様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月　 １ 日現在

機関番号：１１５０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：１９Ｋ０４４２２

研究課題名（和文）音響整合層を付加した高感度圧電高分子トランスデューサの開発とその応用

研究課題名（英文）Development and application of high-sensitivity piezoelectric polymer transducers with acoustic matching layer

研究代表者

高橋　貞幸（Takahashi, Sadayuki）

山形大学・学内共同利用施設等・技術員

研究者番号：１０３９６５５９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,300,000円

研究成果の概要（和文）：　従来までは、超音波を効率よく空気中に照射するために、圧電高分子材料であるP(VDF/TrFE)材料を用いて、空中用超音波トランスデューサの開発を行っていた。更に効率向上を目指すために、音響整合層に着目した。その結果、ポリマー系のポリエステルフィルムが有効である結果が得られた(10dBの向上)。
　焦点深度を持つ、空中用凹面型P(VDF/TrFE)トランスデューサを試作し、2MHzの超音波を用いて、集積回路(IC_11229-12/ROCKWELL)の透過画像形成を行った。その結果、空気中で非接触による超音波画像を得ることができた。また、振幅強度画像と位相画像には、あまり差がないことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
　現在、空気中で観測対象物の内部構造を、1mm以下の分解能で画像化できる超音波画像装置は、殆ど存在しない。しかし、空気中で非接触による高分解能の画像を得ることは、画像化に限らず重要である。本研究では、空気の物性値にできるだけ近い値をもつ、P(VDF/TrFE)圧電高分子超音波トランスデューサを開発することで、前述の画像化技術を遂行し評価した。具体的には、P(VDF/TrFE)圧電振動子上に、音響整合層を取り付け、更なるトランスデューサの高効率化を図った。これは、従来の水中での超音波送受信技術に代わり、将来、空気中で行うことが可能となり得る。本研究の結果、集積回路の透過画像を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：So far, piezoelectric polymer P(VDF/TrFE)-ultrasonic transducers had developed for transmitting and receiving efficiently in air. In order to further the improving efficiency, it considered to utilize the acoustic matching layer with the P(VDF/TrFE) piezoelectric element. In this study, adhering a polyester film (thickness 100 micron meter / inclosing adhesive) was able to improve of performance of 10 dB of P(VDF/TrFE) transducer more then P(VDF/TrFE)(not acoustic matching layer transducer).
 The amplitude transmitting image and phase difference image of an integrated circuit (IC_11229-12/ROCKWELL) were obtained for using the concave type P(VDF/TrFE) transducers at 2 MHz in air. As the result, there was not much difference between these two images in this study.

研究分野：超音波計測

キーワード：超音波　トランスデューサ　空気中　高周波　圧電高分子材料　物質内部構造　強度画像　位相差画像

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

超音波による、観測対象物の外形や内部を画像化する技術は、様々な方面で利用されている。このとき、超音波画像などに用いられる周波数は、kHz 帯域が多い。MHz 帯域(kHz よりも高周波数)の利用が少ない理由のひとつは、超音波のエネルギーは、周波数の 2 乗に比例して大きく減衰するため、送受信信号が小さくなり、その検出が難しいことである。加えて、減衰した微小信号は、周辺機器からのノイズの影響を大きく受ける。MHz 帯域で利用される、数少ない超音波機器に、人体の断層像を見る、超音波診断装置(超音波エコー)がある。この装置は、超音波センサー(トランスデューサやプローブなどと言う)と人体の皮膚との間に、薄くゼリーなどの音波を伝達させる媒質を塗布し、超音波センサーを密着させ、人体内部に超音波を照射し、その後、減衰した信号を増幅し、画像化を行う。このとき、媒質であるゼリーや水などを用いず、衣服の上から診断を行うことが理想的であるが、残念ながら、現在の技術では、超音波画像を得ることができない。なぜ、超音波画像化ができないか？、これは、空気中では、超音波エネルギーが、水などの液体と比べて、減衰値が極度に大きくなり、その微弱な受信信号を捉えることができない、という技術的な問題である。そこで、前述のように周波数を kHz 以下に低下させ、できるだけ超音波エネルギーの減衰値を小さくする方法を採用すると、今度は、長波長となり画質が低下する(画像の分解能は、波長に比例する)。このため、良好な超音波エコー画像を形成することができない。しかし、空気中で、物質内部の検査(非破壊検査)を行うことは、水中での検査と比較して、画像化に限らず大きな優位性がある。もし、この技術が実現できると、その利用範囲は大きく広がる。例えば、Integrated Circuits(IC 類)の内部検査や、水中では短絡の危険性がある蓄電池や、電子部品の非破壊検査、親水性のため水中ではできない紙類の劣化や品質検査、衣服の上からの超音波診断などに利用できる。また、空気中では超音波トランスデューサの設置自由度が大きく、トランスデューサ位置が、限定されない利点もある。

空気中で、MHz 帯域での超音波による物質内部の画像形成を可能とするためには、超音波を、空気中に効率よく伝達させる圧電振動子を必要とする。現在、空気中に効率よく伝達できる圧電材料は、未だ発見されていない。しかし、空気との音響物性(音響インピーダンス=密度×音速)に、近い圧電材料を用いれば、効率を改善できる可能性が高い。この有望な圧電材料として、圧電高分子材料がある(PVDF が最も有名)。PVDF 系の圧電材料には、数種類あるが、これらの中でも、コポリマーである P(VDF/TrFE)圧電材料は、PVDF 系で、大きな電気機械結合係数(kt 値)をもつことが知られている(本材料の最大値は kt=0.37)。

本研究者らは、先の研究までに、この P(VDF/TrFE)圧電材料を用いて、空気中に 2MHz の超音波を照射し、物質内部(IC)の透過画像形成に成功した。この時点での問題点は、試作した P(VDF/TrFE)超音波トランスデューサの効率を、更に向上させる必要性であった。そこで、空気との送受信効率向上のために、音響整合(材)層に着目した。この時点では、P(VDF/TrFE)圧電振動子面に、どのような音響整合層を付加して、P(VDF/TrFE)トランスデューサの効率向上ができるかは、不明であったが、Mason の等価回路から、シミュレーションを行った結果、音響インピーダンス値の小さい音響整合層を付加することで、効率改善が可能であることが判明し、本研究を遂行した。

2. 研究の目的

無機質の圧電材料と比較して、音響インピーダンス値の一桁小さい、P(VDF/TrFE)でも、空気との境界面では、反射が発生し、68dB(1/2000)と大きく減衰する(セラミックなどの無機質圧電体では、86dB と更に大きく減衰する)。このため、この減衰値を小さくする有効な手段として、音響整合層(材)を付加し、MHz 帯域の超音波を、空気中に効率良く照射できる P(VDF/TrFE)トランスデューサを開発することに、主眼をおいた。引続き、この開発した P(VDF/TrFE)トランスデューサの動作特性を評価し、IC 内部の画像形成を行った。

3. 研究の方法

3.1 圧電高分子材料である P(VDF/TrFE)(75/25mol%)を用いて、高周波(2MHz)で、且つ、高感度で動作する空中超音波用トランスデューサの開発を目指した。この P(VDF/TrFE)トランスデューサを実現するために、主として、次の二つを行った。①圧電膜とバッキングプレートを兼ねる基板間に、接着剤を用いない圧電膜製作技術(溶液の直接展開法)を用いて、約 3MHz で動作する P(VDF/TrFE)圧電振動子(直径 23mm)を開発する(動作中心周波数の 3MHz は、事項②と関連する)。②P(VDF/TrFE)トランスデューサの送受信効率を向上させるため、P(VDF/TrFE)圧電振動子板上に、P(VDF/TrFE)材質よりも、音響インピーダンス値が小さい、ポリマー系の音響整合層を複数枚積層する。これは、圧電体と空気境界面で起こる、反射による損失を、できるだけ小さくするためである(音響整合層を積層するのは、最終層で用いる音響整合層をできるだけ空気に近づけることによる)。前述二項を実現するため、ポリマー系音響整合層(100 ミクロン)を付加し、平面型 2MHz 用 P(VDF/TrFE)トランスデューサを最初に試作した[音響整合層は 100 ミクロン、P(VDF/TrFE)圧電振動子の厚みを 200 ミクロンとし、総厚みは、300 ミクロンである]。試作した P(VDF/TrFE)トランスデューサは、効率/周波数の性能測定(実測値)を行い、Mason の等価回路から理論値と比較し、その評価を行った。平面型トランスデューサの場合は、焦点無限型(画像の分解能は、およそ振動面の面積)となるため、本研究では画像化用として、最終的に、焦点深度をもつ凹面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサを順次試作した。

3.2 前項 3.1 で開発した凹面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサを用いて、IC(11229-12/ROCKWELL 社)の振幅強度による透過画像(FFT 回路による透過画像を含む)、および位相差(参照信号と受信信号の時間的なずれ)による透過画像形成を行った。位相差による透過画像は、先行研究の表面反射法による観測対象物の超音波画像形成に準拠した。

4. 研究成果

空気との音響マッチングを良くするために、音響整合層を付加した 2MHz で動作する P(VDF/TrFE)圧電振動子について、以下に示した。

Figure 1 は、3MHz に動作の中心周波数(Admittance-Phase/Frequency)をもつ P(VDF/TrFE)圧電振動子を示した。この振動子面側から、順次、ポリエステルフィルム・ポリウレタン・ポリプロピレンを積層した。この結果を Figure 2 に示した。この結果から、目的とする動作中心周波数(2MHz)の P(VDF/TrFE)圧電振動子として、制御可能であることが分か

る。しかし、圧電動作性能は多少低下した(性能の低下は、本時点では接着層の影響と考えられていた)。

本研究で用いた P(VDF/TrFE)圧電材料を、高性能の圧電振動子とするためには、約 100MV/m 以上の電場による印可が必要であることが判明している。本研究では、圧電膜の厚みを 2/3(200 ミクロン)にすることができるため、先行研究(300 ミクロン)での高電圧よりも、低い電圧で分極ができ、膜の絶縁破壊を低減させることができた。

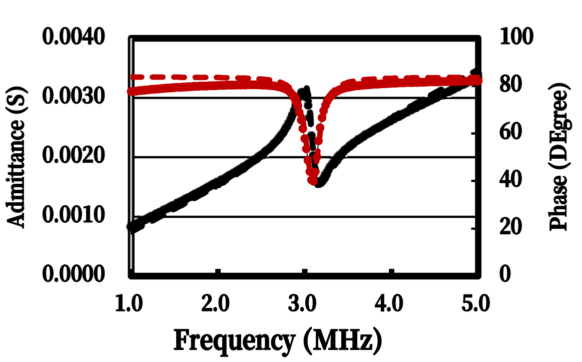

Figure 1

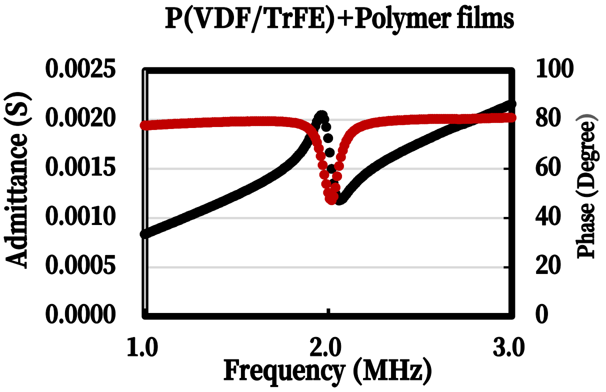

Figure 2

Figure 1. Observed and simulated admittance-phase/frequency curves for P(VDF/TrFE) film with Cu-plate by casting method.　Figure 2. Observed admittance-phase /frequency curves for P(VDF/TrFE) film with adhered polymer films by shown in Fig.1.

Figure 3 に、2MHz に動作の中心周波数をもつ、音響整合層のない平面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサ(φ23mm)と、Figure 4 に、Figure 2 で製作した同形状の平面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサの送受信特性を示した(両トランスデューサ自体の admittance-phase/frequency 値は、動作帯域幅は多少異なるが中心周波数は、ほぼ同値である)。

Figure 3 および Figure 4 の測定法は、空気中で 1 つの同一トランスデューサによる、送受信兼用型反射方式によって行った。このときのトランスデューサと反射板との間隔(距離)は、15mm である。Figure 4 の測定結果から、P(VDF/TrFE)圧電振動子面上に、音響整合層を付加した場合は、音響整合層のないトランスデューサに対して、約 10dB の性能向上を確認できた。

空中超音波透過画像を、空中超音波送受信システムによる周波数 2MHz での、強度画像(FFT 回路を含む)と、位相差画像による画像形成を行った。現在のところ、本 IC(11229-12/ROCKWELL 社)を用いた場合では、両者ともにほぼ同じ画像(画質)であった。これは、所期の予想とは異なるが、IC はそれぞれ薄い複合材で構成される材質のため、透過信号が平均化されるためと考えられた。

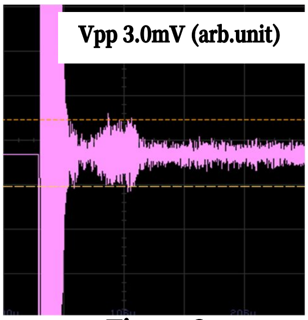

Figure 3

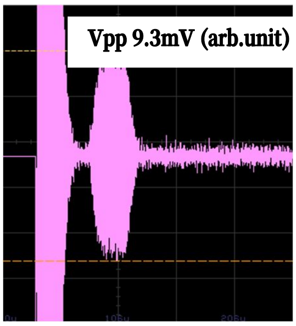

Figure 4

Figure 3. Transducer response of P(VDF/TrFE) transducer with the center frequency at 2 MHz in air (distance 15 mm between transducer and refractor). Figure 4. Transducer response of P(VDF/TrFE) transducer using acoustic matching layers shown in Fig.2.

5. 主な発表論文等

[論文](計 1 件)

① Sadayuki Takahashi, Ultrasonic imaging air-coupled P(VDF/TrFE) transducers with through-transmission method at 2 MHz, Acoustical Science and Technology, 査読あり, Vol 41. 2020、pp900-905

[雑誌](計 1 件)

① 髙橋貞幸、音響整合材料による圧電高分子トランスデューサの効率改善、超音波テクノ、査読なし、Vol 32. No.2, 2020, pp29-35

[学会発表](計 4 件)

① 髙橋貞幸、音響整合材層による圧電高分子トランスデューサについて、日本音響学会 2019 年秋季研究発表会、2019

② 髙橋貞幸、音響整合層に粘着テープを用いた圧電高分子振動子の製作とその評価について、日本音響学会 2020 年春季研究発表会、2020

③ 髙橋貞幸、高分子系音響整合材の付加による圧電高分子振動子の挙動について、日本音響学会 2020 秋季研究発表会、2020

④ 髙橋貞幸、音響整合層を付加した圧電高分子振動子の開発について、日本音響学会 2021 秋季研究発表会、2021

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名 Sadayuki Takahashi	４．巻 41
２．論文標題 Ultrasonic imaging using air-coupled P(VDF/TrFE) transducers with through-transmission method at 2 MHz	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Acoustical Science and Technology	６．最初と最後の頁 900-905
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.41.900	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

〔学会発表〕　計3件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 高橋貞幸
２．発表標題 高分子系音響整合材の付加による圧電高分子振動子の挙動について
３．学会等名 日本音響学会(2020秋季研究発表会)
４．発表年 2020年

１．発表者名 高橋貞幸
２．発表標題 音響整合層に粘着テープを用いた圧電高分子振動子の製作と その評価について
３．学会等名 日本音響学会(2020年春季研究発表会)
４．発表年 2020年

１．発表者名 高橋貞幸
２．発表標題 音響整合材層による圧電高分子トランスデューサについて
３．学会等名 日本音響学会(2019年秋季研究発表会)
４．発表年 2019年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関