

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18050

研究課題名(和文) 圧電薄膜駆動型マイクロ超音波振動子アレイの開発

研究課題名(英文) Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array using epitaxial PZT thin films on Si substrates

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

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)：本研究では、圧電薄膜型小型超音波トランスデューサアレイを実現し超音波ビームの形成を目指した。エピタキシャルPZT/SrRuO₃(SRO)/Pt/-Al₂O₃/Si構造を用いたアニュラーアレイを設計・製作し有限要素解析結果との比較検討を行った。同心円(を模した六角形)状に形成したpMUTアレイを同時駆動することで、超音波ビームが形成され駆動する素子数に応じた送信音圧の向上および指向性が発生することが確認できた。これらの実測結果は、有限要素解析とのよい一致を見せ、pMUTアレイの設計が解析をベースに行えることもわかった。今後の小型pMUTアレイによる送受信素子の実現への展望を得た。

研究成果の概要(英文)：We have proposed piezoelectric micromachined ultrasonic transducers (pMUTs) annular array using -Al₂O₃ thin films as an epitaxial buffer layer on Si substrates for obtaining epitaxial Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) thin films. Ultrasonic pressure and -6dB beamwidth at 5 mm of the 4 channel pMUT annular array were exhibited 10 times larger and sharper than the single pMUT. These experimental results good agree with analysis results. It will be applied to design miniature 2-D pMUTs array ultrasonic probe.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：超音波トランスデューサ pMUTアレイ 超音波ビーム 圧電薄膜

1. 研究開始当初の背景

超音波診断装置(エコー)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握り拳程度の大きさがある。超音波により物体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。血管内(大動脈~3cm、動脈 1cm 以下)へ導入するには振動子をサブ mm サイズで加工し、配線を行わなければならない。しかし、セラミクスでは微細加工や多数振動子への配線を行うことは困難であり、新たな手法による小型振動子の実現が必要となる。

近年、Si-LSI の微細加工技術による小型振動子が提案されており、中でも圧電薄膜材料(PZT 薄膜)を用いた圧電駆動型は低電圧駆動が期待でき生体内での利用可能性がある。しかしながら、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、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、報告例では下地が非晶質 SiO₂ のため、配向が制御されていない。

これまで、研究代表者は Si 基板上の γ -Al₂O₃ 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 基板上の 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。 γ -Al₂O₃ はサファイア(α -Al₂O₃)の準安定相結晶で、物理的・化学的に安定であり、構成元素の Al と O は LSI プロセスの一般的材料で地球上に豊富にあり資源枯渇の心配も無い。また、科研費若手 B(23760311)において、上述のコンセプトにより 3次元イメージングに向けた超小型超音波センサアレイを実現した。一方で、限られた数の超音波振動子を用いてより広範囲をプロービングするには超音波ビームの指向性制御技術が重要となる。素子サイズが大きく、十分な出力が得られるセラミクス振動子においては印加電圧の位相制御、レイアウト、音響レンズなど様々な手法で指向性制御が行われている。しかしながら、本提案のような超小型な振動子アレイにおいては指向性制御が試みられた例は無い。本研究では、振動子レイアウトおよび印加信号制御により、血管内など狭小な領域において必要最小限のアレイで 3次元イメージングを実現するための超音波ビーム指向性制御技術を開発する。

2. 研究の目的

本提案では、微細加工に適した LSI 用 Si 基板上に γ -Al₂O₃ 薄膜結晶をバッファ層として用いた圧電材料である PZT 薄膜による超小型超音波 3次元イメージング用プローブチップによる超音波指向性制御を実現する(図 1)。本研究で作製する内視鏡にも装着可能で 3次元形状を計測できる超小型の超音波プローブは、数 mm 角以下のチップ内に、超音波振動子を数十個以上配置する必要がある。また、通常の超音波診断装置の空間分解能が mm 程度に対し、内視鏡で利用するには数十~数百 μ m の分解能が必要で、振動子の動作周波数としては数十 MHz が要求される。このサイズと周波数帯域実現のためには、圧電材料である PZT を薄膜化し、個々の振動子のサイズを 100 μ m 角以下にする必要がある。研究代表者はこれまで、マイクロサイズ(直径 100 μ m)の超音波振動子を 1cm 角チップ内に約 2,500 個と高密度でアレイ状に配置することに成功し、本チップによる超音波の送信および受信が可能であることを実証してきた(科研費若手 B: 23760311)。本研究課題では、マイクロサイズ超音波振動子による指向性超音波ビームの実現により、アレイ中の振動子の数を減らしチップサイズを内視鏡先端に装着可能なサイズ(目標値: 5mm 角)への縮小を目指す。

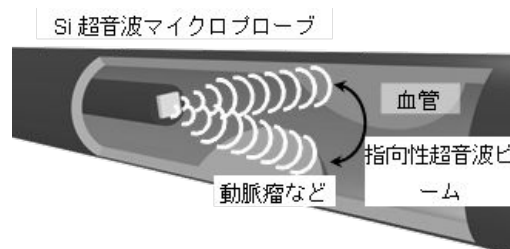


図 1 血管内超音波診断(イメージ)

3. 研究の方法

内視鏡など狭小領域での超音波診断・観察に用いる超音波プローブへの応用を目指し、Si 基板上の圧電 PZT 薄膜を利用したマイクロサイズの超音波振動子アレイによる超音波ビームの指向性制御を実現する。振動子アレイの設計・解析・試作のサイクルにより、必要最小限の振動子によるアレイ構成を得る。

(1) シミュレーションによる検討と実チップへの展開

一般に超音波ビームはアレイ中の各々の振動子から放射される超音波の位相差による強め合い・弱め合い(干渉)により形成される。

すなわち、振動子を点音源と仮定すると、振動子の配置とそのピッチを変更することによりビーム形成が可能となる。本研究の振動子はマイクロサイズとなるため、出力が小さい。そこで、解析の精度を向上させるため単純な音源を用いるだけの解析で無く、振動子の振動モードを考慮したモデルを準備し、振動により放射される超音波の伝搬を考慮したシミュレーションを行う。有限要素解析ソフトとして ANSYS の音響解析モジュールを利用する。事前検討として一次元に配列したアレイ(リニアアレイ)音源によりビーム形成される様子を解析し素子数を変化させることで、ビーム形状が変化することが確認できている。その結果は振動子を理想的な音源として扱っているため、実デバイスと比較し美しいビームが形成されていると考えられる。研究期間中には様々な 2 次元アレイによるビーム形成状況を解析し、いくつかのパターンについて実際に製作し評価し、解析結果との比較を進めながら配置の改善を行う。

(2) 実チップ製作とビーム形状の評価
 チップ製作に関してはすでにプロセスを確立している。現在、2 次元アレイ評価用チップのレイアウトの設計を始めている。図 4 は設計中チップの一つで、同心円状に振動子を配置したアニュラーアレイとなっている。同心円状に配置することで、超音波ビーム中心軸のアライメントが容易となり、解析結果との比較検討が行いやすい。実測評価は水中で行うが、非常に狭い領域でビームが形成されることが予想される。そのため製作したチップおよび受信評価用振動子の精密(サブ mm)な位置合わせが必要となる。この位置合わせ・制御システムを構築し測定結果とシミュレーション結果とを比較することで、超音波ビーム形成に適した振動子配置レイアウトを得る。

4. 研究成果

(1)シミュレーションによるアレイ振動子の超音波ビーム形成検討

図 2 にチップレイアウトを示す。多重(入れ子)に描いた六角形の辺に沿って圧電型マイクロ超音波振動子 (piezoelectric micro-machined ultrasonic transducer、以下 pMUT) を配置し擬似的な同心円状(アニュラー)アレイを構成した。各周(チャンネルと呼ぶ)の pMUT 素子数は表 1 のようになっており、各チャンネルごとに pMUT の上部電極が共通化されチャンネル内の素子は並列に接続されている。下部電極はチップで共通である。pMUT1 素子は図 3 に示す断面構造となっており、ダ

イアフラムの直径は $100\mu\text{m}$ とし共振周波数は約 2MHz となるようにした。駆動するチャンネルは上部電極パッドの接続により選択する。同時駆動するチャンネルを変化させたときの、送信音圧および音圧分布を有限要素解析法によるシミュレーション結果の一部を図 4 に示す。アレイ中心から正面(図の上方向)に向かって超音波が放射されている様子が見られる。また、同時駆動するチャンネルを増加させることで、超音波音圧分布形状が変化していることも確認できた。

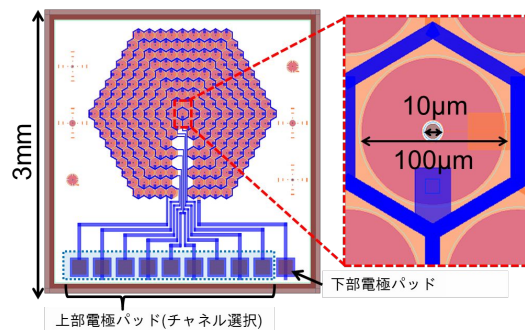


図 2 チップレイアウト
(左：全体、右：1 素子)

表 1 各チャンネルの素子数

チャンネル	1	2	3	4	5	6	7	8	9
素子数	1	6	11	16	23	28	35	40	47

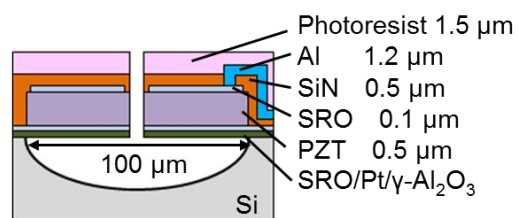
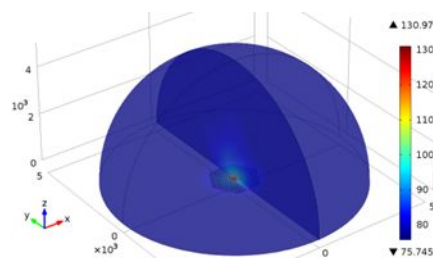
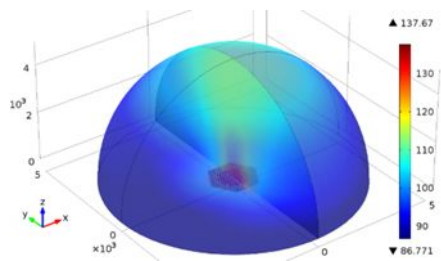


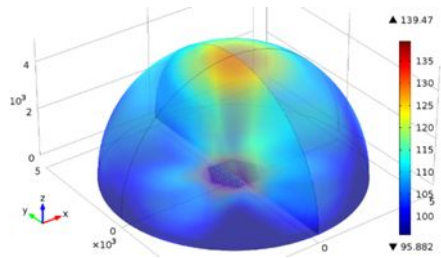
図 3 1 素子の断面図



(a) 1 素子(チャンネル 1 のみ駆動)



(b) 57 素子(チャンネル 1~5 を同時駆動)



(c) 207 素子(チャンネル 1~9 を同時駆動)
図 4 音圧分布のシミュレーション結果例

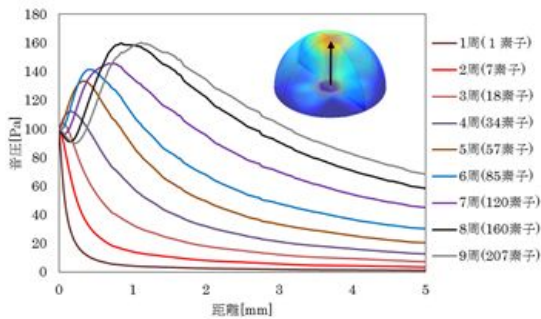


図 5 距離と音圧との関係
(シミュレーション結果)

シミュレーション結果よりアレイ正面における距離と音圧との関係をまとめたものを図5に示す。同時駆動するチャンネル数を増加させることで最大音圧が得られる距離が変化していることから、超音波ビームが形成されていることが確認できる。8チャンネル以上同時駆動することで、アレイ前方約1.5mmの地点にフォーカスした超音波を送信可能であることを示す結果が得られた。以上の結果より、この設計で作製したチップにより超音波ビーム形成等の検証が可能となることがわかった。

(2)実チップにおけるビーム形状評価

学内 LSI 工場の設備を用いて、前項で設計した pMUT アレイを製作した。製作プロセス等はこれまでに報告したものと同様である

ので省略する。完成したアレイの写真を図6に示す。4インチ Si ウェハ上に設計通りに製作できていることがわかる。

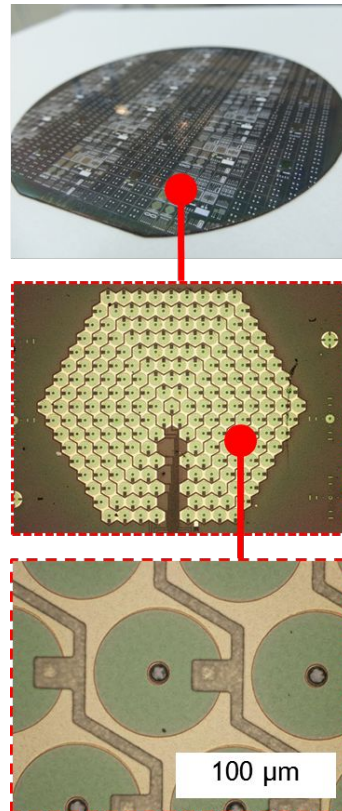


図 6 作製した pMUT アレイの写真
(上:完成 Si ウェハ、中:pMUT アレイ全体図、
下:pMUT 素子の拡大図)

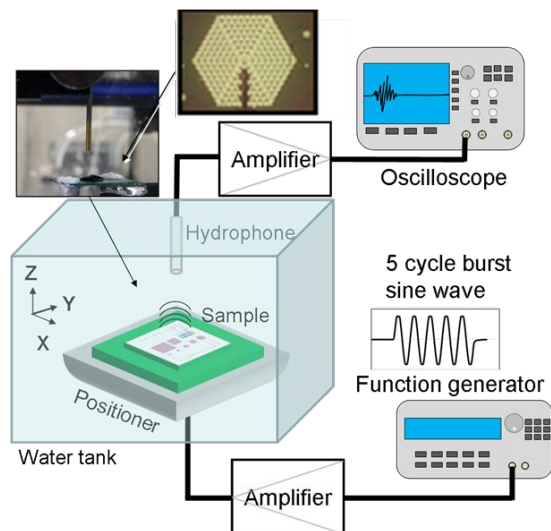


図 7 pMUT アレイ評価システム

pMUT アレイ評価にあたり図7の模式図で示すようなシステムを構築した。測定はすべて水中(水槽内)にて行えるようになっており、pMUT アレイはX-Y軸に操作可能なステージに固定される。pMUT アレイへの駆動電圧はファンクションジェネレータに発生させた信号をアンプで増幅し印加する。pMUT アレイから

送信された超音波は対向して設置したマイクロフォンにより受信し、アンプを介しオシロスコープにより観察する。

図8は本システムにより距離-超音波音圧特性を測定した結果から、pMUTアレイからの距離10mmにおいてシミュレーション結果との比較をしたものである。実測においても駆動したpMUT数(同時駆動チャンネル数)の増加にともない、音圧の増加がみられた。増加の傾向としては、シミュレーションでは素子数に対してほぼ線形に上昇していたのに対し、実測値では少素子数での上昇量が大きい。素子数が多いところで上昇量が飽和する傾向が見られた。実測では、シミュレーションでは考慮されていなかったpMUTアレイのチップ(基板)自体の振動が加味され少ない素子でも大きな振動(音圧)発生に繋がったと考えられる。

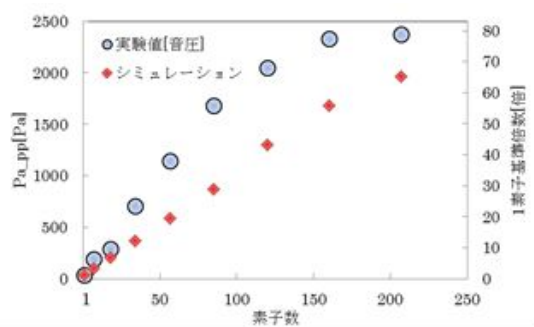


図8 距離10mmにおける同時駆動素子数と音圧との関係(実測とシミュレーション)

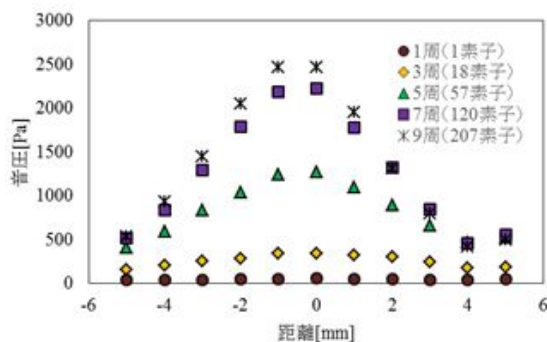


図9 距離10mmにおける同時駆動素子数と音圧分布(実測)

同システムを利用した、距離10mmにおける音圧分布の実測例を図9に示す。同時駆動チャンネル数を3以上にすることで、中央付近の音圧が大きくなっており超音波ビームが形成、フォーカスされていることが確認できた。これらの結果より、同心円状に配置したpMUTアレイの駆動チャンネルを制御することにより超音波ビームを形成し、フォーカス位置を制御することが可能となることがわかった。

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 2件)

1. Daisuke Takashima, Katsuya Ozaki, Masato Nishimura, Nagaya Okada, Daisuke Akai, and Makoto Ishida, "Vibration Analysis and Evaluation of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers Using Epitaxial Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Film", Sensors and Materials, Vol. 27 (2015) pp. 1-10. (査読有)

2. Daisuke Akai, Takeo Katori, Daisuke Takashima and Makoto Ishida, "Sensitivity and resonance frequency with changing the diaphragm diameter of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers", AIP Conf. Proc., Vol. 1709(2016) 020010 (6 pages). (査読有)

〔学会発表〕(計 3件)

1. Daisuke Akai, Takeo Katori, Daisuke Takashima and Makoto Ishida, "Sensitivity and resonance frequency with changing the diaphragm diameter of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers", THE IRAGO CONFERENCE 2015, P50, 22 October 2015, Tahra, Aichi, JAPAN.

2. Daisuke Akai, Makoto Ishida, Daisuke Takashima, "UNDERWATER OBSERVATION OF VIBRATION BEHAVIOR OF THE MINIATURE CIRCULAR PIEZOELECTRIC MICROMACHINED ULTRASONIC TRANSDUCERS", IEEE Sensors 2015, 1673-1676, 4 November 2015, Busan, South Korea.

3. Daisuke Akai, Hongqu Yu, Takeo Katori and Makoto Ishida, "Structural Investigation of Piezoelectric Layer and Electrode Layer for Circular Piezoelectric Ultrasonic Transducers", APCOT 2016, T.22, 28 June 2016, Kanazawa JAPAN.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

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

(4)研究協力者
なし