

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 9 月 7 日現在

機関番号：32717

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21460

研究課題名(和文) 高分解能化を目指した超高周波超音波プローブの開発

研究課題名(英文) Development of ultra-high frequency ultrasonic probe for high resolution ultrasound imaging

研究代表者

石河 睦生 (Ishikawa, Mutsuo)

桐蔭横浜大学・医用工学部・講師(移行)

研究者番号：90451864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：医療用超音波診断技術において、空間分解能の向上のために広帯域かつS/N比が高い高感度な超音波の送受信が求められている。例えば、超音波顕微鏡において周波数 1 GHzの超音波 1波を用いた場合の解像度は、1 ミクロン程度になる。プローブの設計上、その特性により波長が1波程度に抑えることは困難であるが、1波めの周波数が1GHz程度になれば、これは細胞レベルまでも観察可能な解像度となる。本研究では優れた圧電性結晶膜であるPbTiO<sub>3</sub>とKNbO<sub>3</sub>を積層させた薄膜を用いることにより、高感度で広帯域な超音波トランスデューサ材料の開発を行い、その周波数特性と水中での超音波送受信の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The resolution of ultrasonic imaging depends on a shortness of a wave length of the ultrasonic transmitting and receiving(T-R). And then frequency characteristics of the ultrasonic T-R depend on thickness of ultrasonic transducer materials. It is necessary to keep thin piezoelectric materials with superior piezo-electricity. Therefore, we have developed high frequency ultrasonic transducer with piezoelectric films for high resolution ultrasonic imaging. In the present study, high quality layer of an epitaxial thin KNbO<sub>3</sub> films and thin PbTiO<sub>3</sub> films. And then, a prototype ultrasonic probe the electrodes of ultrasonic transducer were fabricated using the sputtering method and inkjet technology. And so a prototype ultra-high ultrasonic probe was fabricated using the piezoelectric layer films. Moreover the characteristics of ultrasonic S/N ratio of T-R and frequency characteristics of the fabricated ultrasonic transducer were measured.

研究分野：超音波 圧電材料

キーワード：高周波超音波 圧電体 超音波トランスデューサ 超音波プローブ 圧電薄膜

1. 研究開始当初の背景

超小型で高分解能かつ超音波ビームフォーミングが実現可能な超音波プローブの開発を行う。アレイ化された圧電結晶を用いて超音波の送受信を行う場合、圧電結晶の超音波送受信感度が最も重要になるが、高感度な状態を維持するために、音響レンズにシングルプローブを配列させるシングルプローブアレイを提案する。また、40MHz~400MHzの周波数帯において超音波送受信と、3Dイメージングに向けた音場の評価を行うものである。

2. 研究の目的

超音波トランスデューサ材料である圧電体の薄化に挑戦し、400MHz付近まで高周波化を進め、帯域幅は120%以上を目指す。また、通常、圧電結晶膜のアレイ化にはパターンニング技術の適用が考えられるが、しかし現状では、高周波化に伴い超音波送受信の感度が著しく低下することが予想される。そこで、微細加工技術を利用した超小型のシングルプローブを作製し、更にはそれらを配列させる方法を提案することを目的とした。

そこで、水熱合成法、スパッタリング法を用いて、圧電結晶であるPb(ZrTi)O<sub>3</sub>系、KNbO<sub>3</sub>系、BiFeO<sub>3</sub>系の薄膜をS基板上に製膜し、得られた膜の構造的な評価、電気的特性の測定、電気機械エネルギー変換の特性評価を行う。これは、結晶の製膜温度240°という低温下において結晶膜の配向制御を行い15μmの膜厚のエピタキシャル膜を用い、高品質な結晶の密度だけを下げることによって音響インピーダンスの低減下し、それを高周波超音波トランスデューサ材料に用いることが可能であるかを確認することを目的とした。また、得られた圧電薄膜のデバイス応用として、インピーダンスアナライザおよび hidroフォンを用いて特性評価を行った。

また、駆動周波数を高周波化し、なおかつ圧電結晶薄膜をアレイ化した場合は、実用上十分な感度を有するほどの性能を維持することは不可能であったが、本手法とパターンニング技術を応用し、『配向制御された高性能圧電薄膜』のアレイ化を試みた

3. 研究の方法

研究の流れとしては、超音波プローブの試作、アレイ化、超音波送受信の評価、超音波イメージングの4つに分かれる。プローブの試作では、圧電結晶膜の製膜、圧電結晶膜の音響インピーダンスの制御、バックキング層の形成、電極形成を行った。アレイ化は、マトリクスアレイ化の検討を行った。周波数特性および音場の評価は、高周波に対応可能なセットアップを用意し、水中にて行った。超音波送受信波形が得られる都度、超音波イメージングによるサン

ル観察にて、超音波プローブとしての評価を行った。

4. 研究成果

KNbO<sub>3</sub>を2回製膜した後に、PbTiO<sub>3</sub>を3回製膜することで積層化させた。その後、製膜された圧電性結晶膜Nb-SrTiO<sub>3</sub>基板を分離させた。積層化させた圧電性結晶膜表面の電子顕微鏡(SEM)画像をFig.1に示す。

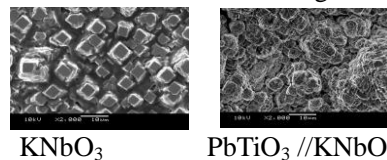


Fig.1 SEM images for surface of piezoelectric KNbO<sub>3</sub> and PbTiO<sub>3</sub>//KNbO<sub>3</sub> films

試作した治具を用いてPbTiO<sub>3</sub>単結晶膜の共振-反共振周波数をスペクトラムアナライザ及びインピーダンスアナライザを用いて測定を行った。測定結果をFig.2に示す。測定用に用意した2μmのPbTiO<sub>3</sub>単結晶膜は共振周波数が950MHzであることが分かった。また比誘電率は約2000(1kHz)であることが分かった。現在までに実験的に求められている本研究による圧電結晶膜の音速と共振周波数の関係から、今回試作した超高周波用の共振周波数は約1GHzと予測され、実験値と計算値は一致する結果となった。また、比誘電率は文献値に近い値となり、本研究で試作した治具および制御回路は、圧電単結晶膜の共振-反共振周波数および比誘電率の測定が可能であることが分かった。



Fig.2 Measured admittance for epitaxial PbTiO<sub>3</sub> thin films

PbTiO<sub>3</sub>//KNbO<sub>3</sub>膜を基板から剥離させた後、PbTiO<sub>3</sub>(背面)には主成分がAgの導電性樹脂を塗布、KNbO<sub>3</sub>(前面)には低真空蒸着法によりAuを製膜し、それぞれは電極線を介してSMAコネクタに接続した。Auの前面には凹面加工した音響レンズを接着させ超音波プローブの試作を行った。回路の設計はFig.3に示す等価回路を基に行った。

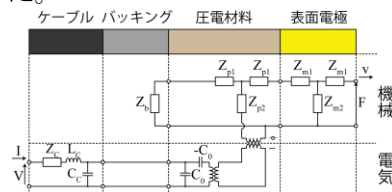


Fig.3 Mason's equivalent circuit for ultrasonic probe.

試作した超音波プローブを Fig.4 に示す。高周波化は実現できているが、実験セットアップの限界により超音波送受信は MHz 帯にて行った。

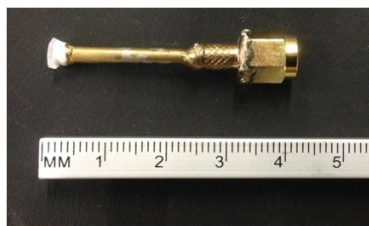


Fig.4 Photograph of prototype ultrasonic probe with with acoustic lens on electrode -  $\text{KNbO}_3$  thick films.

水中において超音波プローブの超音波送受信実験を行った。パルサーレーザを用いて電圧を印加し、ガラスで反射した超音波を受信し、その受信信号をプリアンプで増幅し、オシロスコープで表示した。受信した超音波の第一波の拡大波形を Fig.5 に示す。この波形を高速フーリエ変換し周波数特性を求めたところ比帯域幅は 120% 以上となり、時間波形はパルス幅が短いものであることが分かった。

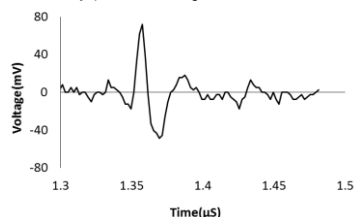


Fig.5 Received waveform with prototype ultrasonic probe.

試作した超音波プローブを機械走査式の超音波顕微鏡に搭載し、画像化が行えるかを確認した。結果を Fig.6 に示す。観察面はコインの表面であるが、条件により S/N 比に問題なくリアルタイムに近い形で高周波超音波イメージングが可能であることが示された。

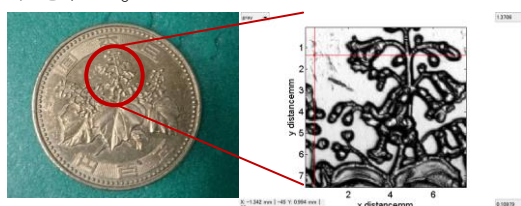


Fig. 6 Ultrasonic imaging of surface of coin with prototype ultrasonic probe.

次に、圧電単結晶膜のアレイ化の方法として、インクジェットプリンティング技術により電極配線をマトリクス状に施し、チャンネル毎の超音波送受信特性について評価を行った。試作した 3 ライン×3 ラインで 9 チャンネルのマトリクスアレイトランスデューサを Fig.7 に示す。

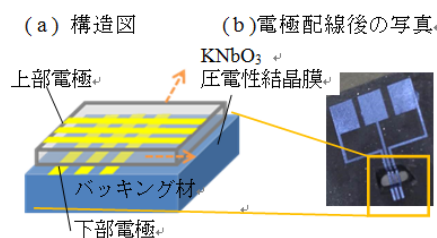


Fig.7 Schematic diagram of the prototype matrix array ultrasonic transducer.

試作したマトリクスアレイ超音波トランスデューサを用いて水中における超音波送受信実験を行ったところ、全チャンネルで超音波の送受信が確認された。広帯域化については検討せずに行った実験であるが、送受信時の中心周波数は Fig.8 に示すような 50MHz 付近となった。これは本研究においての実験の限界値であり、これ以上の高周波化は、セットアップによっては充分に可能であると予想される。

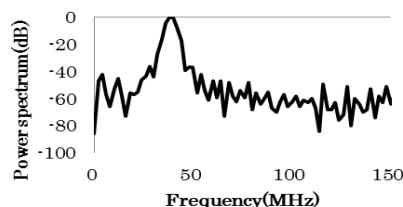


Fig.8 Power spectrum of obtained time waveform.

本実験で示した手法を全て用いることで、高周波アレイ超音波プローブの実現が可能であることが示された。

## 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 1 件)

1) M. Ishikawa, Y. Uchid, N. Kosuge, H. Funakubo, M. Kurosawa, Ultrasonics Symposium (IUS), 2015 IEEE International. (2015)  
10.1109/ULTSYM.2015.0369.

[学会発表] (計 4 件)

1) Mutsuo Ishikawa, Yosuke Uchida, Marie Tabaru, Minoru Kuribayashi Kurosawa, Nobuyuki Kosuge, Hideto Sugiyama. High frequency and high intensity ultrasonic transducers for medical applications using oriented piezoelectric thick films by hydrothermal method, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, The Journal of the Acoustical

Society of America, Vol. 140, No. 4, p. 3374, Nov. 2016.

2) Tomoyuki Tobe, Juri Miyama, Ayaho Tsukamoto, Ishikawa Mutsuo, Marie Tabaru. Deposition of Piezoelectric KNbO<sub>3</sub>/PbTiO<sub>3</sub> Films for High Frequency Ultrasonic Transducers, The 11th TOIN International Symposium on Biomedical Engineering, TOIN BME Symposium ABSTRACT BOOK, p. 138-139, Oct. 2016.

3) 深山 樹里, 亀山 大輔, 田原 麻梨江, 石河 睦生, VHF 帯超音波トランスデューサ用エピタキシャル PbTiO<sub>3</sub>/KNbO<sub>3</sub> 結晶膜の製膜と評価, 日本音響学会春季研究発表会 1-Q-11, 2016

4) 戸邊 智之, 深山 樹里, 田原 麻梨江, 石河 睦生エピタキシャル PbTiO<sub>3</sub> 膜の製膜と圧電性評価, 日本音響学会春季研究発表会 1-Q-11, 2016

〔図書〕(計 1 件)

分担(超音波トランスデューサの等価回路について)、音響キーワードブック、音響学会編 コロナ社 (2016)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織 桐蔭横浜大学医用工学部

(1) 研究代表者 石河睦生

( Mutsuo ISHIKAWA )

研究者番号: 90451864

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: