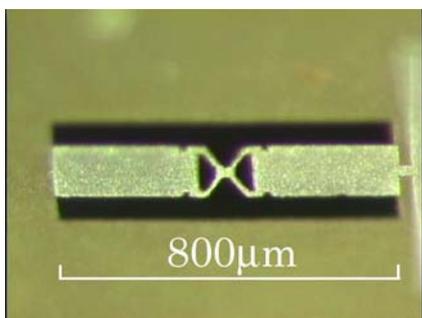


図 10(2) 作製したデバイスの光学写真

5.3 マイクロ TAS 用マイクロポンプ

MEMS の応用に一つとして μ TAS (micro Total Analysis Systems) という分野がある。これは、小さな流路内での拡散時間・反応時間の短さや、 μ l オーダーの分量という微量で実験や検査を可能にするという特徴から病院での検査やバイオの研究分野の新しい道具として注目されている。

μ TAS を構成する基礎部品として、マイクロポンプ・マイクロ流路・マイクロミキサーおよび検出器が挙げられる。我々は、流路を外壁から圧電素子で数ミクロン押すだけで、 $100 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ の断面の流路内に $2\text{mm}/\text{sec}$ の流速を実現しており、ポンプのサイズと流量から世界最高性能を達成している。我々は、SUS 基板を用いてその上に圧電薄膜を成膜した櫛歯状の片持ち梁アクチュエータにより、このポンプのより小型化を目指して流路構造とともに、現在開発を行っている。

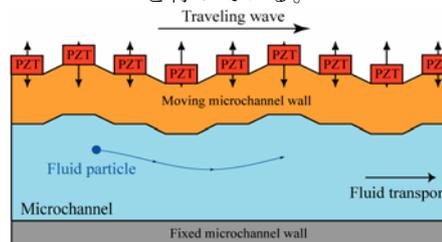


図 11(1) 壁面駆動型マイクロポンプの原理

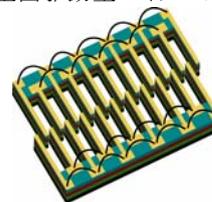


図 11(2) 駆動用櫛歯アクチュエータ

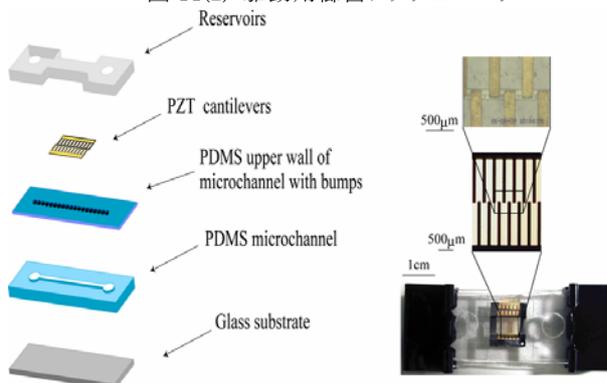


図 11(3) 櫛歯型アクチュエータを用いたマイクロポンプシステムの評価デバイス

謝 辞

本稿は、平成 11 年度の天田金属加工機械技術振興財団の助成と科学研究費補助金(), 科学技術振興機構地域結集型事業「ナノメーシン拠点形成の基盤技術開発」および独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構「MEMS 用設計・解析支援システム開発プロジェクト」の助成を得て行われた研究成果をまとめたものである。ここに謝意を表します。

文 献

- (1) Christian Burrer, Jaume Esteve and Emilio Lora-Tamayo: "Resonant Silicon Accelerometers in Bulk Micromachining Technology -An Approach", J. of Microelectromechanical systems Vol.5, No. 2, June, 122-130(1996)
- (2) T.Fujii, Shunji Watanabe, Masatoshi Suzuki and Takamitsu Fujii: "Application of lead zirconate titanate thin film displacement sensors for the atomic force microscope", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 13, No. 3, May/June

- 1119-1122(1995)
- (3)Chengkuo Lee, Toshihiro Itoh and Tadatomo Suga: "Self-excited piezoelectric PZT microcantilevers for dynamic SFM-with inherent sensing and actuating capabilities", Sensors and Actuators A72, 179-188 (1999)
 - (4)P.Muralt, M. Kohli, T. Maeder, A. Kholkin, K. Brooks, N. Setter and R. Luthier: "Fabrication and characterization of PZT thin-film vibrators for micrometers", Sensors and Actuators A 48 157-165 (1995)
 - (5)Kurt E. Petersen and C.R. Guarnieri: "Young's modulus measurements of thin films using micromechanics", J.Appl. Phys., Vol. 50, No. 11 ,November, 6761-6766(1979)
 - (6)O. Tabata, K. Kawahata, S. Sugiyama and I. Igarashi: "Mechanical Property Measurements of Thin Films Using Load-Deflection of Composite Rectangular Membranes", Sensors and Actuators, Vol. 20, 135-141 (1989)
 - (7)W. C. Oliver and G. M. Pharr: "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", J. Mater. Res., Vol. 7, No.6, June 1564-1583(1992)
 - (8)T.P. Weihs, S. Hong, J.C. Bravman and W.D.Nix: "Mechanical deflection of cantilever microbeams:A new technique for testing the mechanical properties of thin films, J. Mater. Res., Vol. 3, No.5, Sep/Oct 931-942(1988)
 - (9)Toshiyuki Tuchiya, Toshihiro Itoh, Gen Sasaki and Tadatomo Suga: "Preparation and Properties of Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Thin Films for Microsensors and Microactuators by Sol-Gel Processing", Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 104, No. 3, 159-163 (1996)
 - (10)D. A. Barrow T. E. Petroff, R. P. Tandon and M. Sayer: "Characterization of thick lead zirconate titanate films fabricated using a new sol gel based process", J. Appl. Phys. Vol. 81, No. 2, 876-881
 - (11)Shunji Watanabe, Takamitsu Fujiu and Akira Tanaka: "Lanthanum-modified lead titanate thin film formed by low-temperature chemical vapor deposition and subsequent annealing", Appl. Phys. Lett., Vol. 62, No. 25, 21 June, 3377-3379 (1993)
 - (12) I.Kanno, S.Fujii, T.Kamada and R. Takayama , "Piezoelectric properties of c-axis oriented Pb(Zr,Ti)O₃ thin films", Applied Physics Letters, Vol. 70, No. 17, March 1997
 - (13)Marc-Alexandre Dubois and Paul Muralt: "Measurement of the effective transverse piezoelectric coefficient $e_{21,t}$ of AlN and Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ thin films", Sensors and Actuators, Vol. 77, 106-112 (1999)
 - (14)岡崎 清著,"セラミック誘電体工学",学献社,425
 - (15)S.Timoshenko 著北畠顯正,片山健次郎共訳:"材料力学上巻",コロナ社,1950
 - (16) T. Suzuki, I. Kanno, H. Hata, H. Shintaku, S. Kawano and H. Kotera,Improving the Performance of a Traveling Wave Micropump for Fluid Transport in Micro Total Analysis Systems,Complex Medical Engineering,,In printing,2006
 - (17)Suzuki T, Kanno I, Loverich JJ, Kotera H, Wasa K,Characterization of Pb(Zr,Ti)O-3 thin films deposited on stainless steel substrates by RF-magnetron sputtering for MEMS applications,SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL,1252,pp.382-386,2006
 - (18)Kanno I, Kogure S, Tabata D, Nakano K, Suzuki T, Kotera H, Wasa K,Characterization of transverse piezoelectric properties of c-axis oriented PbTiO₃ thin films,FERROELECTRICS,327,pp.91-95
 - (19)鈴木孝明,秦秀敏,新宅博文,神野伊策,小寺秀俊,圧電アクチュエータを用いた進行波バルブレスマイクロポンプの開発,日本AEM学会誌,Vol.13, No.4, pp.42-47,2005
 - (20) Isaku Kanno, Hidetoshi Kotera, Kiyotaka Wasa,Intrinsic crystalline structure of epitaxial Pb(Zr,Ti)O₃ thin film,Journal of Applied physics,Vol.97,No.7,pp.97-101,2005
 - (21)Isaku Kanno, Yu Yokokawa and Hidetoshi Kotera,Thermodynamic study of c-axis-orientated epitaxial Pb(Zr,Ti)O₃ thin films,Physical Review B,Volume 69, Number 6,pp.061403-1-7,2004
 - (22)Isaku Kanno, Hironobu Endo and Hidetoshi Kotera,Low-Voltage Actuation of RF-MEMS Switch Using Piezoelectric PZT Thin Films,Production von Leiterplatten Und Systemen,3,pp.457-459,2004
 - (23)Isaku Kanno, Hidetoshi Kotera, Kiyotaka Wasa,Measurement of transverse piezoelectric properties of PZT thin film,Sensor and Atuator,A107,pp. 68-74,2003
 - (24)T. Suzuki, H. Yamamoto, M. Ohoka, I. Kanno, M. Washizu and H. Kotera",SIMPLE FABRICATION PROCESS FOR SINGLE CELL ANALYSIS CHIP COMPOSED OF EMBEDDED MICROCHANNELS AND ORIFICES,The 2nd International Symposium on Micro & Nano Technology,,po.222-225,2006
 - (25)I. Kanno , T. Suzuki , H. Hata , H. Shintaku , S. Kawano and H. Kotera",DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF A TRAVELING WAVE MICROPUMP DRIVEN BY PIEZOELECTRIC ACTUATORS,The 2nd International Symposium on Micro & Nano Technology,,pp.226-229,2006
 - (26)Isaku Kanno, Takaaki Suzuki, Hironobu Endo and Hidetoshi Kotera",DEVELOPMENT OF PIEZOELECTRIC RF-MEMS SWITCH DRIVEN BY LOW OPERATING VOLTAGE Proceedings of IPACK2005, ASME InterPACK '05",,pp.IPACK2005-73099,2005
 - (27)Y. Tazawa, H. Endo, T. Suzuki, I. Kanno, H. Kotera",Piezoelectric Microactuators Using PZT Thin Films Deposited by RF-Sputtering2005 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai",,pp.103-104,2005
 - (28)Isaku Kanno, Hironobu Endo, Takaaki Suzuki, Hidetoshi Kotera",Piezoelectric micro-actuators for RF-MEMS switches,IQEC and CLEO-PR 2005,,pp.1380-1381,2005
 - (29)T. Suzuki, H. Hata, H. Shintaku, I. Kanno, S. Kawano, and H. Kotera",VISUALIZATION AND OPTIMIZATION FOR FLUID FLOW OF TRAVELING WAVE MICROPUMP,Micro Total Analysis Systems 2005,,pp.1108-1110,2005
 - (30)T. Suzuki, I. Kanno, S. Yakushiji, H. Kotera",Development of Peristaltic Soft Micropump Driven by Electrostatic Actuator,Micro Total Analysis Systems 2004,2,pp.13-16,2004
 - (31)Kawano, Hirofumi Shintaku, Isaku Kanno, Hidetoshi Kotera",Kelvin-Helmholtz Instability Theory in Development of Microfluidic Mixing System,Micro System Technologies,,pp.571-573,2003
 - (32)Isaku Kanno, Satoyuki Kawano, Shunsuke Yakushiji, Hidetoshi Kotera",Characterization of Piezoelectric Micropump driven by Traveling Waves,Micro Total Analysis Systems 2003,,pp.997-1000,2003
 - (33)Isaku Kanno, Endo, Hidetoshi Kotera",Low-Voltage actuator of RF-MEMS Switch using Piezoelectirc PZT thin films,Micro System Technologies,,pp.529-531,2003
 - (35)S. Yakushiji,I.Kanno,S.Kawano,H.Kotera",BI-DIRECTIONAL VALVE-LESS MICROPUMP USING PIEZOELECTRIC MICRO-ARRAY ACTUATORS",Micro total analysis systems 2002,,pp.148-150,2002
 - (36) Isaku Kanno, Takaaki Kunisawa and Hidetoshi Kotera,"Piezoelectric Deformable MEMS Mirror for Adaptive Optics Composed of PZT thin films", International Conference on Optical MEMS and Their Application,pp.156-157,2006