

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 6 月 10 日現在

機関番号：13904
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760311
 研究課題名(和文) Si基板と単結晶PZT薄膜の融合による内視鏡用超音波プローブのマイクロチップ化
 研究課題名(英文) Si integrated micro scale ultrasonic transducer using PZT thin films for an endoscope
 研究代表者
 赤井 大輔(AKAI DAISUKE)
 豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・助教
 研究者番号：50378246

研究成果の概要(和文): Si 半導体製造技術と強誘電体材料 PZT 薄膜との融合により内視鏡への搭載可能なマイクロサイズの超音波プローブの開発を行った。直径 100 μm 以下の超音波振動子およびそれを用いた超音波振動子アレイ形成する技術確立し、振動子の電気的、機械的特性を評価、医療用途で必要とされる MHz 帯での動作が可能で、水中において超音波の送信・受信ができるプローブを実現した。

研究成果の概要(英文): A micro size ultrasonic probe integrated with Si substrates and ferroelectric PZT thin films have been developed for endoscope applications. Ultrasonic transducers and their array have been successfully fabricated with 100 μm in diameter or less.

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	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：超音波，トランスデューサ，PZT，Al₂O₃，圧電，MEMS

1. 研究開始当初の背景

超音波診断は、2 次元断層像を非侵襲かつリアルタイムで取得できる医療診断技術である。近年、循環器系疾患の早期発見、治療のために内視鏡による血管内の超音波診断の需要が高まっている。

一般的な超音波プローブは圧電材料 PZT のセラミクス振動子を用いているため大型で、血管内(大動脈～3cm、動脈 1cm 以下)へ導入し観察することが難しい。超音波により形状を把握するには数十個以上の振動子を配置する必要があるため、振動子をサブ mm サイズで加工し、配線を行わなければならない。しかし、セラミクス振動子ではそのような微細加工や配線を行うことは困難なため、薄膜振動子が必要である。Si 基板上への PZT 薄膜は強誘電体メモリでは多くの報告があるが、

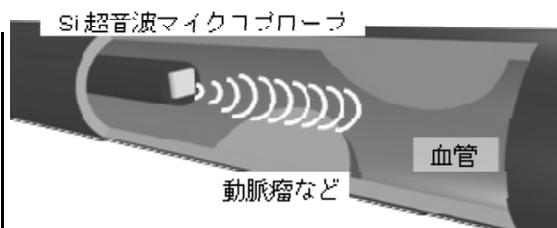


図 1 Si 超音波マイクロプローブによる血管内視鏡(イメージ)

超音波振動子応用に関する報告例は少ない。振動子のサイズ、特性も十分でない。PZT 薄膜の特性向上には結晶配向が重要だが、報告例では PZT 下地が非晶質 SiO₂ のため、配向が制御されていない。本研究では、その問題解決のため、Si 基板上に γ -Al₂O₃ 薄膜結晶を成長させ PZT の下地材料として利用する点である。 γ -Al₂O₃ はサファイア(α -Al₂O₃)の準

安定相結晶で、物理的・化学的に安定である。さらに、構成元素の Al と O は LSI プロセスの一般的な材料で地球上に豊富にあり資源枯渇の心配も無い。これまでに、研究代表者は Si 基板上的 γ - Al_2O_3 薄膜結晶成長、PZT 薄膜の配向制御を試みその特性を明らかにしてきた。その結果、Si 基板上的 PZT 薄膜で、セラミクスと同等の圧電特性が得られることを明らかにし、超音波振動子応用への見通しを得ている。本研究ではこの技術をベースとして、血管内にも導入可能な数 mm 角のエリア内にマイクロサイズの超音波振動子を数十個配置した、超小型 3 次元イメージング用超音波プローブを実現する(図 1)。

2. 研究の目的

LSI・MEMS・強誘電(圧電)薄膜プロセスとを融合することで、Si 基板上的圧電 PZT 薄膜を利用したマイクロサイズの超音波振動子の作製技術確立し、その振動子を多数アレイ状に配置した内視鏡観察に適應可能な数 mm 角の超音波プローブチップを実現する。このデバイスが実現すれば、図 1 に示すような内視鏡による血管内の超音波診断が可能となり、動脈硬化などの循環器系疾患の早期発見、治療において有用な技術となることが期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、マイクロ超音波振動子を有する超音波プローブチップの実現を目指し、(1)超音波振動子の微細加工技術および(2)薄膜振動子のインピーダンス特性解明を行う。

(1) 超音波振動子の微細加工技術

超音波振動子は電極で挟んだ PZT 薄膜に交流電圧を印加することで振動させ超音波を発信する。効率よく超音波を発信するには、

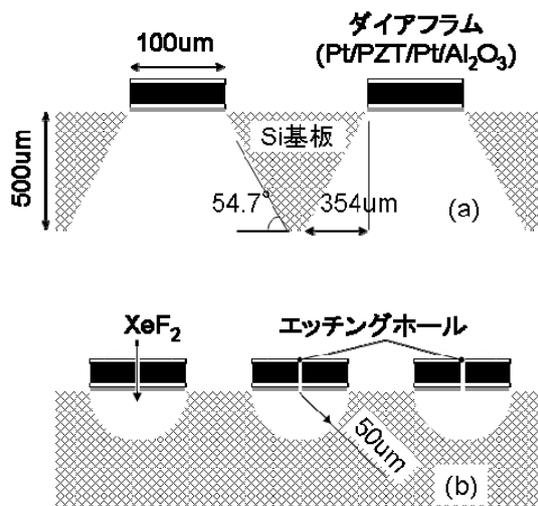


図 2 超音波振動子のダイアフラム形成方法

PZT 薄膜下部の Si が除去されたダイアフラム構造が理想である。超音波内視鏡を始め次世代の診断装置に必要なサブ mm の分解能実現には、 $100\mu\text{m}$ 以下のダイアフラムサイズおよびピッチが要求される。一般的にダイアフラム構造は Si 基板裏面からの溶液エッチングにて形成されるが、この手法では図 2(a) に示すようにエッチングに際しダイアフラムより大きな領域を確保する必要がある。そのため、 $100\mu\text{m}$ 以下のピッチで振動子を配置することができない。そこで本研究では、図 2(b) のように Si 表面より等方性エッチングを行う手法を提案する。ここでは、 XeF_2 と呼ばれる Si のみを選択的にエッチング可能なガスを用いる。

このプロセスはダイアフラム中心にガス導入口を開口するため、ダイアフラムを小さくするには開口径を小さくする必要がある。一般的な微細加工ではダイアフラムの各層毎にエッチング用マスクを準備するが、マスク合わせ精度を考慮すると、最終的な穴径に対して最上部の開口が大きくなり、ダイアフラムの有効面積が小さくなる。そこで、今回は 1 枚のマスクでエッチングホールを開口するプロセスを採用する。このプロセスはエッチングを連続して長時間行うためレジストや PZT 薄膜へのダメージが懸念される。予備実験として加工時間と PZT 薄膜の特性変化を調べ、長時間化によりダメージが生じることを確認した。原因がプラズマによる基板温度上昇にあると分かり、この温度上昇を抑えるプロセスを開発し、改善の目処を得ている。予備実験の結果を元にさらにプロセス・条件の見直し・最適化を行い、超音波振動子の微細加工技術確立する。

(2) PZT 薄膜振動子のインピーダンス特性解明

振動子の電氣的・機械的インピーダンス特性は、信号処理システム構築の上で重要である。しかし、薄膜では振動子の容量成分が大きくなるため、測定時に配線等の寄生容量の影響を受けやすく、今回作製するような、薄膜かつマイクロサイズの振動子のインピーダンス特性はこれまで明らかにされていない。AFM のカンチレバーとして導電性カンチレバーを利用し、PZT 薄膜に交流電圧を加えながら薄膜の変位/振動を計測する。また、電氣的特性の評価を行う。これは、振動子からの配線をコプレーナ線路にするなど高周波 LSI のチップデザインを応用しネットワークアナライザにより、薄膜振動子のインピーダンス特性を解明する。これにより、振動子の特性を正確にシミュレーションすることができ、周辺電子回路の設計・調整を行うことが可能となる。

4. 研究成果

(1) 超音波振動子の微細加工技術

イメージセンサ用の 8×8 素子、特性評価用単素子など、4 インチ Si ウェハ上に超音波振動子を製作した。振動子 1 個あたりのサイズは MHz 帯の超音波利用を考慮し、直径 100 μm とした。製作プロセスは、初めに、Si (111) 基板の上に MBE 法により $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ をエピタキシャル成長させた。続いて、下部電極となる SrRuO₃(SRO)/Pt 構造をスパッタにより形成した。膜厚はそれぞれ 30nm/100nm で、基板温度を制御することにより下地の配向(111)を引き継いだ膜が得られる。下部電極上に圧電材料である PZT 薄膜をゾル・ゲル法により 500nm 成膜した。用いた PZT 前駆体溶液(三菱マテリアル製)の組成は Pb:Zr:Ti=1.15:0.52:0.48 で濃度は 15wt% である。結晶化は RTA にて 650 酸素雰囲気中で 90 秒行った。上部電極として SRO を 100nm スパッタにより堆積した後、ホトリソグラフィ技術および ICP-RIE により下部電極 SRO/Pt 層までのパターニングを行った。層間絶縁膜として SiN をプラズマ CVD により成膜した後、Al 配線し 1cm 角のチップにダイシングした。ダイシング後 XeF₂ ガスにより、PZT 薄膜下部

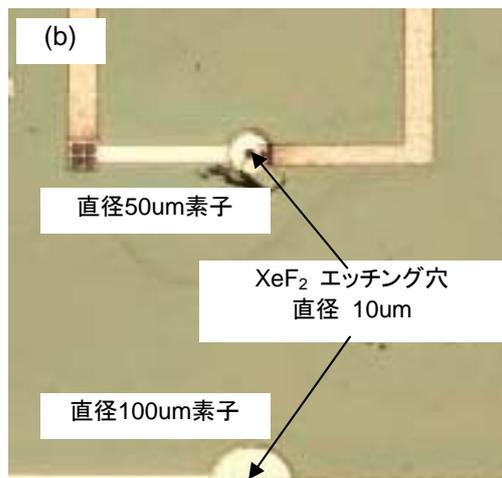
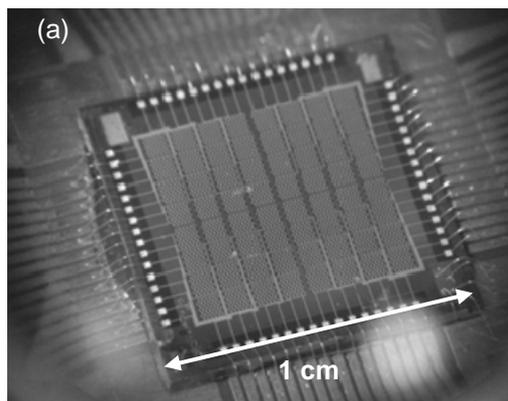


図 3 製作した超音波振動子の例: (a) 超音波イメージセンサ用 8×8 素子アレイ (b) 特性評価用超音波振動子

の Si をエッチングし、ダイアフラムを形成した。図 3 に完成したチップ写真を示す。

図 3(b) に示すように、直径 10 μm の XeF₂ エッチングホールを形成し、直径 50 μm ~ 100 μm のダイアフラムを有する超音波振動子を製作するプロセスを確立した。

(2) PZT 薄膜振動子のインピーダンス特性解明

図 3(b) の評価用振動子により、AFM による強誘電特性、圧電特性の同時測定を行った結果を図 4 に示す。振動子に用いる PZT 薄膜が強誘電特性を示していること(青線)、圧電バタフライ特性(赤線)から圧電定数 $d_{33}=65.3\text{pm/V}$ が得られた。

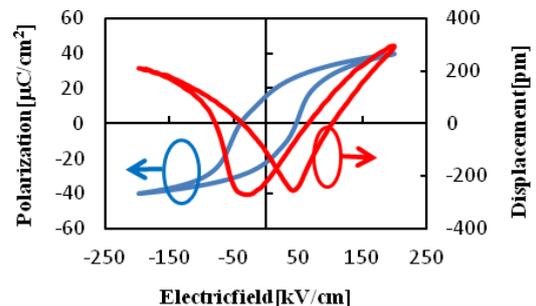


図 4 PZT 振動子の強誘電体特性および圧電特性

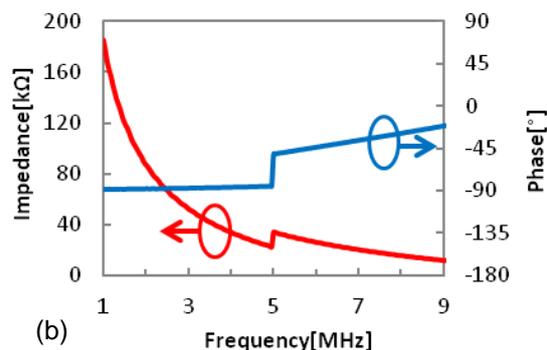
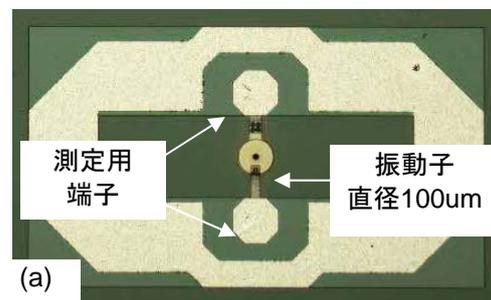


図 5 振動子の電気的特性評価: (a) 評価用振動子チップ (b) インピーダンス-周波数特性

また、超音波振動子の電気的な共振周波数は図 5(a) の評価用素子を用いて測定した。こ

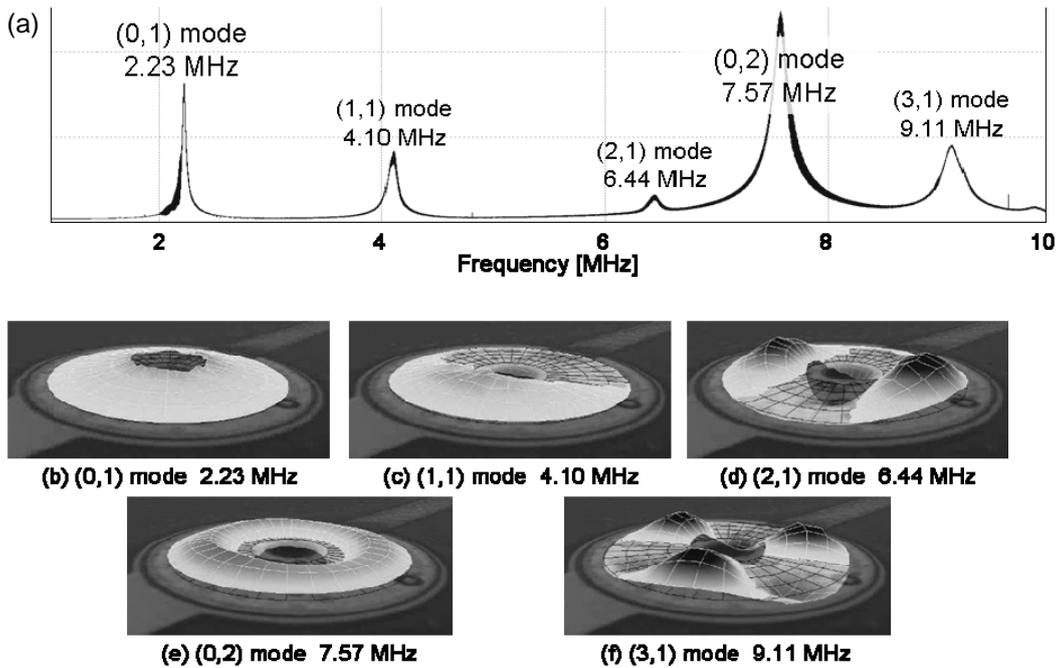


図6 超音波振動子の機械的振動解析結果：(a) 周波数応答 (b)-(f) 各共振周波数における振動子の振幅の様子

の素子は、配線を極力短くし寄生容量の影響を減らし振動子自体のインピーダンス特性を正確に計測できるようにしている。インピーダンスアナライザを用いてインピーダンス-周波数特性を測定した結果、図5(b)に示すとおり、共振周波数が5MHzに存在することが分かった。

製作した超音波振動子の機械的振動特性を大気中でレーザードップラー振動計(LDV)により評価した。図6(a)に振動子の共振周波数特性、図6(b)-(f)に各々の共振周波数における振動の様子を示す。1MHzから10MHzまでの周波数範囲で5つの共振周波数が確認できた。それぞれの周波数における振動は図6(b)-(f)のようになっており、超音波振動子として最適な振動モードは(b)の(0,1)モードであると考えられる。

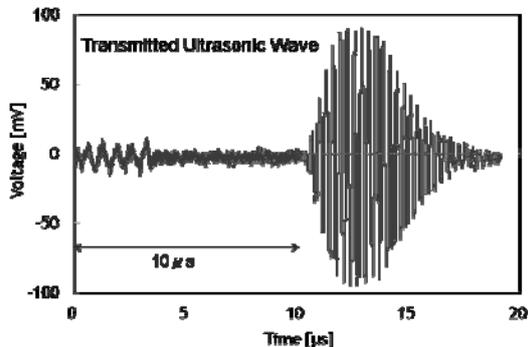


図7 製作した振動子により送信した超音波波形(水中にて測定)

この結果を元に、生体を模して水中での超音波送信実験を行った。送信用振動子と受信

用振動子を1.5cmの距離を置いて正対するように設置し正弦波5サイクルのバースト電圧を送信用振動子に印可した。受信用振動子からの波形をオシロスコープにより観察した結果を図7に示す。送信用振動子に電圧を印可してから10ms後に受信用振動子に波形が現れていることが確認できた。水中での音速が1500m/sであることから、10msで超音波が伝搬する距離は1.5cmとなり、この波形が送信用振動子からの超音波であることが示唆される。

本研究では、Si-LSI半導体製造技術と強誘電体材料PZT薄膜との融合による内視鏡への搭載可能なマイクロサイズの超音波プローブの開発を行った。まず、直径100μm以下の超音波振動子およびそれを用いた超音波振動子アレイ形成する技術を確立した。製作した振動子の電氣的、機械的特性を評価し、医療用途で必要とされるMHz帯での動作が可能であることを確認した。最後に、血液や体内を模し水中において、製作したマイクロサイズの超音波プローブにより超音波の送信および受信を行い、1.5cm程度の距離で送信・受信が可能であることが確認できた。これらの結果より、内視鏡にむけた超音波プローブのマイクロチップ化が可能になった。

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1件)

1. Daisuke Akai, Katsuya Ozaki,

Yasuyuki Numata, Keisuke Suzuki, Nagaya Okada, and Makoto Ishida, "Vibration Analysis and Transmission Characteristics of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers Using Epitaxial Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films on γ -Al₂O₃/Si Substrate", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51 (2012) 11PA04 (4 pages). 査読有

〔学会発表〕(計6件)

1. 西村将人、鈴木啓佑、尾崎勝弥、赤井大輔、石田 誠、岡田長也, "PZT 薄膜を用いた超音波トランスデューサでの二次元音圧マッピングと受信感度測定", 第 29 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, pp.633-636, 2012 年 10 月 23 日, 北九州国際会議場・西日本総合展示場(福岡県北九州市).
2. 鈴木啓佑, 尾崎勝弥, 赤井大輔, 石田 誠, " γ -Al₂O₃/Si 基板上的エピタキシャル PZT 薄膜を用いた超音波トランスデューサの作製と評価", 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会, M2-7, 2012 年 9 月 24 日, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市).
3. 尾崎勝弥、西村将人、鈴木啓佑、沼田泰幸、岡田長也、赤井大輔、石田 誠, " γ -Al₂O₃/Si 基板上的エピタキシャル PZT 薄膜を用いた超音波トランスデューサレイの作製と送受信特性", 信学技報, vol. 112, no. 32, ED2012-23, pp. 29-33, 2012 年 5 月 17 日, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市).
4. Katsuya Ozaki, Keisuke Suzuki, Yasuyuki Numata, Nagaya Okada, Daisuke Akai, and Makoto Ishida, "High Density Piezoelectric Micro-machined Ultrasonic Transducers Array Using Epitaxial PZT Thin Film on γ -Al₂O₃/Si Substrate", 2012 MRS Spring Meeting & Exhibit, B9.4, 13 April 2012, San Francisco, CA, USA.

5. 沼田泰幸, 鈴木啓佑, 尾崎勝弥, 岡田長也, 赤井大輔, 石田 誠, "Si 基板上 PZT 薄膜を用いた超音波トランスデューサレイの送信特性", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16-a-E3, 2012 年 3 月 16 日, 早稲田大学(東京)
6. 赤井大輔, 與木隆弘, 沼田泰幸, 尾崎勝弥, 岡田長也, 樋口一樹, 石田 誠, "エピタキシャル PZT/SrRuO₃/Pt/ γ -Al₂O₃/Si 基板上への 2D 超音波センサレイの製作とイメージング", 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, pp.595-598, 2011 年 9 月 26 日, タワーホール船堀(東京).

〔図書〕(計0件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

なし

取得状況(計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.vbl.tut.ac.jp/akai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤井 大輔 (AKAI DAISUKE)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・助教

研究者番号: 50378246

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし