

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420204

研究課題名(和文) 圧電PZT薄膜の超多層積層成膜およびMEMSデバイスへの応用

研究課題名(英文) Multilayer deposition of PZT thin films and application to MEMS devices

研究代表者

神田 健介 (Kanda, Kensuke)

兵庫県立大学・工学研究科・助教

研究者番号：20446735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)薄膜と電極薄膜をシリコン基板上において交互に超多層積層させ、MEMS(微小電気機械システム)プロセス技術と組み合わせることによって、ハイスループット・高機能なアクチュエータを創出することを目的とした。成膜最適条件を見出し、良好な特性の4層以上の積層構造が得られることが確認できた。一方、応用デバイスについても検討を行い、例として積層PZT薄膜による超音波トランスデューサが、低電圧で強い超音波を送信可能であることを確認した。さらに、人に触覚刺激を与える触覚デバイスが圧電MEMSで実現可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We addressed multilayer depositions of  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  (PZT) thin films. The multilayer structures up to four PZT layers were successfully fabricated. The most important advantages of the multilayer piezoelectric thin films is very low driving voltage and large deformation for actuator applications. Several MEMS (MicroElectroMechanical Systems) applications of the multilayer PZT thin films were developed in order to validate the applicability to the batch fabrication and the effectiveness of the multilayer structures. pMUT (piezoelectric Micromachined Ultrasound Transducers) with four layers of PZT thin films were developed. It was proved that the device could the high power transmission is available with very low driving voltage.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS 圧電薄膜 多層成膜

### 1. 研究開始当初の背景

圧電アクチュエータは、静電、熱、電磁駆動など他のアクチュエータと比べ、低消費電力、小型、大変位、高速応答という特長を有し、ハードディスクドライブのヘッドやインクジェット、高精度ステージなどに利用されてきた。これらのアクチュエータは、圧電材料に電圧を印加した際にひずみを生じる、いわゆる逆圧電効果を利用したものである。近年では、MEMS(微小電気機械システム) 応用を目的とした圧電材料の薄膜化が研究されてきた(S. Trolier-McKinstry and P. Muralt, J. Electroceram., Vol.12, pp. 7-17, 2004)。実際に、センサ(K. J. Choi, et al., Science, Vol. 306, pp. 1005-1009, 2004)やアクチュエータ(K. Kanda et al., J. MEMS, Vol. 18, pp.610-615, 2009)、エナジーハーベスタ(K. Moritomo et al., Sens. Actuators A, Vol. 163, pp.428-432, 2010)など多くの MEMS デバイスへの圧電薄膜応用例が報告されている。

一方、高発生力な圧電アクチュエータの形態として、圧電材料と電極を交互に多層積層させた積層圧電アクチュエータがあり、古くから市販されている。積層圧電アクチュエータの発生力や変位は、一層の圧電層にかかる電界に比例する。そのため、全体のサイズが等しい場合において、層数を増やして一層の厚さを薄くするとより低電圧で同じ発生力および変位を得ることが可能である。市販の、従来の積層圧電アクチュエータは、焼結体圧電セラミックスを研磨し、電極金属を間に挟んで多層貼付けすることによって作製される。そのため、各層の厚みの薄膜化には層数回の研磨工程を要するためスループットが悪いだけでなく、作製可能な厚みにも限界がある。一方、スパッタ法やゾルゲル法などによる圧電薄膜は、焼結体セラミックスと比較して極めて薄い膜が得ることができ、多層積層ができれば超低電圧動作可能な積層圧電アクチュエータに利用可能である。

### 2. 研究の目的

PZT(チタン酸ジルコン酸鉛) 薄膜と金属薄膜をシリコン基板上において交互に超多層積層し、MEMS(微小電気機械システム) プロセス技術と組み合わせることによって、ハイスループット・極めて高機能なアクチュエータを創出する。従来の焼結体圧電セラミックスによる積層アクチュエータに比べ、シリコン上への薄膜成膜によって作製することで、(1)バッチプロセスによるハイスループット、(2)微細加工技術への好適性、(3)薄膜化による低電圧駆動、(4)超積層による高発生力が期待できる。実現のための課題を解決し、最終的に低電圧動作が要求されるユビキタスシステム向けのアクチュエータ、極端な小型化が要求される医療機器用アクチュエータや光学用アクチュエータなどへの応用を実証する。

### 3. 研究の方法

圧電薄膜を超多層積層してアクチュエータに利用するためには、まず積層した各 PZT 層が良好な特性を有する必要がある。そのため、既に得ている 2 層 PZT 薄膜の知見を元に、積層 PZT 成膜における各種成膜条件と得られる膜との関係を明らかにし、それからアクチュエータとしての条件最適化を行う。また、多層成膜そのものにも課題がある。スパッタ法では真空を維持したまま PZT と電極膜を交互に成膜を行うことは可能であるが、各層の成膜を手動で行うと、極めて非効率である。この自動化も研究を進める上で必要である。さらに、各 PZT 層が電圧印加時に同一方向にひずみを生じてアクチュエータとして機能するためには、各 PZT 層が並列接続され、分極方向が交互に逆向きとなる必要がある。このための電気配線は、各電極層が交互になっているため、プロセス上非常に煩雑となる。これを解決するためのプロセス上の工夫についても必要不可欠となる。これらの課題を解決した上で応用デバイスの検討・試作を行う。

### 4. 研究成果

既の実現していた PZT 薄膜の 2 層積層技術を出発点とし、中間電極と PZT 薄膜の交互積層を実施した。積層においては、電極および PZT の各種成膜条件を工夫することにより、6 層の PZT までの積層に成功した。成膜後の分極処理やアニール処理の影響・効果についても評価を行った結果、最適条件で各層の特性がそろった良好な圧電薄膜が得られていることが確認できた。一方、積層膜の総厚が増えるにしたがって残留応力による膜剥離が生じること、単層厚さを薄くしすぎると膜が電氣的にリーキーになるという問題が明らかになった。この知見より、多層成膜では単層 2 ~ 3  $\mu\text{m}$  で最大 6 層程度の積層成膜が、MEMS への応用を考慮すると最適であることを見出した。

積層数を劇的に増やすことが困難であることが分かったので、達成できた積層条件においても大きな利点が見られる圧電 MEMS デバイスへの応用展開を検討した。

超音波トランスデューサへの応用については、多層化により膜厚を稼げること、低電圧で動作可能であるため送信能力が高いことが利点となる。実際に簡易的なデバイスを試作してテストした結果、低電圧で非常に大きな送信パワーが得られ、多層積層 PZT が超音波トランスデューサに対して非常に有用な技術であることが確認できた。

また、人に振動刺激を伝達可能な MEMS 圧電ハプティクスデバイスの実現可能性についての調査を行い、PZT 薄膜であっても人が十分に近く可能な振動刺激を与えることが可能であることを明らかにした。本デバイスは従来の筐体を振動させるハプティクスデバイスと異なり、直接刺激であることから

低消費電力化が可能であり、電源に限りがあるウェアラブルデバイスに利用可能であると考えられる。報告書執筆時点において開発中ではあるが、このPZT薄膜を多層積層構造にすることによって、1.6V程度の極めて低電圧で直接駆動可能なデバイスが実現可能である。他にも、ジャイロのようなアクチュエータを伴うMEMSデバイスにおける振動の自由度を向上させるための側面方向アクチュエータについての基礎的評価も行った。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計5件)

中本翔満, 佐野良, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 超音波トランスデューサを指向したPb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>薄膜の多層積層成膜", 電気学会論文誌E, Vol.137, No. 10 (2017) in press (査読有)

K. Kanda, S. Moriuie, T. Fujita, K. Maenaka, Three-dimensional piezoelectric MEMS actuator by using sputtering deposition of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> on microstructure sidewalls, Smart Materials and Structures, Vol. 26, 045019 (2017) DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aa61eb> (査読有)

J-I. Inoue, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka, Thin-film piezoelectric bimorph actuators with increased thickness using double Pb[Zr,Ti]O<sub>3</sub> layers," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 25, 055001 (2015) DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/25/5/055001> (査読有)

R. Sano, J-I. Inoue, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka, Fabrication of Multilayer Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Thin Film Structure Using Sputtering Deposition for MEMS Actuator Applications, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 54, 10ND03 (2015) DOI: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.10ND03> (査読有)

K. Kanda, S. Kajimura, J. Inoue, T. Fujita, K. Maenaka, Sputter Deposition of Pb[Zr,Ti]O<sub>3</sub> Thin Film onto Pre-Etched Substrate, IEEJ Trans. SM, Vol. 134, pp. 18-19 (2014) DOI: <http://dx.doi.org/10.1541/ieejsmas.134.18> (査読有)

### 〔学会発表〕(計22件)

中本翔満, 佐野良, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 超音波トランスデューサを指向したPb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>薄膜の多層積層成膜, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 25pm4-PS-036 (2016), 2016年10月25日, 平戸文化センター(長崎県平戸市)

大久保昂, 嶋真弥, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, PZT薄膜/樹脂積層構造による

圧電MEMSハプティックデバイス, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 24pm2-C-2 (2016), 2016年10月24日, 平戸文化センター(長崎県平戸市)

T. Okubo, K. Kanda, M. Shima, T. Fujita, K. Maenaka, Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Thin Films Integrated with Epoxy Polymer: Applications to Low Energy Haptics Device, IEEE ISAF 2016, (2016) 2016年8月23日, Darmstadt (Germany)

神田健介, 松井恵美, 大久保昂, 藤田孝之, 前中一介, 小型発汗計測デバイス, 電気学会PHS/BMS合同研究会, PHS-16-036, BMS-16-039 (2016), 2016年8月9日, 機械振興会館(東京都港区)

K. Kanda, T. Fujita, M. Yoshimoto, K. Maenaka, Omnidirectional Acceleration Sensor for Trigger of Human Monitoring System, Proc. IEEE NEMS 2016, B3P-B-52(#1168), (2016) 2016年4月19日, ホテル松島大観荘(宮城県松島町)

中本翔満, 佐野良, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 圧電PZT薄膜の多層積層のための電極成膜条件の検討, 平成28年電気学会全国大会, 3-142 (2016), 2016年3月18日, 東北大学(宮城県仙台市)

R. Sano, K. Kanda, J.I. Inoue, T. Fujita, and K. Maenaka, Sputtering Deposition of Multi-Layer Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Thin Films for Low Voltage Actuators," Tech. Dig. IEEE MEMS 2016, pp. 1173-1176 (2016), 2016年1月25日, 上海(中国)

森上慎悟, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 加工した基板上へのPb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>薄膜のスパッタ成膜と特性評価, 第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 29pm3-PS-051 (2015), 2015年10月29日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

佐野良, 井上純一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, RFマグネトロンスパッタ法によるPb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>薄膜の多層積層とその評価, 第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 28am2-A-6 (2015) 2015年10月28日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

大久保昂, 佐野良, 嶋真弥, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 【講演奨励賞受賞記念講演】樹脂材料とPb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>薄膜を用いた圧電構造体の特性評価, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 14a-1C-1 (2015), 2015年9月14日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

佐野良, 井上純一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>薄膜の多層積層によるMEMSマルチモルフ構造, 平成27年度第1回応用物理学会関西支部講演会 (2015), 2015年6月22日, イーグレ姫路(兵庫県姫路市)

大久保昂, 佐野良, 嶋真弥, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 柔軟かつロバストな Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>-MEMS アクチュエータ, 平成 27 年度第 1 回応用物理学会関西支部講演会 (2015), 2015 年 6 月 22 日, イーグレ姫路 (兵庫県姫路市)

森上慎悟, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 多自由度な MEMS を指向した Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> 薄膜の加工済みウエハへの成膜加工, 平成 27 年度第 1 回応用物理学会関西支部講演会 (2015), 2015 年 6 月 22 日, イーグレ姫路 (兵庫県姫路市)

T. Okubo, R. Sano, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka, "Integration of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Thin Films with Photo-Sensitive Polymer, Proc. IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. 2015, pp.178-181 (2015), 2015 年 5 月 25 日, Singapore (Singapore)

佐野良, 井上純一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, スパッタ積層 Pb[Zr,Ti]O<sub>3</sub> 薄膜構造の作製, 第 32 回強誘電体応用会議, 23-P-13 (2015), 2015 年 5 月 23 日, コープイン京都 (京都府京都市)

大久保昂, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, "Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> 薄膜と感光性樹脂の積層構造体作製とその評価", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-P14-12 (2015), 2015 年 3 月 13 日, 東海大学 (神奈川県平塚市)

K. Kanda, J. Inoue, T. Fujita, K. Maenaka, Estimation of  $d_{31}$  Constant for Microfabricated and Free Standing Thin-Film Bimorph Structure of Pb[Zr,Ti]O<sub>3</sub>, PiezoMEMS2014 (2014), 2014 年 10 月 27 日, 神戸大学統合研究拠点 (兵庫県神戸市)

佐野良, 井上純一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, スタンダード PZT-MEMS プロセスの提案とデバイス評価, 第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 21pm3-PS052 (2014), 2014 年 10 月 21 日, くにびきメッセ (島根県松江市)

森上慎悟, 井上純一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 三次元 Si 加工基板上への PZT 成膜と評価, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-A19-7 (2014), 2014 年 9 月 18 日, 北海道大学 (北海道札幌市)

井上純一, 松田貴文, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 薄膜 PZT-MEMS バイモルフ構造を用いた自励発振システム, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-A19-6 (2014), 2014 年 9 月 18 日, 北海道大学 (北海道札幌市)

- 21 K. Maenaka and K. Kanda, Fusion of PZT Thin Film in MEMS Technology, The 10th Japan-Korea Conference on Ferroelectrics, I-01 (2014), 2014 年 8 月 18 日, 広島国際会議場 (広島県広島市)

- 22 佐野良, 井上純一, 神田健介, 藤田孝之,

前中一介, マルチチップサービスに向けたスタンダード PZT-MEMS プロセスの提案, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会フィジカルセンサ研究会資料, PHS-14-019 (2014), 2014 年 5 月 27 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 圧電センサ

発明者: 神田健介, 前中一介

権利者: 兵庫県立大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-065610

出願年月日: 平成 28 年 3 月 29 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神田 健介 (KANDA, Kensuke)

兵庫県立大学・工学研究科・助教

研究者番号: 20446735

### (2) 研究分担者

前中 一介 (Maenaka, Kazusuke)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号: 70173721