

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17500

研究課題名(和文)超高性能圧電微小超音波レンジファインダの創製とロボット用センサシステムへの応用

研究課題名(英文)Creation of ultrahigh-performance piezoelectric micromachined ultrasonic rangefinder and its application to robot system

研究代表者

吉田 慎哉 (Yoshida, Shinya)

東北大学・工学研究科・特任准教授

研究者番号：30509691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、圧電薄膜を用いながら、低電圧(例えば3.3V以下)で数mの測距が可能な小型の超音波距離センサーを創り出し、ロボットシステムへの応用可能性を示すことである。次のような要素技術開発および実証実験を行った。(1)クラックフリーの超高性能PZT系単結晶薄膜のSi基板上への形成、(2)PZT用金属エピタキシャルバッファ層の開発、(3)圧電微小超音波トランスデューサ(pMUT)の信号雑音(SN)比を最大化するための理論の構築、(4)pMUTレンジファインダの試作と高性能測距能の実証。この結果、小型で安価なロボット用近接覚センサモジュールやソナーシステムを実現できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to create a compact-size ultrasonic rangefinder with a capability of long range finding for applications to a robot system although the device utilizes a piezoelectric thin film and is driven by low driving voltage such as <3.3 V. We developed essential technologies and performed demonstration experiments as follows. (1) Fabrication of a crack-free and ultrahigh-performance PZT-based monocrystalline thin film on Si, (2) Development of a metallic epitaxial buffer layer structure for PZT, (3) Construction of theory for maximizing a signal-to-noise ratio of piezoelectric micromachined ultrasonic transducer (pMUT), (4) Prototyping of a pMUT rangefinder based on this PZT film and demonstration of its high-performance range-finding ability.

As a result, we successfully verified that this pMUT rangefinder has the potency to realize a small and cheap proximity sensor module and/or sonar system for safety operation of a robot.

研究分野：微細加工学, MEMS, ナノ・マイクロ工学

キーワード：チタン酸ジルコン酸鉛(PZT) 超音波トランスデューサ pMUT 圧電MEMS

1. 研究開始当初の背景

これからの少子高齢化社会において、多数の民生用ロボットが家事や介護などを支援することが望まれている。このとき、ロボットは、周囲の状況を把握しながら、適切な動作をとるように制御されなければならない。それを実現するための重要な要素は、周囲の状況を正確に把握するためのセンサー群である。触覚センサー、赤外線センサー、ステレオカメラなど、複数のセンサーを組み合わせることで、人間と同じように、もしくは人間にはできないようなセンシングと状況判断を、ロボットができるようになることが期待されている。その中でも、物体や障害物との距離を把握する『距離画像センサー』は、特に重要である。これがないと、人や障害物を損傷させないように避けて行動したり、モノを掴んだりすることが難しくなる。

距離画像センサーの有力な候補の一つとして、圧電薄膜を用いた微小電気機械システム(MEMS)超音波距離センサーが、近年注目されている。MEMS技術によって送信部や受信部をアレイ化し、超音波を走査したり、受信部の位置と受信波の位相差依存性を計測するなどして、広範囲の3次元位置情報を取得することができる。また、デバイスは、MEMS技術によって安く小さく作れるので、例えば、ロボットの頭の周囲にぐるりとデバイスを設置して、360°全方位の距離イメージングなども容易にできる。

しかし、一般的な圧電多結晶薄膜を用いた超音波トランスデューサの性能は低く、数十ボルトの駆動電圧を印可しても、測定可能な距離はせいぜい1m程度の近距離にとどまっている。高電圧が必要だと、回路が複雑になり、万が一のときの危険性も大きい。したがって、ロボットの自動・自律運転のためには、低電圧駆動が可能であり、かつ数m程度までの中距離測定が望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、圧電薄膜ベースのデバイスでありながら、低電圧(例えば3.3V以下)でありながら、数m以上の測距が可能なMEMS超音波距離センサーを創り出すことである。

3. 研究の方法

目的を達成するための具体的な課題と方法を以下に記す。

- (1)高性能かつ高信頼性を有するPZT系単結晶薄膜をSi基板上へ形成する技術を確立する。
- (2)センサー感度を向上させるための低抵抗金属エピタキシャルバッファ層を探索する。
- (3)圧電微小超音波トランスデューサ(pMUT)の信号雑音(SN)比を最大化するための理論を構築する。
- (4)超音波距離センサーを試作し、その測距能を評価する。

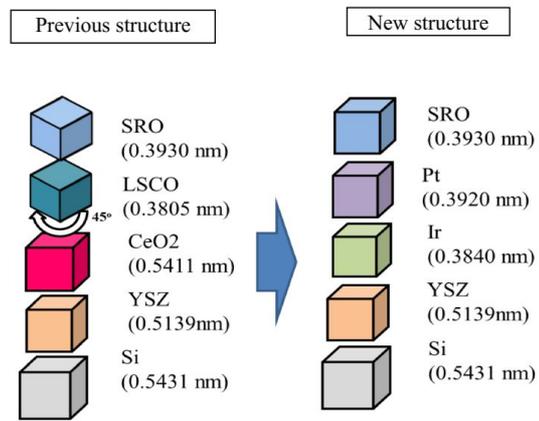


図1. 酸化物バッファ層から金属層も含むバッファ層構造への変換

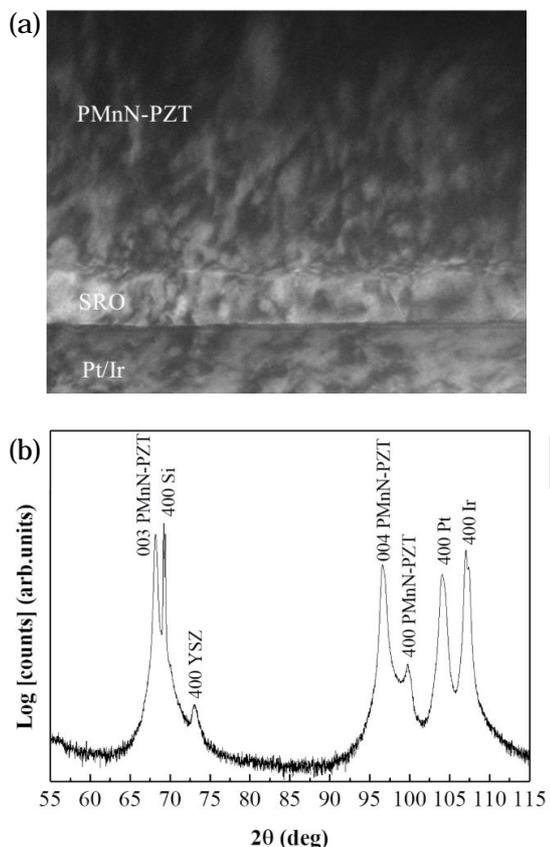


図2. 金属層も含むバッファ層構造へのc軸配向PZT系単結晶薄膜のエピタキシャル成長 (a)断面透過型電子顕微鏡像 (b)X線回折パターン

4. 研究成果

(1)クラックフリーの超高性能理想配向PZT系単結晶薄膜のSi基板上への形成

スパッタ急冷法によって形成した正方晶組成c軸配向PZT系単結晶薄膜の性能の高さは、申請者のこれまでの研究によって実証済であった。しかし、c軸配向を強制的に促進させるがゆえに、残留応力によってクラックがしばしば生じるといった問題が生じていた。そこで、成膜温度やスパッタ急冷回数

について最適化を行った。その結果、クラックの生じない単結晶薄膜を形成できる条件を見出した。その特性は、 $e_{31,f}=14.5 \text{ C/m}^2$ 、比誘電率 $\epsilon_r=250\sim 300$ であり、pMUT レンジファインダーに適した特性を持つことが実証された。

(2)PZT 用金属エピタキシャルバッファ層の探索

これまで Si 基板上に酸化物バッファ層を用いていたが、理想的には電極抵抗をより低下させることが望まれていた。そこで、(100)SrRuO3/(100)Pt/(100)Ir/(100)YSZ という、金属層も含むバッファ層構造の開発を行った(図1)。Ptの(111)方位への自律配向性が強く、酸化物バッファ層よりもプロセスウィンドウが狭かったが、成膜温度や圧力を最適化することでこれを達成した。次に、その上にPZT膜をエピタキシャル成長させ、その性能を評価した。その結果、酸化物バッファ層上と遜色のない高性能指数のPZT系単結晶薄膜の形成に成功した(図2)。

(3)pMUTの信号雑音(SN)比を最大化するための理論の構築

pMUTのSN比を最大化するためには、大きな圧電特性と小さな誘電率を両立する圧電薄膜を用いることが望ましいということは定性的に理解されてきた。しかし実際のデバイスでは、機械的熱雑音や電子回路由来の雑音が存在する。これによって、圧電材料の特性が実際にどのように、そしてどれくらいpMUTのSN比に影響を与えるかについては不明瞭であった。そこで、電流や電圧、電荷検出方式のセンサー回路における圧電材料の特性とSN比の関係について理論式を導出した。

その結果、いずれの回路においても、そして空中あるいは水中での使用においても、申請者の開発した上記PZT系単結晶薄膜は、pMUT用として最適な材料の一つであることが導き出された。具体的には、空中および水中での用途では、超音波センサのSN比は、 $(e_{31,f})^2$ 、および $(e_{31,f}/\epsilon_r)^2$ にそれぞれ比例する。すなわち、これらが性能指数である。図3に示すように、我々のPZT系単結晶膜(ここではEpi PMnN-PZTと記載)は、他の既存の圧電薄膜よりも圧倒的に大きな性能指数を有していることが示された。これは、我々の圧電薄膜は、大きな圧電性を有し、かつ誘電率が小さいという特異的性質に起因する。(図4)

(4)pMUT レンジファインダの試作と高性能測距能の実証

最後に、PZT系単結晶薄膜を用いたpMUTレンジファインダを試作した(図5)。上部電極は、ダイヤモンドを効率よく駆動させるために、内側電極と外側電極とに分離した。図6に、内側電極のみで駆動したときと、両電

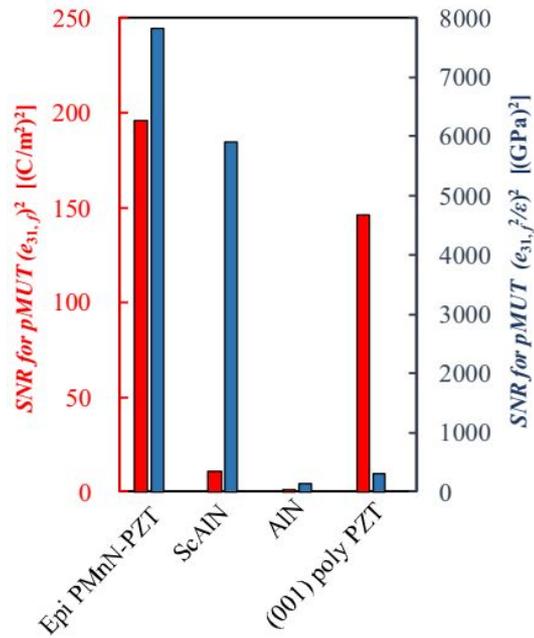


図3 .PZT系単結晶薄膜と他の圧電材料の性能指数比較

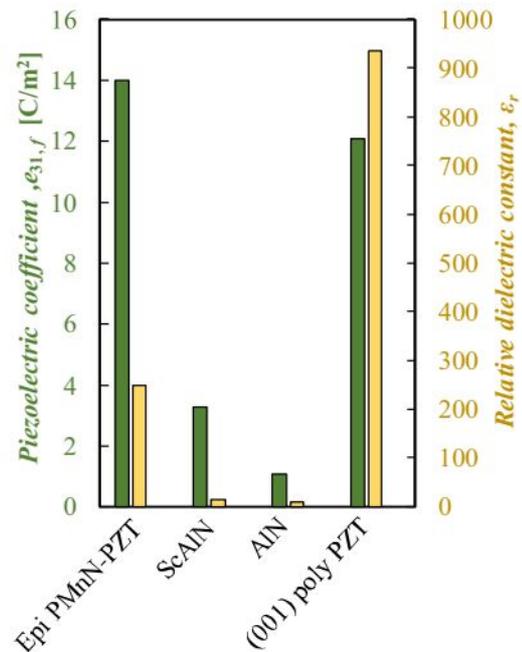


図4 .PZT系単結晶薄膜と他の圧電材料の特性比較

極を用いたときとの発生音圧の違いを評価した。その結果、両電極を用いることで発生音圧を確実に増加させられることを実証した。

次に、作製したpMUTを用いて、空中にて測距実験を行った。図7に示すように、pMUTの一つは送信部として用い、もう一方は電荷検出回路に接続して受信部として用いた。

その結果、閾値を12dBとしたとき、1Vp-pという小さな駆動電圧でも、最大測距距離

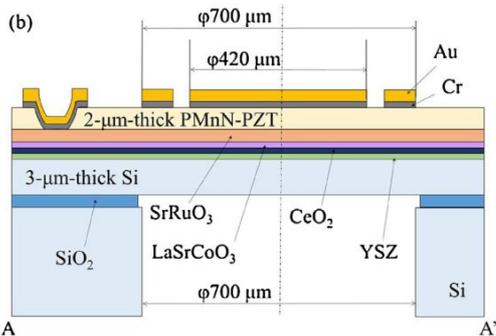
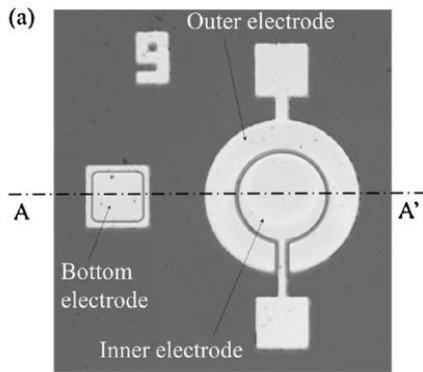


図 5 . 本研究で試作した PZT 系単結晶薄膜を有する pMUT。(a)上部観察像 (b) (a) の A-A'部の断面概略図

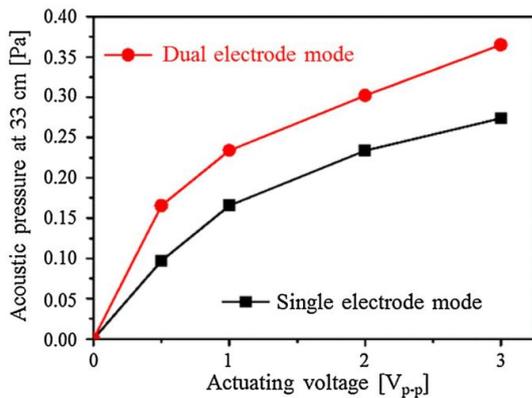


図 6 . 内側上部電極のみと両上部電極を用いた時の発生音圧の違い。

2m 以上を達成した(図 8)。このような低電圧駆動での長距離測距は、一般的な圧電膜、例えば多結晶 PZT 薄膜や AlN 系薄膜では達成は難しい。低電圧駆動が可能であるということは、デバイスを駆動するための昇圧回路や高耐圧回路を必要とせず、一般的な集積回路の出力電圧で直接駆動できることを意味する。また、AlN 系薄膜よりも 20 倍程度誘電率が大きいので寄生容量に対するロバスト性も高く、実装形態の自由度が高いことも示された。

これらの結果から、汎用 IC とデバイスが

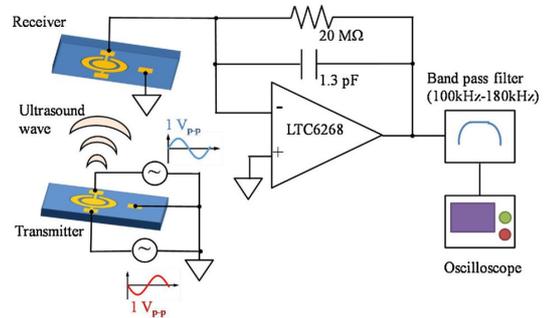


図 7 . pMUT を用いた空中測距実験

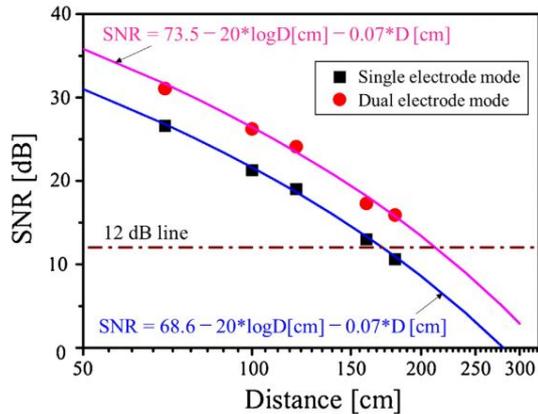


図 8 . 測距実験における距離と SN 比の関係

らなる安価なロボット用近接覚センサモジュールを実現できる可能性が示唆された。

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 3 件)

(1)Pham Ngoc Thao, Shinya Yoshida and Shuji Tanaka, "Epitaxial growth of metallic buffer layer structure and c-axis oriented PMnN-PZT thin film on Si for high performance pMUT", Japanese Journal of Applied Physics, (2017) 56, 127201. 査読有

(2) Zhen Zhou, Shinya Yoshida and Shuji Tanaka, " Epitaxial PMnN-PZT/Si MEMS Ultrasonic Rangefinder with 2 m Range at 1 V Drive", Sensors & Actuators: A. Physical, (2017) 266, 352-360 査読有

(3) Takeshi Hayasaka, Shinya Yoshida and Shuji Tanaka "Development of buffer layer structure for epitaxial growth of (100)/(001)Pb(Zr,Ti)O3-based thin film on (111)Si wafer.", Japanese Journal of Applied Physics, (2017) 56, 071501, 査読有

〔学会発表〕(計 8 件)

(1) 吉田 慎哉 "圧電 MEMS 超音波デバイスの高性能化と最新技術動向", 第 15 回圧電 MEMS 研究会, 2018 年 2 月 2 日, 大阪, 日本 (招待講演)

(2) Shinya Yoshida and Shuji Tanaka " Ultrasonic MEMS Rangefinder with 2 m Range at 1 V Drive Based on Large Figure-of-Merit PMnN-PZT Epitaxial Thin Film ", PiezoMEMS 2018 Workshop, 2018 年 01 月 15 日 ~ 2018 年 01 月 16 日 USA, オランダ

(3) Zhen Zhou, Shinya Yoshida, and Shuji Tanaka, " MONOCRYSTALLINE PMNN-PZT THIN FILM ULTRASONIC RANGEFINDER WITH 2 METER RANGE AT 1 VOLT DRIVE ", The 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2017), 2017 年 06 月 18 日 ~ 2017 年 06 月 22 日 台湾, Kaohsiung

(4) 森村拓巳, 吉田慎哉, 長谷川幸弘, 和佐清孝, 田中秀治, " スパッタ急冷法によって Si 基板上に形成した大圧電特性・高キュリー温度 PMN-PT エピタキシャル薄膜 ", 第 34 回強誘電体応用会議 (2017 年 05 月 31 日 ~ 06 月 03 日, 京都) 口頭 (一般)

(5) 吉田 慎哉, 周 朕, 田中 秀治, " エピタキシャル PMnN-PZT/Si トランスデューサを用いた高 S/N 比 pMUT レンジファインダー " [第 64 回応用物理学会春季学術講演会] (2017 年 3 月 14 ~ 17 日, 横浜) 口頭 (一般)

(6) Zhen Zhou, Shinya Yoshida, Shuji Tanaka, Deposition Temperature Dependency of Characteristics of PMnN-PZT Epitaxial Thin Film on Si Prepared by Sputter Deposition with Fast Cooling, [第 77 回応用物理学会秋季学術講演会], 2016 年 09 月 13 日 ~ 2016 年 09 月 16 日, 口頭 (一般)

(7) 吉田慎哉, 田中秀治, Si 基板上 c 軸配向 PMnN-PZT エピタキシャル急冷薄膜の面内ひずみの高温 XRD 解析, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 09 月 13 日 ~ 2016 年 09 月 16 日, 口頭 (一般)

(8) Shinya Yoshida, " Sputter Epitaxy of Large Figure-of-Merit PMnN-PZT thin film on Si for Ultrahigh-Performance Piezoelectric MEMS Sensor " , 11th Korea-Japan Conference on Ferroelectrics, 2016 年 8 月 7-10 日, Seoul, Korea(招待)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ
<https://sites.google.com/site/shinyayoshidaresearch01/>

(1) 研究代表者

吉田 慎哉 (YOSHIDA Shinya)
東北大学・大学院工学研究科・特任准教授
研究者番号 : 30509691