

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2011 年 10 月 6 日(06.10.2011)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2011/121882 A1

- (51) 国際特許分類:
H04R 17/10 (2006.01) H04R 17/00 (2006.01)
A61B 8/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/001033
- (22) 国際出願日: 2011 年 2 月 23 日(23.02.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2010-084533 2010 年 3 月 31 日(31.03.2010) JP
特願 2010-084018 2010 年 3 月 31 日(31.03.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): コニカミノルタエムジー株式会社 (KONICA MINOLTA MEDICAL & GRAPHIC, INC.) [JP/JP]; 〒1918511 東京都日野市さくら町 1 番地 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 西久保 雄一 (NISHIKUBO, Yuuichi) [JP/JP]; 〒1918511 東京都

日野市さくら町 1 番地 コニカミノルタエムジー株式会社内 Tokyo (JP). 大沼 憲司 (OHNUMA, Kenji) [JP/JP]; 〒1918511 東京都日野市さくら町 1 番地 コニカミノルタエムジー株式会社内 Tokyo (JP). 森田 聖和 (MORITA, Kiyokazu) [JP/JP]; 〒1918511 東京都日野市さくら町 1 番地 コニカミノルタエムジー株式会社内 Tokyo (JP). 鈴木 謙次 (SUZUKI, Kenji) [JP/JP]; 〒1918511 東京都日野市さくら町 1 番地 コニカミノルタエムジー株式会社内 Tokyo (JP). 児玉 秀和 (KODAMA, Hidekazu) [JP/JP]; 〒1850022 東京都国分寺市東元町 3 丁目 2 0 番 4 1 号財団法人小林理学研究所内 Tokyo (JP). 伊達 宗宏 (DATE, Munehiro) [JP/JP]; 〒1850022 東京都国分寺市東元町 3 丁目 2 0 番 4 1 号財団法人小林理学研究所内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 小谷 悦司, 外 (KOTANI, Etsuji et al.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島 2 丁目 2 番 2 号大阪中之島ビル 2 階 Osaka (JP).

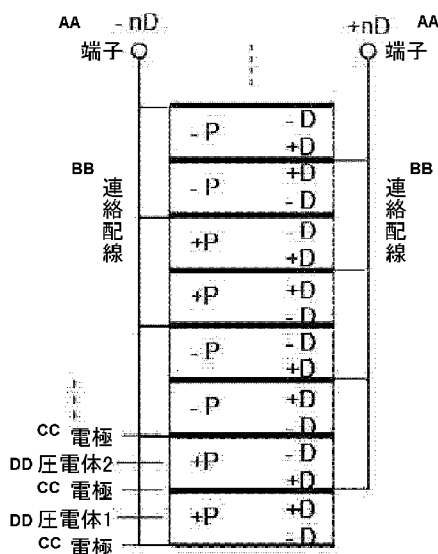
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,

[続葉有]

(54) Title: LAMINATED PIEZOELECTRIC BODY AND MANUFACTURING METHOD OF SAME, ULTRASONIC TRANSDUCER USING SAME AND ULTRASONIC DIAGNOSTIC DEVICE

(54) 発明の名称: 積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびに前記積層型圧電体を用いた超音波トランスデューサおよび超音波診断装置

[図8]



AA Terminal
BB Connecting Wiring Lines
CC Electrode
DD Piezoelectric

(57) Abstract: Disclosed are a laminated piezoelectric body, a laminated piezoelectric body manufacturing method, an ultrasonic transducer and an ultrasonic diagnostic device, wherein a plurality of mutually laminated piezoelectric bodies is electrically connected in parallel to each other, and each of the plurality of piezoelectric bodies arranges a direction of residual polarity related to electrical displacement or a sign of an electric field caused by a direct piezoelectric effect, or a crystal axis in a direction to reduce sensitivity in a first resonance mode, with reference to an axis of a first level of piezoelectric on a fixed edge side, and in a direction to increase sensitivity in a second resonance mode to a higher level than the first resonance mode.

(57) 要約: 本発明にかかる積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびに超音波トランスデューサおよび超音波診断装置では、互いに積層された複数の圧電体が電氣的に相互に並列に接続され、これら複数の圧電体のそれぞれは、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、第 1 の共振モードにおける感度を減少するとともに、前記第 1 の共振モードよりも高次の第 2 の共振モードにおける感度を増大する方向に配列している。



BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：

積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびに前記積層型圧電体を用いた超音波トランスデューサおよび超音波診断装置

技術分野

[0001] 本発明は、圧電体を複数層積層して成る積層型圧電体およびこの積層型圧電体の製造方法に関する。そして、本発明は、超音波診断装置の超音波探触子等として好適に用いられる、前記積層型圧電体を用いた超音波トランスデューサおよび前記積層型圧電体を用いた超音波診断装置に関する。

背景技術

[0002] 一般に、超音波トランスデューサには圧電体が用いられる。これは、圧電体が機械エネルギーを電気エネルギーに変換する、また、その逆に電気エネルギーを機械エネルギーに変換するという、いわゆる電気系と機械系との結合作用を持つためである。この圧電体は、一對の電極が設けられたシート状、板状あるいは棒状であって、一方の電極が背後層に固定され、他方の電極が音響レンズや整合層を介して媒質に接する。

[0003] そして、圧電超音波トランスデューサの多くは、 d_{33} モードや e_{33} モードによって、媒質に音波を放射し、あるいは、媒質に伝搬する音波を検出する。 d_{33} モードは、柱状振動子の縦振動であり、 e_{33} モードは、板状振動子の厚み振動であると一般に言われている。PZTセラミックスやP(VDF)等の強誘電体、P(VDCN/VAc)等の高誘電体、ポラスポリマーエレクトレット圧電体は、ポーリング処理による電気双極子の配向によって残留分極を保持し、 d_{33} モードや e_{33} モードを示す。一方、残留分極を持たない圧電結晶では、ZnO、LiNbO₃、KNbO₃等の圧電結晶の場合はC軸を、水晶の場合はA軸を、それぞれ電極面に対して垂直に配向することによって、前記 d_{33} モードや e_{33} モード（水晶では d_{11} モードや e_{11} モード）が示される。圧電コンポジット材料については、用いられる材料に応じる。

[0004] ここで、超音波トランスデューサを構成する圧電体において、最も単純な力学境界条件は、一端が固定端でもう一端が自由端の場合である。なお、理論上は、接する物の音響インピーダンス Z （単位は MRayl. ）と境界条件には、 $Z = 0$ が自由端、 $Z = \infty$ が固定端の関係があるが、本明細書では、そこまで厳密ではなく、接着層や電極層を除いて、接する物のインピーダンス Z に対し、圧電材料のインピーダンス Z が、小さいもしくは同等の場合に固定端、大きい場合に自由端とみなすものとする。また、超音波トランスデューサの送波および受波には、圧電体の縦振動あるいは厚み振動の共振が用いられ、その共振周波数 f_r は、トランスデューサの構造や媒質への押し当てにもよるが、主に圧電体の物性と寸法とで決まる。したがって、本明細書では、圧電体の寸法や性質以外で共振周波数を変化させる要因を除外する。

[0005] 先ず、圧電体の d_{33} モードや e_{33} モードにおける共振周波数 f_r は、圧電体の音速 v と高さ（厚み） h とから、下記の式（１）となる。

$$f_r = v / 4h \quad \dots (1)$$

これは、一般に $\lambda / 4$ 共振モードの共振と言われる。 λ は、圧電体内の波長を意味する。このほかに両端を自由とした $\lambda / 2$ 共振モードがある。その共振周波数は、 $\lambda / 4$ 共振モードの共振周波数の２倍となる。

[0006] 一方、前記圧電体の音速 v は、柱状振動子の縦振動では、下記の式（２）となり、板状の厚み振動子の厚み振動では、下記の式（３）となる。

$$v = (1 / s \rho)^{1/2} \quad \dots (2)$$

$$v = (c / \rho)^{1/2} \quad \dots (3)$$

となる。

ここで、 s は、弾性コンプライアンス、 c は、弾性スティフネス、 ρ は、密度である。

[0007] このようにトランスデューサの送波および受波の各周波数は、主に圧電体の高さ（厚み） h 、弾性率 s および密度 ρ によって決定されることが、上式（１）～（３）より理解される。

[0008] そして、医療分野や建築分野等に用いられる超音波診断装置には、より高

分解能な画像を得るために、トランスデューサの高周波化や送受波性能の向上が求められている。圧電体を用いた超音波トランスデューサにおいて、送受波性能を向上するには、トランスデューサと電気処理回路との間の電気インピーダンス整合は、電気信号を高 S/N 比で伝送するための重要な因子である。また、高周波化では、送受波周波数が圧電体の厚みで決まるので、圧電体をより薄くする必要がある。圧電体の薄膜化は、電気インピーダンスを下げる方向に働くので、電気回路とのインピーダンス整合には有利に働くが、下げ幅は、せいぜい厚み比の逆数分に過ぎない。また、圧電体の薄膜化は、膜厚制御や取り扱い等で製造プロセスを困難とする。

[0009] そこで、従来技術では、高周波信号を得る目的として、従来の $\lambda/4$ 共振トランスデューサの送受波信号における高調波成分が用いられている。しかしながら、高調波成分は、基本波成分に比べて感度が弱く、かつ圧電体や周辺材料のダンピングによって減衰し易いので、高 S/N 比の信号が得られ難い。そこで、高調波を使った超音波の送受波の一例として、図1を参照して、 e_{33} 厚み伸縮モードについて説明する。この図1および以下の説明は、非特許文献1に示されている。この図1の等価回路を構成する素子の定数は、下記式(4)ないし(6)によって表される。

$$C_n = p_n k_t^2 C_0 \quad \dots (4)$$

$$L = 1 / \omega_{p1}^2 C_1 \quad \dots (5)$$

$$p_n = (1 / n^2) (8 / \pi^2), \quad n = 2m - 1 \quad \dots (6)$$

ここで、 C_n は、各素子のキャパシタンスであり、 L は、インダクタンスであり、 k_t は、厚み伸縮モードの電気機械結合係数であり、そして、 ω_{p1} は、共振周波数である。

[0010] 上記式(6)において、 $p_n \doteq 1 / n^2$ と近似すれば、式(4)は、下記式(7)となる。

$$C_n / C_0 = k_t^2 / n^2 \quad \dots (7)$$

この式(7)は、 n 次調波における電気機械結合係数の実効値が $1/n$ に減少することを示す。そして、1次モードの場合、 $n = 1$ なので、式(7)

は、下記式（８）となる。

$$C_n = 1 / C_0 = k_t^2 \quad \dots (8)$$

この式（８）は、この１次モードにおける k_t と誘電率との関係式（９）において、 $\varepsilon^T = C_0 + C_n$ 、 $\varepsilon^S = C_0$ とおいた式と一致する。

$$\varepsilon^T / \varepsilon^S = 1 + k_t^2 \quad \dots (9)$$

ここで、 ε^S は、束縛条件の誘電率であり、 ε^T は、自由条件の誘電率であり、これら C_0 と C_n とは、電気容量である。 d_{33} モードに対しては、上式（４）を、下記式（１０）に置き換えれば、同様の結果が得られる。

$$C_n = p_n (k_{33}^2 / 1 - k_{33}^2) C_0 \quad (10)$$

[0011] そして、３次高調波を送受波する場合の電気機械結合係数の実効値は、式（７）より、 $n = 3$ の場合に与えられ、見かけの結合係数を k_t' とおけば、 $k_t' = k_t / n = k_t / 3$ となる。この結果は、３次高調波を送受波する際に、見かけ結合係数が $1 / 3$ に減衰することを意味する。

[0012] 図２は、厚み方向の共振の１次モードを周波数１ＭＨｚで示す圧電体における複素誘電率の周波数特性（計算値）を示すグラフである。図２の横軸は、ＭＨｚ単位で表す周波数であり、その縦軸は、複素誘電率である。ただし、 $k_t = 0.3$ 、 $h / 2v = 2.485 \times 10^{-7}$ （ｓ）、 $\tan \delta_m = 0.04$ である。

[0013] １ＭＨｚに見られる実部（参照符号 $\alpha 1$ で示す）の極大および極小と、虚部（参照符号 $\alpha 2$ で示す）の極大とは、厚み方向の共振の１次モードによるものである。以後、３ＭＨｚに３次高調波成分が見られ、５ＭＨｚに５次高調波成分が見られる。一方、図３に示すように、図２に示す３次高調波成分（破線）について、３ＭＨｚを１次モードとする圧電体モデル（実線）に当てはめたところ、３ＭＨｚを３次モードとする圧電体に対し、結合係数と圧電体の厚みとが $1 / 3$ にされた場合に、その波形が一致した。これらの結果は、上記の解釈と一致する。図３は、厚み共振を示す圧電体における複素誘電率の周波数特性（計算値）を示すグラフである。図３の横軸は、ＭＨｚ単位で表す周波数であり、その縦軸は、複素誘電率である。ただし、破線は、

前記のとおり、 $k_t = 0.3$ 、 $h/2v = 2.485 \times 10^{-7}$ (s)、 $\tan \delta_m = 0.04$ である。一方、実線は、 $k_t = 0.1$ 、 $h/2v = 8.300 \times 10^{-7}$ (s)、 $\tan \delta_m = 0.04$ である。

[0014] 以上のように、従来技術では、高調波を検出する際に、見掛けの電気機械結合係数が $1/n$ にまで減少してしまい、そして、電気インピーダンスが圧電体の寸法により一義的に決まってしまう。

[0015] 一方、医療用超音波診断装置において、高調波信号を用いた生体組織のハーモニクイメーシング (THI) 診断は、従来のBモード診断では得られない鮮明な診断像が得られることから、標準的な診断モダリティとなりつつある。このハーモニクイメーシング技術のように使用する周波数が高くなると、サイドローブレベルが小さくなり、S/Nが良く、コントラスト分解能が良くなり、またビーム幅が細く、横方向分解能が良くなり、さらに近距離では音圧が小さく、また音圧の変動が少ないので多重反射が起こらない等の多くの利点を、このハーモニクイメーシング技術は、有している。

[0016] そこで、特許文献1では、超音波トランスデューサの各圧電素子で受信された信号が整相加算回路で加算された後に、基本波帯域のフィルタと高調波帯域のフィルタとに共通に入力される。そして、それらの出力が、被検体の診断領域の深さにそれぞれ応じたゲインで重み付けされた後に、合成される。これによって、深い診断領域での高調波成分の減衰を基本波で補間する超音波診断装置が提案されている。すなわち、この特許文献1に開示の超音波診断装置は、高調波の受信の場合に、前記電気機械結合係数の低下をフィルタとアンプとを用いることによって補償している。

[0017] 同様に、特許文献2では、基本波用の圧電素子に高調波用の圧電素子が積層され、前記基本波用の圧電素子から送信超音波が放射される。そして、前記基本波用の圧電素子で受信した基本波の信号成分に、前記高調波用の圧電素子で受信された複数の高調波成分が、それぞれ帯域通過フィルタを通過させて所望の成分を抽出した後に個別にゲイン調整して加算される。これによって、診断領域の深度に応じた信号を得る超音波診断装置が提案されている。

。

[0018] ところで、上述の従来技術では、多数の圧電素子からの信号経路にフィルタやアンプを挿入する必要がある。

[0019] また、高い周波数の信号の受信には、PZT等の無機材料に比べて、P(VDF)等の有機材料を用いることが加工特性の点で好ましい。しかしながら、無機材料は、誘電率が高く、このためキャパシタンスが大きく、電気インピーダンスが低いので、後段回路とのマッチングが比較的容易であるのに対し、有機材料では、前記誘電率が低く、このためキャパシタンスが低く、前記電気インピーダンスが高いので、後段回路とのマッチングが難しい。

先行技術文献

特許文献

[0020] 特許文献1：特開2002-11004号公報

特許文献2：特許第4192598号公報

非特許文献

[0021] 非特許文献1：圧電材料学の基礎 石田拓郎著 オーム社

発明の概要

[0022] 本発明は、上述の事情に鑑みて為された発明であり、その目的は、超音波トランスデューサにおける所望の高周波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧が1次モードのそれらよりも大きくなるようにすることができるとともに、電気インピーダンスを低下することができる積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびにこの積層型圧電体を用いた超音波トランスデューサおよび超音波診断装置を提供することである。

[0023] 本発明にかかる積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびに超音波トランスデューサおよび超音波診断装置では、互いに積層された複数の圧電体が電氣的に相互に並列に接続され、これら複数の圧電体のそれぞれは、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きある

いは結晶軸を、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、第 1 の共振モードにおける感度を減少するとともに、前記第 1 の共振モードよりも高次の第 2 の共振モードにおける感度を増大する方向に配列している。このため、このような構成の積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびに超音波トランスデューサおよび超音波診断装置は、所望の高周波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧が 1 次モードのそれらよりも大きくなるようにすることができるとともに、電気インピーダンスを低下することができる。

[0024] 上記並びにその他の本発明の目的、特徴及び利点は、以下の詳細な記載と添付図面から明らかになるであろう。

図面の簡単な説明

[0025] [図1] 圧電体の厚み伸縮モードでの等価回路図である。

[図2] 厚み方向の共振の 1 次モードを 1 MHz に示す圧電体における複素誘電率の周波数特性を示すグラフである。

[図3] 前記図 2 に示す圧電体における 3 次モードと、厚み方向の共振の 1 次モードを 3 MHz に示す圧電体における 1 次モードと、の複素誘電率の周波数特性を示すグラフである。

[図4] 3 層圧電体トランスデューサにおける $\lambda/4$ 共振状態の模式的な断面図である。

[図5] 図 4 で示す 3 層圧電体トランスデューサにおける $3\lambda/4$ 共振状態の模式的な断面図である。

[図6] n 層圧電体トランスデューサの模式的な断面図である。

[図7] 図 6 に示した n 層圧電体トランスデューサで n 次高調波を励振あるいは検出する際の変位と歪みとを模式的に示す図である。

[図8] 図 7 に示す積層型圧電体で、 n 次高調波を検出する際の各々の圧電体の残留分極、あるいは結晶の C 軸や A 軸の向きと、圧電正効果による電気変位との関係を示す図である。

[図9] n 次高調波を検出するための $2n$ 層圧電体トランスデューサの構造を模

式的に示す図である。

[図10] 図8で示す考え方に従う詳細な実施例の一例であり、2層圧電体トランスデューサの構造を模式的に示す断面図である。

[図11] 図10で示す2層圧電体トランスデューサにおける高調波送受波時の変位と歪みとを説明するための図である。

[図12] 図10および図11に示す積層型圧電体で、3次高調波を検出する際の各々の圧電体の残留分極の向きと、圧電正効果による電気変位との関係を示す図である。

[図13] 図10に示す2層圧電体およびその比較例による超音波の送受波特性について、実験データおよびシミュレーション結果を示すグラフである。

[図14] 図8および図5で示す考え方に従う詳細な実施例の他の例であり、3層圧電体トランスデューサの構造を模式的に示す断面図である。

[図15] 図14で示す3層圧電体トランスデューサにおける高調波送受波時の変位と歪みとを説明するための図である。

[図16] 図14および図15に示す積層型圧電体で、3次高調波を検出する際の各々の圧電体の残留分極の向きと、圧電正効果による電気変位との関係を示す図である。

[図17] 図16に示す3層圧電体による超音波の送受波特性について、実験データおよびシミュレーション結果を示すグラフである。

[図18] 図16に示す3層圧電体の比較例による超音波の送受波特性について、実験データおよびシミュレーション結果を示すグラフである。

[図19] 図8で示す考え方に従う詳細な実施例のさらに他の例であり、6層圧電体トランスデューサの構造を模式的に示す断面図である。

[図20] 図19に示す積層型圧電体で、3次高調波を検出する際の各々の圧電体の残留分極の向きと、圧電正効果による電気変位との関係を示す図である。

[図21] 図20に示す6層圧電体による超音波の送受波特性について、シミュレーション結果を示すグラフである。

[図22]実施形態における超音波診断装置の外観構成を示す斜視図である。

[図23]図22に示す超音波診断装置における診断装置本体の電氣的構成を示すブロック図である。

[図24]図22に示す超音波診断装置の超音波探触子における超音波トランスデューサの一構造例を模式的に示す断面図である。

[図25]図22に示す超音波診断装置の超音波探触子における超音波トランスデューサの他の構造例を模式的に示す断面図である。

[図26]前記超音波トランスデューサに用いるために作成した有機圧電材料の解析結果を示すグラフである。

[図27]送信信号を示すグラフであり、符号化なしの単パルス駆動の場合を示す。

[図28]送信信号を示すグラフであり、符号化ありの複数パルス駆動の場合を示す。

発明を実施するための形態

[0026] 以下、本発明にかかる実施の一形態を図面に基づいて説明する。なお、各図において同一の符号を付した構成は、同一の構成であることを示し、適宜、その説明を省略する。

[0027] (基本原理)

先ず、積層型圧電体ならびにこの積層型圧電体を用いた超音波トランスデューサおよび超音波診断装置（例えば医療用超音波診断装置等）における基本原理について説明する。この積層型圧電体は、同じ厚みの圧電体を所定の規則に従い積層することによって、高次の、特に3次以上の共振モードの成分を効率良く送受波することができるという本願の発明者の知見に基づき構成されたものである。複数の圧電体を積層する手法は、これまで多く報告されているが、本願は、高次の、特に3次以上の共振モードの成分を送受波する際に圧電体内に歪み分布があることに着目したものである。

[0028] 一例として、説明の都合上、図4に示す3個の圧電体A1, A2, A3を積層した $\lambda/4$ 振動子について説明する。なお、 λ は、波長である。この、

$\lambda/4$ 振動子は、 $\lambda/4$ 共振モードでの励振状態の場合では、これら 3 個の圧電体 A 1, A 2, A 3 が同期して伸縮を行い、全体で最大 ΔZ の伸縮を行うものとする。そして、固定端、すなわち、40MRayl. より小さいものの、十分に大きい音響インピーダンスを有する背後層に接する 1 層目（第 1 段目）の圧電体 A 1 における裏面の位置の座標を z_0 とすると、前記伸縮に伴うその位置の変位は、 $z_0 = \Delta Z \sin 0^\circ = 0$ である。これに対して、1 層目の圧電体 A 1 における表面の位置の座標 z_1 の変位は、 $z_1 = \Delta Z \sin 30^\circ = 0.5 \Delta Z$ となる。2 層目（第 2 段目）の圧電体 A 2 における表面の位置の座標 z_2 の変位は、 $z_2 = \Delta Z \sin 60^\circ = 0.87 \Delta Z$ となる。そして、3 層目（第 3 段目）の圧電体 A 3 の表面は、自由端、すなわち、上述の 0 より大きいものの、十分に小さい音響インピーダンスを有する空間と接し、この 3 層目の圧電体 A 3 における表面の位置の座標 z_3 の変位は、 $z_3 = \Delta Z \sin 90^\circ = 1.0 \Delta Z$ となる。ここで、圧電体 A 1, A 2, A 3 の表裏は、該圧電体を厚み方向（積層方向）に加圧して、+ の電圧が発生する方を表、- の電圧が発生する方を裏と定義する。

[0029] すなわち、図 4 の 3 層の圧電体 A 1, A 2, A 3 の場合、全体の伸縮 ΔZ の内、固定端側の圧電体 A 1 は、 $0.5 \Delta Z$ の伸縮を受け持ち、2 層目の圧電体 A 2 は、 $0.37 \Delta Z$ の伸縮を受け持ち、3 層目の圧電体 A 3 は、 $0.13 \Delta Z$ しか伸縮しないことになる。このように積層型圧電体は、基本波の $\lambda/4$ 共振モードの共振では、各圧電体 A 1, A 2, A 3 は、同期して（同じ方向に）伸縮を行うものの、各圧電体 A 1, A 2, A 3 が同量で一様に伸縮するのではなく、異なる量で不均一な歪み分布を有する。

[0030] 一方、同様の積層型圧電体を $3\lambda/4$ 共振モードで共振させると、図 5 で示すようになる。すなわち、1 層目の圧電体 A 1 における裏面の位置の座標 z_0 は、 $z_0 = \Delta Z \sin 0^\circ = 0$ であり、1 層目の圧電体 A 1 における表面の位置の座標 z_1 の変位は、 $z_1 = \Delta Z \sin 90^\circ = \Delta Z$ となり、2 層目の圧電体 A 2 における表面の位置の座標 z_2 の変位は、 $z_2 = \Delta Z \sin 180^\circ = 0$ となり、そして、3 層目の圧電体 A 3 における表面の位置の座標 z_3 の

変位は、 $z_3 = \Delta Z \sin 270^\circ = -\Delta Z$ となる。したがって、1層目の圧電体A1は、 ΔZ の伸びを行っているのに対して2層目および3層目の圧電体A2、A3は、それぞれ ΔZ の縮みとなっている。

[0031] そこで本件発明者は、このような不均一な歪み分布に着目し、各圧電体の残留分極（PZT、PVDf等の強誘電体）、あるいは、結晶（水晶等）のC軸やA軸の向き（ d_{33} 、 e_{33} 、 d_{11} 、 e_{11} の符号を決める軸）を、高調波送受信時の歪み分布における電気変位や電場の符号と一致するように、不一致の箇所（「-」の符号に該当する）の圧電体について、その表裏を反転して積層するようにした。図4および図5の場合には、その左側の矢印で示すように、2層目および3層目の圧電体A2、A3を、1層目の圧電体Aとは前記残留分極の向きあるいは結晶軸が逆方向となるように積層する。これによって、この構成の積層型圧電体では、基本波 λ の成分が、 $0.5 \cdot \Delta Z + 0.37 \cdot (-\Delta Z) + 0.13 \cdot (-\Delta Z) = 0$ となって除去されると同時に、3次高調波 3λ の成分は、 $1 \cdot \Delta Z + (-1) \cdot (-\Delta Z) + (-1) \cdot (-\Delta Z) = 3\Delta Z$ となって抽出することが可能となる。

[0032] 次に、図6を用いて、 n 個（ n は4以上の整数）の圧電体を積層した $\lambda/4$ 振動子において、 n 次高調波を送受波する場合について説明する。モデルを単純化するために、積層膜の一端を基盤（背後層）に固定し、もう一端を自由端とした。インピーダンス整合層や背後層（バッキング層）等、さらに接着層の厚み等による影響は、除くものとする。

[0033] 図7は、図6に示した n 層圧電体トランスデューサで、 n 次高調波を励振あるいは検出する際の変位と歪みとを模式的に示す図である。（A）は、積層状況を示し、（B）は、ある瞬間での各層の変位を示し、（C）は、歪の極性を示す。前述の図4や図5と同様に、基盤とそれに接する圧電体との境界面を原点 z_0 として、素子の高さ方向（厚み方向、積層方向）の座標を z_1 、 z_2 、 z_3 、 $\dots$ 、 z_n とする。積層型圧電体内で、各圧電体層の変位は、背後層と第1段目の圧電体1の境界とを原点 z_0 とした正弦波を形成する。

[0034] 一般に、厚み方向に n 倍波（ $n \geq 1$ ）が励振された場合、高さ z における

変位 $\xi(z)$ は、下記式(11)となることが知られている(例えば、文献; 有山正孝著、「基礎物理学選書8 振動・波動」、裳華房)。

$$\xi(z, t) = \xi_0 \sin(n\pi/2 \cdot z/h) (\cos n\omega_r t + \theta) \cdots (11)$$

ここで、 ω_r は、積層型圧電体の共振周波数 $2\pi f_r$ であり、 θ は、電圧あるいは音波を受ける際の応力と変位との位相差である。係数 $\xi_0 \sin(n\pi/2 \cdot z/h)$ は、高さ z における変位の振幅を意味する。以下の説明において、時間項は、省略する。

[0035] この場合、座標 z_1 での変位 $\xi(z_1)$ は、下記式(12)である。

$$\xi(z_1) = \xi_0 \sin(n\pi/2 \cdot z/h) \cdots (12)$$

である。ここで、変位 $\xi(z)$ と歪み S との関係は、下記式(13)であるので、第 m 層の圧電体の歪み S_m は、下記式(14)となる。ただし、 $m=1 \sim n$ 、 $z_0=0$ である。

$$dS = d\xi / dz \cdots (13)$$

$$S_m = [\xi(z_m) - \xi(z_{m-1})] / (z_m - z_{m-1}) \cdots (14)$$

[0036] したがって、圧電体1の歪み S_1 は、下記式(15)となる。

$$S_1 = \Delta h_1 / h_1 = \xi_0 \sin(n\pi/2 \cdot h_1/h) / h_1 \cdots (15)$$

ここで、 Δh_1 は、圧電体1の厚み変化で、 $\xi(z_1) - \xi(z=0)$ であり、 h_1 は、圧電体1の厚みである。圧電体2についても同様に、歪み S_2 は、下記式(16)となる。

$$\begin{aligned} S_2 &= \Delta h_2 / h_2 \\ &= \xi_0 \{ \sin(n\pi/2 \cdot (h_1 + h_2)/h) \\ &\quad - \sin(n\pi/2 \cdot h_1/h) \} / h_2 \cdots (16) \end{aligned}$$

第 m 層の圧電体の歪み S_m は、下記(17)となる。

$$\begin{aligned} S_m &= \Delta h_m / h_m \\ &= \xi_0 \{ \sin(n\pi/2 \cdot z_m/h) \\ &\quad - \sin(n\pi/2 \cdot z_{m-1}/h) \} / h_m \cdots (17) \end{aligned}$$

[0037] この式(17)は、第 m 層にある圧電体の歪みが、 $\sin(np/2 \cdot z_m/h) - \sin(np/2 \cdot z_{m-1}/h)$ で決まり、前述のように一様に伸縮しないことを意味する。したがって、その項の符号が正になる圧電体と負になる圧電体とで、圧電体の表裏を反転させれば、圧電正効果による電気変位あるいは電場の符号を一致させることができ、圧電素子の n 次高調波の電気信号を効率良く得られることが理解される。

[0038] さらに、各圧電体の厚みを等しくすれば、下記式(18)に示すように、単純化することができる。

$$z_m = (m/n)h, \quad z_{m-1} = (m-1/n)h, \quad h_m = h/n \quad \dots \quad (18)$$

これを式(17)に代入すると、下記式(19)となる。

$$S_m = m\xi_0 \{ \sin(m\pi/2) - \sin[(m-1)\pi/2] \} / h \quad \dots \quad (19)$$

となる。

[0039] 次に、電気系について考える。第 m 層の圧電体が圧電正効果によって生じる電気変位(単位電極面積当りの電荷) D_m は、下記式(20)である。

$$D_m = e_{33} S_m \text{ または } D_m = d_{33} S_m = d_{33} s T_m \quad \dots \quad (20)$$

ここで、 s は、圧電体の弾性コンプライアンスである。各々の圧電体を電氣的に並列に結合する場合は、積層型圧電体が出力する正味の電気変位 D_{Total} は、下記式(21)となる。ただし、式(21)の Σ は、 $m=1$ から $m=n$ までの和をとる。

$$D_{Total} = \Sigma D_m \quad \dots \quad (21)$$

したがって、各圧電体の電気容量を C とした場合に、積層型圧電体の容量は、 $n \times C$ となり、電気インピーダンスは、圧電体1層の $1/n$ に減少する。

[0040] そして、本願発明者は、上記の式(19)および式(21)から、単純な並列結合の実現と積層型圧電体が出力する正味の電気変位が最大となる残留分極あるいは結晶の C 軸や A 軸の配列の規則性を見出した。また、本願発明者は、前記積層数 n が4以上で、該積層数 n と高調波の次数とを一致させる

ことによって、圧電体内を伝搬する弾性波の節と腹とを、圧電体の境界面とに一致させることができ、この場合に各圧電体の歪みは、その絶対値が変わることなく位相が180度反転し、 n 次高調波の検出をより効率良く行うことができることを見出した。より具体的には、例えば、各圧電体が直列に接続される図7の場合では、第1段目の圧電体1の歪みを+とすれば「+，－，－，+」の周期性を4層おきに見出すことができる。以上のことをより理論的に説明すると、以下のようになる。

[0041] 図8に、 n 層圧電体で、 n 次高調波を検出する際の各々の圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きと、圧電正効果による電気変位 D (C/m^2) との関係の一例を示す。 n 層圧電体における各圧電体の層間およびその両端における圧電体の表面には、電極が設けられており、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極を連絡配線によって連結し、各圧電体を並列に接続している。また、残留分極（それを持たない圧電体の場合は結晶のC軸（水晶の場合はA軸））は、 z 軸方向に配向されている。図中では便宜上、圧電体1の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の方向を+ P と表記している。これは、他の圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸が、圧電体1のそれと同方行か逆方行かを識別するためであり、圧電体1の分極方向を制限するものではない。

[0042] 前記図7（C）に示したように、各圧電体の歪みには、周期性がある（図7（C）の場合では、前述のように各圧電体は直列である）。そのため、残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きを平行とした場合、高電荷出力あるいは高電位出力を達成するためには、各々の電極を電氣的に絶縁し、独立して配線しなければならない、構造上および製造上、難しい。

[0043] しかしながら、本実施形態では、図8に示すように、並列に接続する場合に、4層毎の圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸に、「+ P ，+ P ，－ P ，－ P 」の周期性を与えた、すなわち背後層に接する第1段目の圧電体の軸を基準として、第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方行とし、この第2段目の圧電体に接する第3段目の圧電体およびその上の第

4 段目の圧電体では逆方行とし、それ以後 4 層の圧電体毎に、同方向、同方向、逆方行、逆方行の周期性を持つように配列すれば、電気インピーダンスを 1 層の圧電体の $1/n$ に下げられるとともに、容易に両端子間の電荷感度を n 倍に増幅することができる。

[0044] 上述では、 n 次高調波を検出する場合を例として挙げたが、逆に n 次高調波を送波する場合についても、図 8 において端子間に発振器を接続することによって従来よりも効率が向上する。送波の場合、歪み S と印加電場 E との関係は、下記式 (22) である。

$$S = d E \text{ あるいは } S = (e/c) E \quad \cdots (22)$$

図 8 に示す積層型圧電体の両端子間に電圧発生器を繋げ、 n 次高調波に相当する周波数の電圧を印加することによって、図 8 に示す歪みおよび図 7 (B) に示す変位が生じ、超音波が媒質中に励振し得る。そして、先に述べた電気インピーダンスの関係から、このような構造では、低電圧で高電流の駆動が実現される。

[0045] 一方、図 9 は、 n 次高調波を検出するための $2n$ 層圧電体トランスデューサの構造を模式的に示す図である。(A) は、積層状況を示し、(B) は、ある瞬間での各層の変位を示し、(C) および (D) は、それぞれ歪みおよび電気変位の係数を示す。 0.3 および 0.7 の前記係数は、歪みおよび電気変位それぞれの相対比を表しており、絶対値を示すものではない。なお、 $1/2^{1/2} = 0.7$ と近似した。各圧電体は、層間および両端面に電極が設けられ、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極同士を連絡し、並列結合とした。この場合、先に述べた n 層圧電体トランスデューサと比べて、圧電正効果による電気変位は、同じであるが、電気容量が 2 倍となり、電気インピーダンスは、半減する。残留分極あるいは C 軸や A 軸の配列は、背後層に接する第 1 段目の圧電体を基準として、8 層毎に、「+P, -P, -P, +P, -P, +P, +P, -P」の繰り返しとなる。

[0046] 各圧電体の歪み $S_{m^{n\omega}}$ は、 $m = 1, 2, \dots, 2n$ として下記式 (23) で与えられる。

$$S_{m^{n\omega}} = 2 n \xi_0^{n\omega} \{ \sin [m (\pi/4)] - \sin [(m-1) (\pi/4)] \} / h \quad \dots (23)$$

[0047] (第1実施形態)

以下に、上述の考え方に基づく第1の実施形態について説明する。まず、第1実施形態として、図10に示す2層圧電体トランスデューサによる $3\lambda/4$ 高調波の検出について説明する。2層圧電体トランスデューサは、積層型圧電体の中でも最もシンプルな構造である。この場合、送受波に用いる高調波の次数と積層枚数とは一致しない。しかしながら、上述の考え方を以下のように適用することにより、送受波の効率を上げることができる。

[0048] すなわち、図10に示す圧電体1および圧電体2の歪み S_1 、 S_2 は、それぞれ、下記式(24)および式(25)となる。

$$S_1 = \Delta h_1 / h_1 = \xi_0 \sin (n\pi / 2 \cdot h_1 / h) / h_1 \quad \dots (24)$$

$$S_2 = \Delta h_2 / h_2 \\ = \xi_0 \{ \sin (n\pi / 2) - \sin (n\pi / 2 \cdot h_1 / h) \} / h_2 \quad \dots (25)$$

ここで、 h は、積層型圧電体の高さであり、 h_1 と h_2 とは、各圧電体の高さで、 $h_1 = h_2 = h/2$ である。

[0049] $3\lambda/4$ 共振倍波に対する応答は、 $n=3$ で与えられる。その場合の歪み $S_1^{3\omega}$ 、 $S_2^{3\omega}$ は、それぞれ、下記式(26)および式(27)となる。

$$S_1^{3\omega} \\ = 2 \xi_0^{3\omega} \sin (3\pi / 4) / h = 2 (\xi_0^{3\omega} / 2^{1/2}) / h \quad \dots (26)$$

$$S_2^{3\omega} \\ = 2 \xi_0^{3\omega} \{ \sin (3\pi / 2) - \sin (3\pi / 4) \} / h \\ = -2 \xi_0^{3\omega} (1 + 1 / 2^{1/2}) / h \quad \dots (27)$$

となる。添字 3ω は、3倍波における変位を示す。ここで、 $1 / 2^{1/2} \doteq 0.7$ と近似すると、これら各式は、3倍波では圧電体2の歪みと圧電体1の歪

みとでは振幅比が $-1.7 : +0.7$ となることを示す。

[0050] これら各圧電体の変位と歪みの符号とを図 11 に示す。(A) は、変位を示し、(B) は、歪みを示す。圧電体 1 と圧電体 2 との歪み比は、(B) に示すとおりである。各圧電体の歪みの絶対値が一致しないのは、前述のように各圧電体の境界と変位の節と腹とが一致しないためである。

[0051] そのため、図 12 に示すように、互いに隣り合う圧電体の離反面の電極同士を連絡することによって並列結合とした場合に、積層型圧電体の電気インピーダンスは、1 つの圧電体のインピーダンスの $1/2$ となる。さらに、圧電体 1 の残留分極の向きあるいは結晶の C 軸や A 軸の向きと圧電体 2 のそれらの向きを同方向とする場合に、圧電正効果による電気変位 $D_{1,-1}^{3\omega}$ は、並列接続で一方の極性が反転して足し合わされ、下記式 (28) となる。

$$D_{1,-1}^{3\omega} = 2 (1 + 2^{1/2}) e \xi_0^{3\omega} / h \quad \dots (28)$$

[0052] 一方、基本波に対する応答は、式 (24) および (25) で $n=1$ の場合に理解できる。すなわち、歪み S_1^ω と S_2^ω とは、それぞれ、下記式 (29) および式 (30) となる。

$$S_1^\omega = 2 \xi_0^\omega \sin(\pi/4) / h = 2 (\xi_0^\omega / 2^{1/2}) / h \quad \dots (29)$$

$$\begin{aligned} S_2^\omega &= 2 \xi_0^\omega \{ \sin(\pi/2) - \sin(\pi/4) \} / h \\ &= 2 \xi_0^\omega \{ 1 - 1/2^{1/2} \} / h \quad \dots (30) \end{aligned}$$

[0053] ここで、図 12 に示すような並列結合を行い、残留分極あるいは結晶の C 軸や A 軸の向きを同方向とした場合、電気変位 $D_{1,1}^\omega$ は、下記式 (31) となる。

$$D_{1,1}^\omega = 2 e \xi_0^\omega (2^{1/2} - 1) / h \quad \dots (31)$$

ここで、添え字の 1 は、各圧電体の残留分極あるいは結晶の C 軸や A 軸の向きに対応し、左から圧電体 1、圧電体 2 の残留分極あるいは結晶の C 軸や A 軸の向きを示している。

[0054] 以上の結果から、各圧電体の歪みを考慮し、並列に接続の場合、残留分極あるいは結晶の C 軸や A 軸方向を同方向とすることによって、このような構

成の2層圧電体は、 $3\lambda/4$ 波に対して2.4倍の感度を増幅することができる、同時に $\lambda/4$ 波に対して0.4倍に感度を落とすことができる。したがって、2層圧電体から成る超音波トランスデューサへ上述の考え方を適用すれば、 $3\lambda/4$ 共振モードによる信号を高S/N比で送受波することが可能となる。

[0055] 図13は、P(VDF/TrFE)を用いた2層圧電体からなる超音波トランスデューサの送受波感度特性における実験結果ならびにシミュレーション結果である。図13(A)の横軸は、MHz単位で表す周波数であり、その縦軸は、dB単位で表す感度である。実線は、実験結果であり、破線は、シミュレーション結果である。いずれも互いに隣り合う圧電体の離反面、すなわち外側の表面に形成された電極面が連絡され、互いに隣り合う圧電体が並列結合とされている。しかも $\lambda/4$ 共振周波数は、約7MHzであり、 $3\lambda/4$ 共振周波数は、約20MHzである。(A)は、上述の考え方に基づき分極方向を同方行とした場合の結果を示し、(B)は、参考に逆方行とした場合の結果を示す。(A)に示すように、上述の考え方に基づく分極方向と配線手法とを組み合わせた場合、20MHzに見られる $3\lambda/4$ 共振モードの共振ピークは、7MHzにみられる $\lambda/4$ 共振モードの共振ピークよりも大きい。そして、(B)に示す結果と比較すると、 $3\lambda/4$ 共振ピークは、20dB増加している。このように2層圧電体に対しても上述の考え方に基づき、分極方向と配線手法とを組み合わせることによって、3次高調波成分を増加させると同時に、基本波成分を減衰させることができる。

[0056] (第2実施形態)

次に、3層圧電体トランスデューサによる3次高調波の検出について説明する。図14は、その模式的な構造を示す図である。この3層圧電体トランスデューサも、積層型圧電体の一端を背後層に固定し、もう一端を自由端とした $\lambda/4$ 振動子である。

[0057] 先ず、上述の考え方に基づく設計プロセスについて説明する。前述と同様に、背後層(例えば基板等)と圧電体1との境界を原点 z_0 として、素子の高

さ方向（厚み方向、積層方向）の座標を z とする。次に、各々の圧電体が生じる歪み S について考える。基盤側から順に圧電体 1、圧電体 2、圧電体 3 とする。座標 z は、基盤と圧電体 1 との境界では $z = 0$ とされ、圧電体 1 と圧電体 2 との境界では z_1 とされ、圧電体 2 と圧電体 3 との境界では z_2 とされ、そして、圧電体 3 の端部では z_3 とされる。また、圧電体 1 の厚みが h_1 とされ、圧電体 2 の厚みが h_2 とされ、圧電体 3 の厚みが h_3 とされ、積層型圧電体の高さが h とされる。

[0058] この場合では、座標 z_1 における変位 $\xi(z_1)$ は、下記式 (32) となるので、圧電体 1 の歪み S_1 は、下記式 (33) となる。

$$\xi(z_1) = \xi_0 \sin(n\pi/2 \cdot z_1/h) \quad \dots (32)$$

$$S_1 = \Delta h_1 / h_1 = \xi_0 \sin(n\pi/2 \cdot h_1/h) / h_1 \quad \dots (33)$$

同様に、圧電体 2 および圧電体 3 の各歪み S_2 、 S_3 は、それぞれ、下記式 (34) および式 (35) となる。

$$\begin{aligned} S_2 &= \Delta h_2 / h_2 \\ &= \xi_0 \{ \sin(n\pi/2 \cdot (h_1 + h_2)/h) - \sin(n\pi/2 \cdot h_1/h) \} / h_2 \end{aligned}$$

... (34)

$$\begin{aligned} S_3 &= \Delta h_3 / h_3 \\ &= \xi_0 \{ \sin(n\pi/2) - \sin(n\pi/2 \cdot (h_1 + h_2)/h) \} / h_3 \end{aligned}$$

... (35)

[0059] そして、 $3\lambda/4$ 共振モードの共振時における各圧電体の歪みは、上式 (33) ないし式 (35) において $n=3$ で与えられる。各圧電体の厚みが等しく、すなわち上式で $h_1 = h_2 = h_3 = h/3$ の場合、各圧電体の歪み $S_1^{3\omega}$ 、 $S_2^{3\omega}$ 、 $S_3^{3\omega}$ は、それぞれ、下記式 (36) ないし式 (38) となる。

$$S_1^{3\omega} = \Delta h_1^{3\omega} / h_1 = 3 \xi_0^{3\omega} \sin(\pi/2) / h$$

$$= 3 \xi_0^{3\omega} / h \quad \cdots (36)$$

$$S_2^{3\omega} = \Delta h_2^{3\omega} / h_2$$

$$= 3 \xi_0^{3\omega} \{ \sin(\pi) - \sin(\pi/2) \} / h$$

$$= -3 \xi_0^{3\omega} / h \quad \cdots (37)$$

$$S_3^{3\omega} = \Delta h_3^{3\omega} / h_3$$

$$= 3 \xi_0^{3\omega} \{ \sin(3\pi/2) - \sin(\pi) \} / h$$

$$= -3 \xi_0^{3\omega} / h \quad \cdots (38)$$

ここで、添え字 3ω は、3次高調波における応答を意味する。これらの式から $3\lambda/4$ 共振モードの共振では、圧電体2および圧電体3の歪みと、圧電体1の歪みとが、逆位相であることを示す。

[0060] 図15は、各圧電体の変位と歪みの符号とを示す図である。(A)は、変位を示し、(B)は、歪みを示す。本実施形態の積層型圧電体は、3次高調波の送受を行うものであって、圧電体が3個積層であるので、(A)および前述の図5で示すように、変位の節と腹とは、各圧電体の境界と一致する。この場合には、各圧電体の歪みは、圧電体1の歪みを+とすると、(B)および前述の図5で示すように、圧電体2および圧電体3の歪みは、-となる。

[0061] 以上の力学系の振る舞いに基づき、電気系の最適構造の導出について説明する。図16に示すように、互いに隣り合う圧電体の離反側の面の電極同士を連絡し、そこから配線を引き出して結合することによって、容易に各圧電体を電氣的に並列に接続することができる。この場合、積層型圧電体の電気インピーダンスは、1個の圧電体の $1/3$ に減少する。また、第1段目の圧電体1の残留分極の向きあるいは結晶のC軸やA軸の向きを基準(+P)とし、第2段目の圧電体2の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きを同方向(+P)とし、そして、第3段目の圧電体3で逆方向(-P)とする。このように設定することによって配線に誘起される電荷は、圧電正効果により生じた電荷の総和となる。この場合では、両端子間に誘起される電気変位 $D_1, -1^{3\omega}$ は、下記式(39)となる。

$$D_{1, 1, -1}^{3\omega} = e S_1 - e (S_2 + S_3) = 9 e \xi_0^{3\omega} / h \quad \cdots (39)$$

ここで、添え字の1および-1は、各圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きに対応し、左から第1段目の圧電体1、第2段目の圧電体2そして第3段目の圧電体3の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きを示している。

[0062] そして、 $\lambda/4$ 共振に対する応答は、 $n=1$ で与えられ、各圧電体の歪み S_1 、 S_2 、 S_3 は、それぞれ、下記式(40)、式(41)、式(42)となり、下記式(43)となる。

$$S_1 = \Delta h_1 / h_1 = 3 \xi_0 \sin(\pi/6) / h \quad \cdots (40)$$

$$S_2 = \Delta h_2 / h_2 \\ = 3 \xi_0 \{ \sin(\pi/3) - \sin(\pi/6) \} / h \quad \cdots (41)$$

$$S_3 = \Delta h_3 / h_3 \\ = 3 \xi_0 \{ \sin(\pi/2) - \sin(\pi/3) \} / h \quad \cdots (42)$$

$$S_1 = S_2 + S_3 \quad \cdots (43)$$

[0063] 一方、図16に示す並列接続で、 $\lambda/4$ 共振モードの共振に対する電気変位 $D_{1, 1, -1}^\omega$ は、下記式(44)であり、これは、本実施形態の3層圧電体から成るトランスデューサでは、 $\lambda/4$ 共振モードの共振に基づく感度が打ち消されることを示している。

$$D_{1, 1, -1}^\omega = e (S_1 + S_2 + S_3) = 0 \quad \cdots (44)$$

[0064] 比較として、単に残留分極あるいは結晶のC軸やA軸を平行とした3層圧電体による3次高調波の送受波について以下に説明する。 $3\lambda/4$ 共振において積層型圧電体が圧電正効果により生じる電気変位 $D_{1, 1, 1}^{3\omega}$ は、

$$D_{1, 1, 1}^{3\omega} = e (S_1 + S_2 + S_3) = -3 e \xi_0^{3\omega} / h \quad \cdots (45)$$

となる。したがって、本実施形態では、上式(45)に示すとおり、並列接続において端子間の電気変位は、3倍(約10dB)向上できることができる。

- [0065] 図17は、図16に示した3層圧電体による超音波の送受波特性について、実験データおよびシミュレーション結果を示す。実験では、代表的な強誘電性ポリマーであるフッ化ビニリデンと三フッ化エチレンの共重合体（P（VDF／TrFE））が用いられた。超音波トランスデューサの模式的な構造が図17の右図に示されている。この例では、上述の考え方に基づき3層圧電体が電氣的に直列に結合され、さらに分極の向きが、図15に示したものと同一とされた。3層圧電体の高さは、約 $120\mu\text{m}$ で、 $\lambda/4$ 共振モードの共振周波数は、 4.5MHz である。左図の実線は、実験結果、破線は、シミュレーション結果である。
- [0066] 図17を参照すると、 20MHz 以下では、それぞれ共振周波数に対応する 4.5MHz 付近にピークを示さず、 $\lambda/4$ 共振モードの共振ピークが消失している。したがって、本実施形態のトランスデューサにおける第1のピークは、その $3\lambda/4$ 共振モードの共振周波数である 13.5MHz となっている。
- [0067] 比較例として、圧電体2と圧電体3の残留分極の向きを図17とは反対にした積層型圧電体が図18の右図に示されており、そして、図18には、その特性も示されている。左図に示すように、この3層圧電体は、 $\lambda/4$ 共振モードの共振周波数である 4.5MHz と、その3次高調波成分である 13.5MHz とに共にピークを示し、しかも3次高調波成分の感度は、 $-50\sim-60\text{dB}$ 程度であり、図17に示した本実施形態の結果に比べて、 $10\sim20\text{dB}$ 程度小さい。これらの実験結果からも、上述の考え方に基づき分極方向と配線手法とを組み合わせることによって、3次高調波成分を増加させると同時に、基本波成分を減衰させることが可能である。
- [0068] 以上のように、第2の実施形態では、3層圧電体を用いて3次高調波を送受波する手法について説明したが、積層型圧電体は、積層型圧電体の高調波の次数と積層枚数とを一致させることにより、（i）圧電体の境界面を圧電体の弾性波の節と腹とに一致させて各圧電体の振動様式を符号化し、その符号と配線手法とに基づき、（ii）各圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸や

A軸の向きを上述の考え方にに基づき同方行または逆方行とすることによって、各圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きを単純に同方行にした場合と比べ、前記積層型圧電体が、 $3\lambda/4$ 波の送受波の場合に感度を3倍（約10dB）以上増加することができるだけでなく、 $\lambda/4$ 波を打ち消すフィルタとしての機能も有することができる。また、この積層型圧電体は、電氣的に並列結合とするので、電気インピーダンスを $1/3$ に減少させることができる。以上のように $3\lambda/4$ 波を選択的にかつ高S/N比で送受波する場合に、上述の考え方に基づく積層型圧電体は、極めて有効である。これによって、受波の場合には帯域分離フィルタやアンプを削減することができる。あるいは、削減することができない場合でも、上述の考え方に基づく積層型圧電体は、フィルタの場合には、その次数を削減して損失を抑え、アンプの場合には、ゲインを小さくすることができる。

[0069] （第3実施形態）

第3の実施形態は、同じ厚さの圧電体を6層積層したトランスデューサによる3次高調波の送受である。本実施形態は、第2の実施形態で示した3層圧電体において各圧電体を2つの圧電体に分割したもので、並列結合とした場合に電気インピーダンスがさらに半分になるだけでなく、上端電極と下端電極とが連絡されるので、積層型圧電体全体を電氣的にシールドすることができる。

[0070] 図19は、その6層圧電体の構造を示し、3次高調波を送受波する際の変位および歪みを模式的に示す断面図である。図9と同様に、（A）は、積層状況を示し、（B）は、ある瞬間での各層の変位を示し、（C）は、歪みの係数を示す。

[0071] 各圧電体の歪み $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ は、下記式（46）、式（47）、式（48）、式（49）、式（50）、式（51）となる。ここで、 $1/2^{1/2} \doteq 0.7$ に近似すると、各圧電体の歪みの比は、図20の模式図に示すとおりとなる。

$$S_1 = 6\xi_0 \sin(\pi/4)/h$$

$$= 6 \xi_0 (1/2^{1/2}) \quad \dots (46)$$

$$S_2 = 6 \xi_0 \{ \sin(\pi/2) - \sin(\pi/4) \} / h$$

$$= 6 \xi_0 (1 - 1/2^{1/2}) \quad \dots (47)$$

$$S_3 = 6 \xi_0 \{ \sin(3\pi/4) - \sin(\pi/2) \} / h$$

$$= 6 \xi_0 (1/2^{1/2} - 1) \quad \dots (48)$$

$$S_4 = 6 \xi_0 \{ \sin(\pi) - \sin(3\pi/4) \} / h$$

$$= 6 \xi_0 (-1/2^{1/2}) \quad \dots (49)$$

$$S_5 = 6 \xi_0 \{ \sin(5\pi/4) - \sin(\pi) \}$$

$$= 6 \xi_0 (-1/2^{1/2}) \quad \dots (50)$$

$$S_6 = 6 \xi_0 \{ \sin(3\pi/2) - \sin(5\pi/4) \}$$

$$= 6 \xi_0 (1/2^{1/2} - 1) \quad \dots (51)$$

[0072] そして、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極を連絡し、電氣的に並列に結合した場合の残留分極あるいは結晶のC軸またはA軸の好ましい配列が、図20に示めされている。このように構成することによって、総電荷量は、図16で示す3枚積層した場合の構成と変わらないが、電気インピーダンスは、図16の構成の1/2に下げることができる。

[0073] 図21は、図20に示すように分極配列と配線とを組み合わせた6層圧電体における感度の周波数特性をシミュレーションした結果である。図20の右図は、その構成を示し、その左図には、その特性が示されている。この6層圧電体の $\lambda/4$ 共振モードの共振周波数は、5MHzである。しかしながら、右図にあるような上述の考え方に基づく分極配列ならびに配線を組み合わせることで、左図に示すように、 $\lambda/4$ 共振モードによる感度は、減衰し、 $3\lambda/4$ 共振モードによる感度が最大となる。

[0074] なお、上述した積層型圧電体は、超音波診断装置における超音波トランスデューサに限定するものではなく、例えば魚群探知機等にも適用することができる。また、上述した積層型圧電体における送受信信号は、超音波帯域に限らず、上述した積層型圧電体は、例えば、低周波のストレスを加えて発電を行うような構成にも適用することができる。

[0075] (第4実施形態)

上述の考え方に基づく積層型圧電体は、上述のように、種々の製品への適用が考えられるが、ここで、このような積層型圧電体を超音波診断装置に適用した場合について説明する。図22は、実施の一形態にかかる超音波診断装置の外観構成を示す斜視図である。この超音波診断装置1は、図略の生体等の被検体に対して超音波を送信すると共に、その被検体において反射等で生成された超音波を受信する超音波探触子2と、超音波探触子2とケーブル3を介して接続され、該ケーブル3を介して電気信号の送信信号を送信することによって超音波探触子2に被検体に対して前記超音波信号を送信させるとともに、超音波探触子2で受信された信号に基づいて、被検体内の内部状態を断層画像として画像化する診断装置本体4とを備えて構成される。

[0076] 診断装置本体4は、その上部に操作パネル5および表示パネル6を備え、操作パネル5によって各種設定操作等が行われ、表示パネル6には、その操作のための支援画像や、受信された超音波信号に基づき作成された断層画像等が表示される。また、操作パネル5や診断装置本体4の適所には、超音波探触子2を、その不使用時に保持するホルダ7が設けられている。

[0077] 図23は、診断装置本体4の電氣的構成を示すブロック図である。診断装置本体4は、操作入力部11（前記操作パネル5はその一例）と、送信部12と、受信部13と、信号処理部14と、画像処理部15と、表示部16（前記表示パネル6はその一例）と、制御部17と、電圧制御部18と、参照信号記憶部19とを備えて構成されている。

[0078] 操作入力部11は、複数の入力スイッチを備えた操作パネルやキーボード等から成り、診断開始を指示するコマンドや被検体の個人情報等のデータの入力等が行われる。

[0079] 送信部12は、制御部17の制御に従って、送信パルスを生成するための回路であって、超音波探触子2の各圧電素子からの送信パルスが所定の焦点位置に収束するようにフォーミングを行う回路である。さらに本実施形態では、前述の送信パルスは、時間軸方向に伸張した複数の符号化されたパルス

で構成される。作成された送信パルスは、制御部 17 を介して電圧制御部 18 に与えられ、振幅が拡大されて、各圧電素子へ与える。

[0080] 受信部 13 は、制御部 17 の制御に従って、超音波探触子 2 からケーブル 3 を介して電気信号の受信信号を所定の受信処理を行って受信する回路であり、この受信信号を信号処理部 14 へ出力する。

[0081] 信号処理部 14 は、受信部 13 の出力と予め設定された参照信号との相関処理を行うことで、受信部 13 の出力から受信超音波を検出するものである。前記参照信号は、送信超音波の周波数を基本周波数とした場合における検出すべき 3 次以上の高調波の次数および被検体の診断部位および診断深度から導かれる近似関数である。

[0082] なお、この信号処理部 14 は、前記相関処理を行う前に、前記符号化されたパルスを時間軸方向に圧縮し、送信パルスに対応する受信パルスを作成する。こうした符号化パルスを用いることによって、送信パルスによる被検体である生体に与える影響が無闇に大きくなることなく、大振幅、すなわち S/N の良好な受信パルスが得られる。この 3 次以上の高調波のみを抽出する復号フィルタは、バンドパスフィルタと組み合わせたり、或いは符号化パルスの種類を変えること等によって、 S/N の改善と、前記 3 次以上の高周波の抽出とを両立することができる。前記符号化パルスによる伸張および圧縮の処理には、公知の常套手段が用いられ、その処理技術は、例えば、特開 2003-225237 号公報等 に示されている。

[0083] 参照信号記憶部 19 は、ROM (Read Only Memory) または EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) 等の記憶素子を備えて構成され、被検体における複数の各診断部位および診断深度に対応した近似関数を前記参照信号として記憶するものである。そして、上記信号処理部 14 は、被検体の診断部位および診断深度に応じて、前記参照信号記憶部 19 に記憶されている複数の参照信号 (近似関数) の中から 1 つの参照信号を選択して相関処理を行う。また、選択された前記参照信号に応答して、前記送信部 12 がビームフォーミングを行う。前記診断部位および診断深度

は、操作入力部 11 から入力される。

[0084] 画像処理部 15 は、制御部 17 の制御に従って、信号処理部 14 で相関処理された受信信号に基づいて、被検体の内部状態の画像（超音波画像）を生成する回路である。

[0085] 表示部 16 は、制御部 17 の制御に従って、画像処理部 15 で生成された被検体の超音波画像を表示する装置である。表示部 16 は、CRT ディスプレイ、LCD、有機 EL ディスプレイおよびプラズマディスプレイ等の表示装置や、プリンタ等の印刷装置等である。

[0086] 制御部 17 は、マイクロプロセッサ、記憶素子およびその周辺回路等を備えて構成され、これら操作入力部 11、送信部 12、電圧制御部 18、受信部 13、信号処理部 14、参照信号記憶部 19、画像処理部 15 および表示部 16 を、当該機能に応じてそれぞれ制御することによって、超音波診断装置 1 の全体制御を行う回路である。

[0087] 図 24 は、前記超音波探触子 2 における超音波トランスデューサ 20 として用いられる超音波トランスデューサ 21 の構造を模式的に示す断面図である。この超音波トランスデューサ 21 は、一直線上に配列された複数の圧電素子を備え、前記圧電素子の配列方向は、図 24 の紙面に垂直（厚み）方向である。この超音波トランスデューサ 21 は、基本的に有機無機積層型の超音波トランスデューサであり、バッキング層（背後層）22 上に、送信用圧電層 23 と、中間層 24 と、受信用圧電層 25 とが、これらの順で順次に積層されて構成される。送信用圧電層 23 は、大パワー送信が可能のように、無機材料から形成され、バッキング層 22 上に積層される。受信用圧電層 25 は、送信用圧電層 23 の被検体側に、中間層 24 を介して設けられ、ハーモニックイメージングのための高調波帯域の受信が可能な有機材料から形成される。そして、電圧制御部 18 からの送信パルスは、第 2 の圧電体である送信用圧電層 23 に与えられ、第 1 の圧電体である受信用圧電層 25 によって受信された受信信号は、受信部 13 に与えられる。

[0088] ここで、送信用圧電層 23 と受信用圧電層 25 との間には、それらの音響

インピーダンスの違いを緩和するための中間層 24 が設けられている。本実施形態では、受信用圧電層 25 が後述するような有機材料から形成されることによって、被検体である生体に受信用圧電層 25 の音響インピーダンスが近くなり、受信用圧電層 25 の被検体側には音響整合層が設けられていない。このように超音波トランスデューサ 21 は、構造が簡略化されている。なお、受信用圧電層 25 上には、必要に応じて、音響レンズが設けられてもよい。

[0089] 上述のように構成される超音波トランスデューサ 21 において、有機材料から成る受信用圧電層 25 に、前述の図 8、図 9、図 12、図 16 および図 20 を用いて説明した上述の積層型圧電体のうちのいずれかが用いられる。そして、送信超音波の波長を λ とする場合に、送信用圧電層 23 は、 $\lambda/4$ 共振モードの共振を行い、受信用圧電層 25 は、 $3\lambda/4$ 共振モードの共振を行い、上述のようにして、受信用圧電層 25 は、波長 λ の 3 次高調波を高利得で抽出し、基本波を除去する。これによって、本実施形態の超音波診断装置 1 は、受信部 13 におけるフィルタやアンプを不要にすることができ、あるいはそれらフィルタやアンプを用いる場合でも、フィルタの次数を低くしたり、アンプのゲインを小さくしたりすることができる。また、本実施形態の超音波トランスデューサ 21 は、送信用と受信用とのそれぞれに適した無機圧電体および有機圧電体を用いることができ、大パワー送信を行い、被検体で発生した高調波を高利得で受信するハーモニックイメージングに好適な超音波探触子 2 を実現することができる。

[0090] 一方、図 25 は、前記超音波探触子 2 における超音波トランスデューサ 20 として用いられる他の超音波トランスデューサ 31 の構造を模式的に示す断面図である。この超音波トランスデューサ 31 も、一直線上に配列される複数の圧電素子を備え、前記圧電素子の配列方向は、図 25 の紙面に垂直（厚み）方向である。この超音波トランスデューサ 31 は、有機圧電体と無機圧電体とを並列に配置した有機無機並列配置の超音波トランスデューサであり、前記一直線上のバッキング層（背後層）32 上で、その幅方向の中央

にハーモニックイメージングのための高調波帯域の受信が可能な有機材料で形成される受信用圧電層 35 が設けられ、その幅方向の両側に大パワー送信が可能な無機材料で形成される送信用圧電層 33, 34 が並設されている。

[0091] そして、これら圧電層 33, 34, 35 上には、被検体である生体と音響インピーダンスの整合を図るための音響整合層 33a, 34a, 35a、および、超音波の収束を図るための音響レンズ 33b, 34b, 35b が積層されている。また、それらの圧電層 33, 34, 35 とバッキング層 32 との間には、介在部材 33c, 34c, 35c がそれぞれ介在されている。中央の受信用圧電層 35 の介在部材 35c は、平板であり、一方、両側の送信用圧電層 33, 34 の介在部材 33c, 34c は、該送信用圧電層 33, 34 を受信用圧電層 35 側に内傾させるために、楔形に形成されている。すなわち、介在部材 33c, 34c は、その厚さが中央側から外側へ徐々に厚くなるように形成されている。なお、図 25 では、分り易くするために、楔形の介在部材 33c, 34c の内傾角は、実際より大き目に強調して示されている。

[0092] 上述のように構成される超音波トランスデューサ 31 において、有機材料から成る受信用圧電層 35 に、前述の図 8、図 9、図 12、図 16 および図 20 を用いて説明した上述の積層型圧電体のうちのいずれかが用いられる。そして、送信超音波の波長を λ とする場合に、送信用圧電層 33, 34 は、 $\lambda/4$ 共振モードの共振を行い、受信用圧電層 35 は、 $3\lambda/4$ 共振モードの共振を行い、上述のようにして、受信用圧電層 35 は、波長 λ の 3 次高調波を高利得で抽出し、基本波を除去する。これによって、本実施形態の超音波診断装置 1 は、受信部 13 におけるフィルタやアンプを不要にすることができ、あるいはそれらフィルタやアンプを用いる場合でも、フィルタの次数を低くしたり、アンプのゲインを小さくしたりすることができる。また、本実施形態の超音波トランスデューサ 31 は、送信用と受信用とのそれぞれに適した無機圧電体および有機圧電体を用いることができ、大パワー送信を行い、被検体で発生した高調波を高利得で受信するハーモニックイメージング

に好適な超音波探触子 2 を実現することができる。

[0093] 以下に、 $3\lambda/4$ 共振モードの共振を行う受信用圧電層 25, 35 として用いられる積層型圧電体の具体的な作成方法および材料について詳述する。一般に、超音波振動子は、膜状の圧電材料から成る圧電層（「圧電体層」、「圧電膜」、「圧電体膜」ともいう。）を挟んで、一对の電極を配設することによって構成される。そして、複数の振動子（圧電素子）を 1 次元や 2 次元に配列することによって超音波トランスデューサ 20 が構成される。その複数の振動子を配列するためには、1 個の振動子をバッキング層に貼付け、必要に応じて音響整合層等を貼付けた後に、ダイシングによって各素子に分割する方法が用いられる。

[0094] 複数の分割された積層振動子の各素子のアスペクト比は、アジマス方向の幅を W 、高さを H とする場合に、 W/H が 0.4 ~ 0.6 であることが好ましい。これは、超音波が伝播する送受信方向の振動と、送受信方向に直交する走査方向（配列方向）の振動（横振動）との干渉を抑制し、振動子の配列方向の指向特性が狭くなることを回避し、ビームの指向角度が制限されることなく、大きい偏向角においても良好な感度を保つことができるためである。

[0095] そして、前記積層型圧電体は、複数の振動子が配列された長軸方向の所定数の振動子を口径として設定し、その口径に属する複数の振動子を駆動することによって被検体内の計測部位に超音波ビームを収束させて照射するとともに、その口径に属する、またはその口径に属する振動子とは別の複数の振動子によって、被検体の発する超音波の反射エコー等を受信して電気信号に変換する機能を有している。

[0096] 前述の図 8、図 9、図 12、図 16 および図 20 で示す積層型圧電体を実現するために、積層型圧電体がセラミック等の無機材料から形成される場合では、圧電体層と電極層とは、積層されて焼成等によって一体化される。

[0097] 一方、積層型圧電体が P V D F 等の有機材料から形成される場合では、表裏両面の一部または全部に電極層が形成され、分極処理された有機材料のシ

ートを積層し、層間を接着剤で接続することによって、積層型圧電体は、一体に形成される。この場合において、電極層の接触面が互いに重なるようにすることが好ましい。これは、振動子の駆動時や超音波の受信時に、不要な電界の形成を防ぎ、不均一な音場が形成されることを防ぐためである。なお、接着剤は、絶縁性であるが、有機材料層および電極層の粗面（微細な凹凸）が、積層した際に互いに入り込み、隣接する電極同士は、導通状態となる。積層接着後、振動子端部の不要な部分がそぎ落とされ、それは、トランスデューサに搭載する大きさに成形される。その後、各圧電体を並列接続するために、前述のように１組おきに電極の取出し方向が切り替えられ、各電極が導電性ペーストで結線されることによって、バッキング層 22, 32 側の両側部に、信号電極と GND 電極とが、それぞれ引出される。

[0098] 積層型圧電体の材料として、従来から用いられている水晶、圧電セラミックス PZT、PZLT や、圧電単結晶 PZN-PT、PMN-PT、LiNbO₃、LiTaO₃、KNbO₃、ZnO、AlN 等の薄膜等の無機圧電材料が挙げられ、加えて、ポリフッ化ビニリデンやポリフッ化ビニリデン系共重合体、ポリシアン化ビニリデンやシアン化ビニリデン系共重合体、ナイロン 9 やナイロン 11 等の奇数ナイロン、芳香族ナイロン、脂環族ナイロン、ポリ乳酸、ポリヒドロキシブチレート等のポリヒドロキシカルボン酸、セルロース系誘導体、あるいはポリウレア等の有機圧電材料が挙げられる。さらに無機圧電材料と有機圧電材料、無機圧電材料と有機高分子材料を併用したコンポジット材料も挙げる。図 24 および図 25 で示す超音波トランスデューサ 21, 31 では、上述の無機材料が、送信用圧電層 23; 33, 34 に用いられ、有機材料が、受信用圧電層 25; 35 に用いられる。

[0099] 当該積層型圧電体の 1 層の層厚は、設定する中心周波数（波長 λ ）に依存し、そして、加工性を考えて、約 5 ~ 200 μm の範囲内にあることが好ましい。そして、各圧電体 1 ~ 3 等の厚さが相互に等しいことによって、各圧電体の製造が容易となるので、このような構成の超音波トランスデューサ 21, 31 は、生産性が向上する。

[0100] 有機圧電材料から形成される圧電層の形成方法には、塗布によって膜を形成する方法、蒸着（蒸着重合）によって膜を形成する方法が好ましい。前記塗布方法として、例えば、スピコート法、ソルベントキャスト法、メルトキャスト法、メルトプレス法、ロールコート法、フローコート法、プリント法、ディップコート法、バーコート法等が挙げられる。また、蒸着（蒸着重合）方法として、数百Pa以下程度の真空度で、単一または複数の蒸発源よりモノマーを蒸発させ、基板上に付着、反応させることで膜を得ることができる。必要に応じて、適宜に基板の温度調整が行われる。

[0101] 上述のように作成された有機圧電体膜への電極層の形成では、先ず、チタン（Ti）やクロム（Cr）等の下地金属が、スパッタ法によって0.02～1.0μmの厚さに形成され、そして、金属元素を主体とする金属材料またはそれらの合金から成る金属材料が、必要に応じて一部絶縁材料を併せられて、スパッタ法等の適当な方法によって1～10μmの厚さに形成される。その後、前記圧電層（圧電体膜）の分極処理が行われる。前記金属材料には、金（Au）、白金（Pt）、銀（Ag）、パラジウム（Pd）、銅（Cu）、ニッケル（Ni）、スズ（Sn）等が用いられる。電極形成は、上記のスパッタ法以外に、微粉末の金属粉末と低融点ガラスとを混合した導電ペーストを、スクリーン印刷やディッピング法、溶射法等で、塗布することで行うこともできる。

[0102] 一方、図25の超音波トランスデューサ31で形成される音響整合層33a, 34a, 35aや音響レンズ33b, 34b, 35bの形成方法は、以下の通りである。振動子と生体組織との音響インピーダンスの差によって境界面での反射が発生し、自由振動が長く続いてしまうことを防止するために、音響整合層33a, 34a, 35aは、振動子と生体組織との間に介在され、両者の中間的な音響インピーダンスを持つ。この音響整合層を介在することによって、前記境界面での反射が軽減されて自由振動が速やかに集束し、トランスデューサで送受信される超音波パルス幅が短くなって、生体内に超音波が効果的に伝搬される。

- [0103] この音響整合層 33a, 34a, 35a に用いられる材料として、金属材料（アルミ、アルミ合金（例えば Al-Mg 合金）、マグネシウム合金、等）、ガラス類（マコールガラス、ケイ酸塩ガラス、熔融石英、等）、炭素材料（カーボングラファイト、コッパーグラファイト、等）、樹脂材料（ポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、ポリカーボネート（PC）、ナイロン（PA6, PA6-6）、ポリフェニレンスルフィド（PPS、ガラス繊維入りも可）、ポリフェニレンエーテル（PPE）、ポリエーテルエーテルケトン（PEEK）、ポリアミドイミド（PAI）、ポリエチレンテレフタレート（PETP）、エポキシ樹脂、ウレタン樹脂、ABC樹脂、ABS樹脂、AAS樹脂、AES樹脂、等）等が挙げられる。この音響整合層 33a, 34a, 35a に用いられる材料として、エポキシ樹脂等の熱硬化性樹脂に、充填剤として、亜鉛華、酸化チタン、シリカやアルミナ、ベンガラ、フェライト、酸化タングステン、酸化イットリビウム、硫酸バリウム、タングステン、モリブデン等を入れて成形したものを用いることが好ましい。
- [0104] 音響整合層 33a, 34a, 35a は、単層でもよいし、複数層から構成されてもよい。好ましくは、音響整合層 33a, 34a, 35a は、2層以上である。この音響整合層 33a, 34a, 35a の厚さは、送信超音波の波長を λ とする場合に、 $\lambda/4$ となるように定める必要がある（図 24 や図 25 では、送信用圧電層 23; 33, 34 内では、受信用圧電層 25, 35 内より超音波の速度が速いので、厚くなっている）。これを満たさない場合には、本来の共振周波数とは異なる周波数に複数の不要スプリアスが出現し、基本音響特性が大きく変動し、残響時間の増加や反射エコーの波形歪みによる感度や S/N の低下が引き起こされる。このような音響整合層 33a, 34a, 35a の厚さは、概ね $30\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ の範囲である。
- [0105] また、バッキング層 22, 32 は、超音波振動子の背面に配置され、後方へ放射された超音波の伝搬を抑制（吸収）する。これによって、振動子側への不要な反射が抑えられ、パルス幅は、短くすることができる。これらのバ

ッキング層 22, 32 に用いられる材料として、天然ゴム、フェライトゴム、エポキシ樹脂に、酸化タングステンや酸化チタン、フェライト等の粉末を入れてプレス成形した材料、塩化ビニル、ポリビニルブチラール（PVB）、ABS樹脂、ポリウレタン（PUR）、ポリビニルアルコール（PVAL）、ポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、ポリアセタール（POM）、ポリエチレンテレフタレート（PETP）、フッ素樹脂（PTFE）、ポリエチレングリコール、ポリエチレンテレフタレートーポリエチレングリコール共重合体等の熱可塑性樹脂等が挙げられる。

[0106] バッキング材は、好ましくは、ゴム系複合材料および／またはエポキシ樹脂複合材から成るものであり、その形状は、該圧電体や、圧電体を含むプローブヘッドの形状に応じて、適宜選択することができる。

[0107] 前記ゴム系複合材は、ゴム成分および充填剤を含有する物が好ましく、JIS K6253 に準拠したスプリング硬さ試験機（デュロメータ硬さ）におけるタイプ A デュロメータで A70 からタイプ D デュロメータで D70 までの硬さを有するものであり、さらに、必要に応じて各種の他の配合剤が添加されてもよい。

[0108] 前記ゴム成分として、例えば、エチレンプロピレンゴム（EPDM または EPM）、水素化ニトリルゴム（HNBR）、クロロプレンゴム（CR）、シリコーンゴム、EPDM と HNBR のブレンドゴム、EPDM と ニトリルゴム（NBR）のブレンドゴム、NBR および／または HNBR と 高スチレンゴム（HSR）のブレンドゴム、EPDM と HSR ブレンドゴム等が好ましい。より好ましくは、エチレンプロピレンゴム（EPDM または EPM）、水素化ニトリルゴム（HNBR）、EPDM と HNBR のブレンドゴム、EPDM と ニトリルゴム（NBR）のブレンドゴム、NBR および／または HNBR と 高スチレンゴム（HSR）とのブレンドゴム、EPDM と HSR とのブレンドゴム等が挙げられる。本実施形態のゴム成分として、加硫ゴムおよび熱可塑性エラストマー等のゴム成分の 1 種が単独で使用されてもよいが、ブレンドゴムのように 2 種以上のゴム成分をブレンドしたブレンドゴム

が用いられてもよい。

[0109] ゴム成分に添加される充填剤として、通常使用されているものから比重の大きいものに至るまで、その配合量と共に様々な形で選ぶことができる。前記充填剤として、例えば、亜鉛華、チタン白、ベンガラ、フェライト、アルミナ、三酸化タングステン、酸化イットリビウム等の金属酸化物、炭酸カルシウム、ハードクレイ、ケイソウ土等のクレイ類、炭酸カルシウム、硫酸バリウム等の金属塩類、ガラス粉末等やタングステン、モリブデン等の各種の金属系微粉末類、ガラスバルーン、ポリマーバルーン等の各種バルーン類が挙げられる。これら充填剤は、種々の比率で添加することができるが、好ましくはゴム成分100質量部に対して、50～3000質量部、より好ましくは100～2000質量部、または300～1500質量部程度である。また、これらの充填剤は、1種または2種以上を組み合わせで添加されてもよい。

[0110] ゴム系複合材料には、さらに他の配合剤を必要に応じて添加することができ、このような配合剤として、加硫剤、架橋剤、硬化剤、それらの助剤類、劣化防止剤、酸化防止剤、着色剤等が挙げられる。例えば、カーボンブラック、二酸化ケイ素、プロセスオイル、イオウ（加硫剤）、ジクミルパーオキサイド（Dicup、架橋剤）、ステアリン酸等が配合される。これら配合剤は、必要に応じて使用されるものであるが、その使用量は、一般にゴム成分100質量部に対し、それぞれ1～100質量部程度であり、全体的バランスや特性によって適宜に変更される。

[0111] 前記エポキシ樹脂複合剤は、エポキシ樹脂成分および充填剤を含有するものが好ましく、さらに必要に応じて各種の配合剤が添加される。エポキシ樹脂成分として、例えば、ビスフェノールAタイプ、ビスフェノールFタイプ、レゾールノボラックタイプ、フェノール変性ノボラックタイプ等のノボラック型エポキシ樹脂、ナフタレン構造含有タイプ、アントラセン構造含有タイプ、フルオレン構造含有タイプ等の多環芳香族型エポキシ樹脂、水添脂環型エポキシ樹脂、液晶性エポキシ樹脂等が挙げられる。本実施形態のエポキ

シ樹脂成分は、単独で用いられても良いが、ブレンド樹脂のように２種類以上のエポキシ樹脂成分を混合して用いられてもよい。

[0112] 前記エポキシ樹脂成分に添加される充填剤は、前述のゴム成分に混合する充填剤と同様のものから、上記ゴム系複合剤を粉砕して作成した複合粒子まで、いずれも好ましく使用することができる。前記複合粒子として、例えばシリコーンゴム中にフェライトを充填したものを粉砕器にて粉砕し、 $200\mu\text{m}$ 程度の粒径にしたもの等が挙げられる。

[0113] 前記エポキシ樹脂複合剤を使用する際には、さらに架橋剤を添加する必要がある、前記架橋剤として、例えば、ジエチレントリアミン、トリエチレンテトラミン、ジプロピレンジアミン、ジエチルアミノプロピルアミン等の鎖状脂肪族ポリアミン、*N*-アミノエチルピペラジン、メンセンジアミン、イソフォロンジアミン等の環状脂肪族ポリアミン、*m*-キシレンジアミン、メタフェニレンジアミン、ジアミノジフェニルメタン、ジアミノジフェニルスルホン等の芳香族アミン、ポリアミド樹脂、ピペリジン、*NN*-ジメチルピペラジン、トリエチレンジアミン、2, 4, 6-トリス（ジメチルアミノメチル）フェノール、ベンジルジメチルアミン、2-（ジメチルアミノメチル）フェノール等の２級および３級アミン等、2-メチルイミダゾール、2-エチルイミダゾール、1-シアノエチル-2-ウンデシルイミダゾリウム・トリメリテート等のイミダゾール類、液状ポリメルカプタン、ポリスルフィド、無水フタル酸、無水トリメリット酸、メチルテトラヒドロ無水フタル酸、メチルエンドメチレンテトラヒドロ無水フタル酸、メチルブテニルテトラヒドロ無水フタル酸、メチルヘキサヒドロフタル酸等の酸無水物が挙げられる。

[0114] このようにして形成されるバッキング層 22, 32 の厚さは、概ね 1 ~ 10 mm が好ましく、特に 1 ~ 5 mm であることが好ましい。

[0115] 一方、音響レンズ 33 b, 34 b, 35 b は、屈折を利用して超音波を収束し、分解能を向上するために設けられるものであり、超音波を収束するとともに、被検体である生体とよく密着して、圧電層 33, 34, 35 側と生

体との音響インピーダンス（密度×音速； $(1.4 \sim 1.6) \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ ）を整合させ、超音波の反射を少なくし得ること、および、レンズ自体の超音波減衰量が小さいことが、必要条件とされている。このため、従来から、高分子材料をベースにして作られた音響レンズが設けられる。

[0116] レンズ材料は、その音速が人体のそれより充分小さくて、減衰が少なく、また音響インピーダンスが人体の皮膚の値に近いものが望まれる。レンズ材の音速が人体のそれより充分に小さければ、レンズ形状は、凸状とすることができ、診断を行う際に滑りが良くなり、診断を安全に行うことができる。また、減衰が少なくなれば、感度良く超音波の送受信を行うことができ、さらに、音響インピーダンスが人体の皮膚の値に近いものであれば、反射が小さくなり、換言すれば、透過率が大きくなるので、同様に超音波の送受信感度が良くなる。

[0117] 本実施形態において、音響レンズ 33b, 34b, 35b を構成する素材は、従来公知のシリコーン系ゴム、ブタジエン系ゴム、ポリウレタンゴム、エピクロルヒドリンゴム等のホモポリマー、エチレンとプロピレンとを共重合させて成るエチレン-プロピレン共重合体ゴム等の共重合体ゴム等を用いることができる。これらのうち、シリコーン系ゴムを用いることが特に好ましい。

[0118] 本実施形態に使用されるシリコーン系ゴムとして、シリコーンゴム、フッ素シリコーンゴム等が挙げられる。中でも、レンズ材の特性上、シリコーンゴムを使用することが好ましい。シリコーンゴムとは、Si-O結合から成る分子骨格を有し、そのSi原子に複数の有機基が主結合したオルガノポリシロキサンを言い、通常は、その主成分は、メチルポリシロキサンで、全体の有機基のうち90%以上は、メチル基である。メチル基に代えて水素原子、フェニル基、ビニル基、アリル基等が導入されてもよい。当該シリコーンゴムは、例えば、高重合度のオルガノポリシロキサンに過酸化ベンゾイル等の硬化剤（加硫剤）を混練し、加熱加硫し硬化させることにより得ることができる。必要に応じてシリカ、ナイロン粉末等の有機または無機の充填剤、

硫黄、酸化亜鉛等の加硫助剤等が添加されてもよい。

[0119] 本実施形態に使用されるブタジエン系ゴムとして、ブタジエン単独またはブタジエンを主体とし、これに少量のスチロールまたはアクリロニトリルが共重合した共重合ゴム等が挙げられる。中でも、レンズ材の特性上、ブタジエンゴムを使用することが好ましい。ブタジエンゴムとは、共役二重結合を有するブタジエンの重合により得られる合成ゴムを言う。ブタジエンゴムは、共役二重結合を有するブタジエン単独が1.4～1.2重合することにより得ることができる。ブタジエンゴムは、硫黄等により加硫させることが好ましい。

[0120] 本実施形態にかかる音響レンズ33b, 34b, 35bは、シリコーン系ゴムとブタジエン系ゴムとを混合し加硫硬化させて得たものであってもよい。より具体的には、これは、シリコーンゴムとブタジエンゴムとを適宜な割合で、混練ロールによって混合し、過酸化ベンゾイル等の加硫剤を添加し、加熱加硫し、架橋（硬化）させることにより得ることができる。その際に、加硫助剤として、酸化亜鉛を添加することが好ましい。酸化亜鉛は、レンズ特性を落とさずに、加硫を促し、加硫時間を短縮することができる。他に、着色剤や音響レンズの特性を損なわない範囲内で他の添加剤が添加されてもよい。シリコーン系ゴムとブタジエン系ゴムとの混合割合は、その音響インピーダンスが人体に近似しているとともに、その音速が人体より小さく、減衰が少ないものを得るには、通常、1：1が好ましいが、当該混合割合は、適宜に変更可能である。

[0121] シリコーンゴムは、市販品として入手することができ、例えば、信越化学社製、KE742U、KE752U、KE931U、KE941U、KE951U、KE961U、KE850U、KE555U、KE575U等や、モメンティブパフォーマンスマテリアル社製、TSE221-3U、TE221-4U、TSE2233U、XE20-523-4U、TSE27-4U、TSE260-3U、TSE-260-4Uや、ダウコーニング東レ社製のSH35U、SH55UA、SH831U、SE6749U、SE11

20USE4704U等を用いることができる。

[0122] なお、本実施形態において、音響レンズ33b, 34b, 35bは、上記シリコン系ゴム等のゴム素材をベース（主成分）として、音速調整や密度調整等の目的に応じて、シリカ、アルミナ、酸化チタン等の無機充填剤や、ナイロン等の有機樹脂等を配合することもできる。また、当該音響レンズ33b, 34b, 35bの被検体表面に近い領域に、励起光を照射することによって発光する物質、すなわち発光物質が添加されていてもよい。

[0123] 本実施形態に用いる部材間の接着には、一般的に用いられるエポキシ系樹脂が好適である。市販のエポキシ接着剤の具体例として、スリーエムカンパニー製のDP-420、DP-460、DP-460EG、セメダイン社製のエクセルエポ、EP001、EP008、EP330、EP331、ハンツマン・アドバンスト・マテリアルズ社製のアラルダイトスタンダード（登録商標）、アラルダイトラピッド（登録商標）、システムスリー社製のシステムスリーエポキシ、ゲルマジック、スリーボンド社製の2087L（高強度二液性エポキシ配合樹脂）、2082C（常温硬化型二液性エポキシ樹脂高せん断接着力タイプ）、2081D（軟質塩ビ用接着剤エポキシ系）、コニシ社製のEセットL、コトロニクス社製デュラルコ4525IP、7050、NM25、4461IP等が挙げられる。ただし、ダイシング加工適性、薬剤耐性の面から、強固な接着性、低反応性、等が要求される。さらに、接着層は、可能な限り薄くすることが求められるため、低粘度のものが好ましい。接着層の厚みは、0.5～3μmが好ましい。

[0124] 以下に、圧電体の作製方法について説明する。先ず、送信用圧電体23; 33, 34として用いられる無機圧電体について説明する。成分原料である CaCO_3 、 La_2O_3 、 Bi_2O_3 と TiO_2 、および副成分原料である MnO が準備され、成分原料について、成分の最終組成が、 $(\text{Ca}_{0.97}\text{La}_{0.03})\text{Bi}_{4.01}\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ となるように秤量された。

[0125] 次に、純水が添加され、これが、純水中でジルコニア製メディアを入れたボールミルによって8時間混合され、十分に乾燥が行われ、混合粉体が得ら

れた。得られた混合粉体は、仮成形され、空气中、 800°C で2時間仮焼が行われ、仮焼物が作製された。

[0126] 次に、得られた仮焼物に純水が添加され、これが、純水中でジルコニア製メディアを入れたボールミルによって微粉碎され、乾燥することによって圧電セラミックス原料粉末が作製された。前記微粉碎では、微粉碎を行う時間および粉碎条件を変えることにより、それぞれ粒子径 100 nm の圧電セラミックス原料粉末が得られた。

[0127] それぞれ粒子径の異なる各圧電セラミックス原料粉末に、バインダーとして純水が6質量%添加され、プレス成形することによって厚み $100\text{ }\mu\text{m}$ の板状仮成形体とされ、この板状仮成形体が、真空パックされた後に、 235 MPa の圧力でプレスによって成形された。

[0128] 次に、上記成形体が焼成され、最終焼結体の厚さは、 $20\text{ }\mu\text{m}$ である。なお、焼成温度は、それぞれ 1100°C であった。その後、 $1.5\times 10^6\text{ (MV/m)}$ 以上の電界が、1分間印加され、分極処理が施された。

[0129] 次に、受信用圧電体25, 35として用いられる有機圧電体の作製方法について説明する。本実施形態にかかる有機圧電材料は、前述の高分子材料を主たる構成成分として有するもので、室温以上、かつ融点から 10°C 低い温度以下の温度において、延伸可能なフィルム状であり、張力を一定の範囲に保ちながら熱処理され、続いて室温まで冷却される間に二段階目の延伸を行うことによって作製することができる。

[0130] 本実施形態にかかるフッ化ビニリデンを含む有機圧電材料を振動子とする場合、有機圧電材料は、フィルム状に形成され、ついで電気信号を入力するための表面電極が形成される。本実施形態では、表面に形成した電極を介して電場を厚さ方向に掛け、圧迫しながら分極することが特徴とされるが、表面に電極を形成せずに、圧迫部材の材料に接触する面に電圧をかけられる電極が設置され、同様に圧迫しながら材料の厚さ方向に電場をかけながら分極することでも効果は、同じである。

[0131] フィルム形成は、熔融法、流延法等一般的な方法を用いることができる。

ポリフッ化ビニリデントリフルオロエチレン共重合体の場合、フィルム状にしたのみで自発分極を持つ結晶型を有することが知られているが、さらに特性を上げるために、分子配列を揃える処理を加えることが有用である。その手段として、延伸製膜、分極処理等が挙げられる。

[0132] 延伸製膜の方法は、種々の公知の方法を採用することができる。その方法は、例えば、上記高分子材料をエチルメチルケトン（MEK）等の有機溶媒に溶解した液をガラス板等の基板上に流延し、常温にて溶媒を乾燥させ、所望の厚さのフィルムを得て、このフィルムを室温で所定の倍率の長さに延伸するものである。当該延伸は、所定形状の有機圧電材料が破壊されない程度に、一軸あるいは二軸方向で行うことができる。延伸倍率は、2～10倍、好ましくは2～6倍である。

[0133] なお、フッ化ビニリデントリフルオロエチレン共重合体および／またはフッ化ビニリデンテトラフルオロエチレン共重合体において、230℃における溶融流動速度（Melt Flow Rate）は、0.03 g/min以下である。より好ましくは、溶融流動速度が0.02 g/min以下であり、更に好ましくは0.01 g/min以下である高分子圧電体を使用すると、高感度な圧電体の薄膜が得られる。

[0134] 一般に、フィルム状の材料を熱処理する場合、フィルム面内に効率的かつ均一に熱を与えるために、チャックやクリップ等で端部を支持して、所定温度環境下に置くことが好ましい。この際に、フィルム面にヒートプレート等の熱源を直接触れるような形態で熱を与えることは、加熱の際に収縮する材料の場合、平面性を損なうので好ましくない。加熱の際の熱収縮に対し、わずかに弛緩処理を行う方が、平面性に対して効果がある。前記弛緩処理とは、熱処理およびその終了後室温まで冷却される過程でフィルムにかかる収縮または膨張しようとする力に追従しながら、フィルム両端の応力を変化させることである。前記弛緩処理は、フィルムが弛むことで平面性が保てなくなったり、応力が大きくなって破断したりしない限り、応力を緩和させるように縮めても、さらに張力をかける方向に延伸しない程度に広げてよい。本

実施形態において、延伸した方向をプラスと定めた場合、長さで10%程度、フィルムが冷却中に伸びる場合は、弛みに追従するように、最大でも10%程度、二段階目の延伸が行われる。この二段階目の延伸は、フィルムがピンと張った状態となるように、弛みを無くす程度に延伸チャックを稼働させることによって行われる。それ以上の処理は、冷却中の延伸となり、フィルム破断のおそれがある。

[0135] 本実施形態の有機圧電材料の熱処理は、フィルム面内に効率的かつ均一に熱を与えるために、チャックやクリップ等で端部を支持して、フィルムの融点よりも10℃低い温度を上限とした温度付近下に置くことが好ましい。例えば、ポリフッ化ビニリデンを主成分とする有機圧電材料の場合、融点が150～180℃にあることから、好ましくは、110～140℃の温度で熱処理が行われる。また、その時間は、30分以上行うことで効果が発現し、長ければ長い程、結晶成長が促進されるが、時間とともに飽和することから、現実的には10時間程度、長くとも一昼夜程度である。この間もフィルムの平面性を維持するために、一定の張力がフィルムにかかるようにしておくことが好ましい。熱処理中の張力は、仕上がりの平面性の観点から0.1～500kPaの範囲内が好ましく、より好ましくは、可能な限り小さい応力が好ましい。熱処理中のフィルムは、柔らかく、張力がこの値よりも大きくなると、さらに延びてしまうため、熱処理の効果が失われてしまうだけでなく、破断が起こるおそれがある。

[0136] 上述のようにして作成された有機圧電材料の両面には、電極が貼付けられた後に、絶縁部材による圧迫下で、その電極間に電圧が印加されることによって分極処理が施される。一般に、圧電材料は、電場応答に対して変形応答する特性を持っている材料である。そのため、分極処理中における電場によっても変形応答する。すなわち、材料に電場を加えて分極処理を施すことで圧電材料としての特性を付与するその最中にも、電場によって変形してしまう。このため、材料は、しばしば分極処理後に変形して、初期の形状を保たないことがある。そこで本実施形態では、その分極中の変形を抑制するため

に、上述のように圧迫をしつつ、分極処理を行うことで、より変形の少ない、好ましくは分極処理前後での平面性が保たれ、かつ高い圧電特性を有する有機圧電材料が得られる。

[0137] ここで、押圧力、すなわち、押圧する圧力は、少なくとも 0.98 MPa (10 kg/cm^2) 以上、 9.8 MPa (100 kg/cm^2) 以下であることが好ましい。これは、 0.98 MPa (10 kg/cm^2) 以上とすることで変形を抑えることができ、 9.8 MPa (100 kg/cm^2) 以下とすることで厚さ方向の変形の発生を防止したり、初期の厚さを保つことができ、もしくは分極処理の印加電流が短絡することを防止できるためである。本実施形態にかかる分極処理方法として、公知の直流電圧印加処理、もしくは交流電圧印加処理等の電圧印加処理の方法が適用され得る。

[0138] 以下に、有機圧電材料の具体的な例を挙げて本実施形態を説明するが、これらに限定されるものではない。本実施形態では、有機圧電材料として、P (VDF-TrFE) が用いられる。その合成方法は、以下のとおりである。内容積 14 L のステンレス製の耐圧オートクレーブに、フッ化ビニリデン (VDF; シグマアルドリッチ社製) 70 部 (3000 g)、3フッ化エチレン (TrFE; シグマアルドリッチ社製) 30 部、純水 210 部、メチルセルロース (東京化成社製) 0.1 部、ピロリン酸ナトリウム (太平化学産業社製) 0.2 部、ジノルマルプロピルパーオキシジカーボネート (日油株式会社製) 0.61 部が入れられ、 25°C で重合が開始された。3時間の間では酢酸エチル 3.0 部が添加され、重合反応が継続された。その後オートクレーブの内圧が 25 kg/cm^2 に低下した時点で、未反応物が回収され、重合物の脱水、水洗が順に3回繰り返された後、減圧乾燥が行われた。収率は、 26% であった。得られた P (VDF-TrFE) について評価を行うと、分子量は、 255000 であり、分散は、 2.4 であった。

[0139] なお、重量平均分子量 (M_n) および分子量分布 (M_w/M_n) は、下記の要領で、ゲルパーミエーションクロマトグラフィー (GPC) によって算出された。測定条件は、以下の通りである。

[0140] 溶媒 : 30mM LiBr in N-メチルピロリドン
装置 : HLC-8220GPC (東ソー (株) 製)
カラム : TSK gel Super AWM-H × 2本 (東ソー (株) 製)

カラム温度 : 40°C

試料濃度 : 1.0 g/L

注入量 : 40 μl

流量 : 0.5 ml/min

校正曲線 : 標準ポリスチレン : PS-1 (Polymer Laboratories社製) Mw=580~2,560,000までの9サンプルによる校正曲線が使用された。

[0141] 組成は、¹H-NMRによって決定された。得られたP(VDF-TrFE)の3wt%重ジメチルスルホキシド溶液が調製され、サンプル管に入れられ、NMR (核磁気共鳴) 装置 (Varian 400-MR、Varian社製) によって400MHzの周波数で解析された。得られたデータ (図26参照) の解析から、5.3-6.0ppm付近に現れるTrFEに特有のプロトンのシグナルと、2.3-3.3ppm付近に現れるVDFに特有のプロトンのシグナルとの比によって、VDF/TrFE=3/1と決定された。

[0142] また同様にして、VDFのホモポリマーPVDFも重合された。GPC評価から分子量は、200000であり、分散は、2.1であった。

[0143] 得られたP(VDF-TrFE)は、メチルエチルケトン (関東化学社製) を溶媒とし、乾燥膜厚40±1 μmとなるようにガラス板に塗布され、60°Cで30分乾燥され、有機圧電膜が作製された。

[0144] そして、そのP(VDF-TrFE) (膜厚: 40±1 μm) の表面に、厚さ0.1 μmのクロム電極が蒸着によって形成された後に、厚さ0.2 μmの金電極が蒸着によって形成され、有機圧電膜の両端部を除く部分に30 kgf/cm²の圧力が均一に加わるようアクリル製の板で挟み込まれ、有機

圧電膜の厚さ方向に電圧が印加されるように、有機圧電膜の一方の電極層がグラウンドにされ、他方がファンクションジェネレータ（20MHz Function / Arbitrary Waveform Generator 33220A; Agilent Technology（株）製）とパワーアンプ（AC/DC AMPLIFIER HVA4321; nF社製）に接続された。続いて、0.1HzのSin波印加条件下、20秒おきに電圧が100Vずつ昇圧され、最大100MV/mの電場が印加され、ポーリング処理が施された。その後、電極が、3-メルカプトプロピルトリメトキシシランの1%（メタノール-pH4酢酸ナトリウム水溶液）混合溶液中に5分浸漬され、乾燥後に水洗され、再度乾燥され、表面処理が行われた。

[0145] その有機圧電膜は、3層または6層積層され、電極を含めて0.12mmの厚さで、表裏の電極のオーバーラップ部分（電圧印加範囲）が3.3mmとされた。その積層の際、該有機圧電膜の分極方向は、3層では前述の図16の同方行、同方行、逆方行とされ、6層では前述の図8の同方行、同方行、逆方行、逆方行、…とされた。なお、比較例として、3層で、前述の図18で示す同方行、逆方行、同方行のものや、無機材料のPZTを使用したものも作成された。積層時に用いた接着剤は、エポキシ系接着剤であり、加圧圧力は、30kgf/cm²の圧力で厚み方向に均一とされた。積層後、それは、ダイシングにより7.5mm×50mmのサイズに切り出され、側面電極が形成され、積層型圧電体1～4および積層型圧電体5, 6が作成された。

[0146] 以下に、これらの積層型圧電体1～6の評価方法について説明する。まず、有機圧電体自体が評価された。それには、その積層型圧電体1～6の側面に、電極がパターンニングされたFPC、および、背面に、3.0mm厚のバックリング層が順に接着され、超音波射出側に音響整合層（ML層）が接着された（積層型圧電体1, 2, 5, 6）。その後、長手方向に0.15mmピッチで30μmの厚みを有するブレードでダイシングが行われた。さらに、パリレン処理によって3μm程度の絶縁層が設けられ、音響整合層を積層

する場合には、さらにその上にレンズが接着された。その後、FPCにコネクタが接続され、こうして作成した超音波トランスデューサがケースに収められ、送受兼用の超音波探触子1～6が作成された。

[0147] その超音波探触子1～6に、パルサーレシーバー（PANAMETRIC S-NDT MODEL 5900PR、オリンパス社製、入力インピーダンス5000Ω）とオシロスコープ（TPS5032、Tektronix社製）が接続され、脱気した水の中に入れられ、超音波放射面側に金属製の反射板が配置された。この超音波探触子1～6は、符号化なしのパルス駆動の場合と、前記特開2003-225237号公報に記載の符号化パルスを用いる場合との2通りで駆動された。受信した超音波は、電気信号に変換され、オシロスコープでその電圧波形が観察された。超音波探触子と反射板とのアライメントは、電圧波形の実効値が最大となる座標で決定された。アライメントの後、超音波の送受信が行われ、図27が符号化なしの場合の受信波形であり、図28が符号化ありの場合の受信波形である。こうして得られたパルスについて、符号化パルスを用いたものはパルス圧縮が行われ、符号化パルスを用いなかったものはそのままのFFT解析をかけた帯域特性から、基本波における感度が求められた。その結果は、表1に示す通りである。

[0148]

[表1]

探触子	送受信材料	積層数	厚み [μ m]	分極 配列	符号化	ML層	送信 周波数 [MHz]	受信 周波数 [MHz]	送受信 感度 [dB]
1	PVDF	3	120	図16	なし	あり	15	15	-33
2	PZT	3	240	図16	なし	あり	12	12	-27
3	PVDF	3	120	図16	あり	なし	15	15	-21
4	PVDF	6	120	図8	あり	なし	15	15	-20
5(比較1)	PVDF	3	120	図18	なし	あり	18	18	-39
6(比較2)	PZT	3	240	図18	なし	あり	10	10	-35

[0149] 本結果より、上述の考え方に基づいた規則性を有する積層方法により作成した積層型圧電体 1 ～ 4 を搭載した超音波探触子 1 ～ 4 を用いることによっ

て、生体内で反射した高周波を感度良く受信することが可能であり、高解像・高分解能を有する診断画像が得られることが理解される。

[0150] 次に、これらの上述の積層型圧電体 1～6 が無機圧電体の上に搭載されて、送受別体として評価された。すなわち、図 24 の構造であり、無機の送信用圧電層 23 から上層の受信用圧電層への音の通りを良くするため、中間層（I L（Intermediate Layer））24 が存在する。すなわち、前述の積層型圧電体 1～6 の側面に、電極がパターンニングされた F P C、および、背面側に、中心周波数 5 M H z の P Z T 層およびバッキング層が順に接着され、必要に応じて超音波射出側に音響整合層が接着された。その後、長手方向に 0. 15 mm ピッチで 30 μ m の厚みを有するブレードでダイシングが行われた。さらに、パリレン処理によって 3 μ m 程度の絶縁層が設けられ、前記音響整合層を積層する場合には、さらにその上にレンズが接着された。その後、F P C にコネクタが接続され、こうして作成した超音波トランスデューサがケースに収められ、送受別体の超音波探触子 1～6 が作成された。

[0151] その超音波探触子 1～6 に、前述のパルサーレーシーバーおよびオシロスコープが接続され、その実験方法は、上述と同様である。得られたパルスについて、符号化パルスを用いたものはパルス圧縮が行われ、符号化パルスを用いなかったものはそのままの F F T 解析をかけた帯域特性から、3 次高調波帯域における感度が求められた。その結果は、表 2 に示す通りである。

[0152]

[表2]

探触子	受信材料	積層数	厚み [μ m]	分極 配列	符号化	ML層	送信 周波数 [MHz]	受信 周波数 [MHz]	3次高調波 受信感度 [dB]
1	PVDF	3	120	図16	なし	あり	5	15	+15
2	PZT	3	240	図16	なし	あり	4	12	+8
3	PVDF	3	120	図16	あり	なし	5	15	+30
4	PVDF	6	120	図8	あり	なし	5	15	+31
5(比較1)	PVDF	3	120	図18	なし	あり	6	18	+6
6(比較2)	PZT	3	240	図18	なし	あり	3.3	10	+2

[0153] 本結果より、上述の考え方に基づいた規則性を有する積層方法により作成した積層型圧電体1～4を搭載した超音波探触子1～4を用いることによって、生体内で生じた3次高調波を感度良く受信することが可能であり、高解

像・高分解能を有する診断画像が得られることが理解される。

[0154] 本明細書は、上記のように様々な態様の技術を開示しているが、そのうち主な技術を以下に纏める。

[0155] 一態様にかかる積層型圧電体は、互いに積層され、相互に厚みの等しい複数の圧電体と、互いに積層された前記複数の圧電体における層間および両端の圧電体の表面に配置された複数の電極と、互いに隣り合う前記圧電体における離反側の電極を連結することによって、前記各圧電体を相互に並列に接続する2組の連絡配線とを備え、前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、第1の共振モードにおける感度を減少するとともに、前記第1の共振モードよりも高次の第2の共振モードにおける感度を増大する方向に配列している。

[0156] このような構成の積層型圧電体は、各圧電体を所望の共振モードに応じた方向に配列しているので、所望の高周波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧が1次モードのそれらよりも大きくなるようにすることができる。とともに、電気インピーダンスを低下することができる。

[0157] また、他の一態様では、上述の積層型圧電体において、好ましくは、前記複数の圧電体は、2個であり、前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、互いに同方向となるように配列されている。

[0158] そして、他の一態様にかかる積層型圧電体の製造方法は、2層に積層され、相互に厚みの等しい圧電体を備え、該圧電体の厚み伸縮によって生じる3 λ /4共振による3次高調波成分の超音波を送受波する積層型圧電体の製造方法であって、前記各圧電体の層間および各外表面に形成される電極において、前記外表面の電極を連絡配線によって連結することで、前記各圧電体を相互に並列に接続し、前記両圧電体を、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、互いに同方向となるように配列する。

- [0159] このような構成の2層の積層型圧電体およびその製造方法では、各圧電体の層間および各外表面に形成される電極において、前記外表面の電極が、連絡配線によって連結され、各圧電体が、相互に並列に接続される。そして、両圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、互いに同方向となるように、配列される。
- [0160] したがって、このような構成の2層の積層型圧電体は、フィルタやアンプ等を用いることなく、 $\lambda/4$ 共振モードの場合に比べて前記 $3\lambda/4$ 共振モードの共振による3次高調波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧を大きくすることができるとともに、1次モードの信号を減衰させることができる。また、このような構成の2層の積層型圧電体は、圧電体の並列数、すなわち積層枚数が2つであるので、電気インピーダンスを $1/2$ に下げることができ、有機圧電体等の誘電率が低く、キャパシタンスの小さい圧電体に有利である。そして、上記構成の製造方法は、このような作用効果を奏する2層の積層型圧電体が提供される。
- [0161] また、他の一態様では、上述の積層型圧電体において、好ましくは、前記複数の圧電体は、3個であり、前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3段目の圧電体では逆方向となるように配列されている。
- [0162] そして、他の一態様にかかる積層型圧電体の製造方法は、複数層に積層され、相互に厚みの等しい圧電体を備え、該圧電体の厚み伸縮によって生じる $3\lambda/4$ 共振による3次高調波成分の超音波を送受波する積層型圧電体の製造方法であって、前記圧電体を3層に積層し、各圧電体の層間および両端の圧電体の表面に形成される電極において、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極を連絡配線によって連結することで、前記各圧電体を相互に並列に接続し、前記各圧電体を、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、固定端側の第1段目の圧電体の

軸を基準として、前記第 1 段目の圧電体に接する第 2 段目の圧電体では同方向、前記第 2 段目の圧電体に接する第 3 段目の圧電体では逆方向となるように配列する。

[0163] このような構成の 3 層の積層型圧電体およびその製造方法では、各圧電体の層間および両端の圧電体の表面に形成される電極において、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極が、連絡配線によって連結され、各圧電体が、相互に並列に接続される。そして、各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、前記第 1 段目の圧電体に接する第 2 段目の圧電体では同方向、前記第 2 段目の圧電体に接する第 3 段目の圧電体では逆方向となるように、配列される。

[0164] したがって、このような構成の 3 層の積層型圧電体は、フィルタやアンプ等を用いることなく、 $\lambda/4$ 共振モードの場合に比べて前記 3 次高調波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧を大きくすることができるとともに、1 次モードの信号を減衰させることができる。また、このような構成の 3 層の積層型圧電体は、圧電体の並列数、すなわち積層枚数が 3 つであるので、電気インピーダンスを $1/3$ に下げることができ、有機圧電体等の誘電率が低く、キャパシタンスの小さい圧電体に有利である。そして、上記構成の製造方法は、このような作用効果を奏する 3 層の積層型圧電体が提供される。

[0165] また、他の一態様では、上述の積層型圧電体において、好ましくは、前記複数の圧電体は、4 個以上であり、前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、前記第 1 段目の圧電体に接する第 2 段目の圧電体では同方向、前記第 2 段目の圧電体に接する第 3 および第 4 段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように配列されている。そして、上述の積層型圧電体において、好ましくは、前記圧電体の厚み方向における伸縮によって 3 次以上の共振モードの超音波を送受波する。

[0166] そして、他の一態様にかかる積層型圧電体の製造方法は、4層以上に積層され、相互に厚みの等しい圧電体を備える積層型圧電体の製造方法であって、積層された各圧電体の層間および両端の圧電体の表面に形成される電極において、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極を連絡配線によって連結することで、前記複数の圧電体を相互に並列に接続し、前記各圧電体を、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3および第4段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように配列する。

[0167] このような構成の4層以上の積層型圧電体およびその製造方法では、積層された各圧電体の層間および両端の圧電体の表面に形成される電極において、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極が、連絡配線によって連結され、前記複数の圧電体が、相互に並列に接続される。そして、各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3および第4段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように、配列される。

[0168] したがって、このような構成の4層以上の積層型圧電体は、フィルタやアンプ等を用いることなく、 $\lambda/4$ 共振モードの場合に比べて例えば $5\lambda/4$ 共振モード等の高次共振モードの共振における高調波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧を大きくすることができるとともに、1次モードの信号を減衰させることができる。また、このような構成の4層以上の積層型圧電体は、圧電体の並列数、すなわち積層枚数を n とする場合に、電気インピーダンスを $1/n$ に下げることができ、有機圧電体等の誘電率が低く、キャパシタンスの小さい圧電体に有利である。そして、上記構成の製造方法は、このような作用効果を奏する4層以上の積層型圧電体が提供される。

[0169] また、他の一態様では、これら上述の積層型圧電体において、好ましくは、前記各圧電体は、さらに厚み方向に2個に分割されて、それらが互いに並列に接続されたものが1組として積層され、前記分割された圧電体のそれぞれについて、前記残留分極の向きあるいは結晶軸が、該積層型圧電体内の歪み分布における電気変位または電場の符号と一致するように、その表裏が反転されている。

[0170] そして、他の一態様では、これら上述の積層型圧電体の製造方法において、好ましくは、前記各圧電体は、さらに厚み方向に2個に分割され、互いに並列に接続されたものが1組として積層され、前記分割された圧電体のそれぞれについて、前記残留分極の向きあるいは結晶軸が、該積層型圧電体内の歪み分布における電気変位または電場の符号と一致するように、その表裏を反転する。

[0171] このような構成の積層型圧電体およびその製造方法では、各圧電体が2枚に分割され、互いに並列に接続されたものが1組として扱われる。

[0172] したがって、このような構成の積層型圧電体は、電気インピーダンスをさらに半減することができるとともに、両端の電極が同電位となって該積層圧電体全体を電氣的にシールドすることもできる。そして、上記構成の製造方法は、このような作用効果を奏する積層型圧電体が提供される。

[0173] また、他の一態様にかかる超音波トランスデューサは、これら上述のいずれかの積層型圧電体を用いるものである。

[0174] このような構成の超音波トランスデューサは、フィルタやアンプなどを用いることなく、 $\lambda/4$ 共振モードの場合に比べて、高調波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧を大きくすることができるとともに、1次モードの信号を減衰させることができ、さらにまた電気インピーダンスを低下することができる。

[0175] また、他の一態様にかかる超音波診断装置は、測定対象である被検体内に超音波を送信し、前記被検体から来た超音波を受信する超音波トランスデューサと、前記超音波トランスデューサに送信用の超音波信号を与える送信部

と、前記超音波トランスデューサで受信された受信信号に所定の信号処理を施す受信部と、前記受信部からの受信信号に基づいて、前記被検体の内部状態を断層画像として画像化する画像処理部とを備え、前記超音波トランスデューサは、互いに積層され、相互に厚みの等しい複数の圧電体と、互いに積層された前記複数の圧電体における層間および両端の圧電体の表面に配置された複数の電極と、互いに隣り合う前記圧電体における離反側の電極を連結することによって、前記各圧電体を相互に並列に接続する２組の連絡配線とを備える積層型圧電体であって、前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第１段目の圧電体の軸を基準として、第１の共振モードにおける感度を減少するとともに、前記第１の共振モードよりも高次の第２の共振モードにおける感度を増大する方向に配列している。

[0176] このような構成の超音波診断装置は、超音波トランスデューサがその各圧電体を所望の共振モードに応じた方向に配列しているので、所望の高周波成分の送波時の出力音圧あるいは受波時の出力電圧が１次モードのそれらよりも大きくなるようにすることができるとともに、電気インピーダンスを低下することができる。このため、このような構成の超音波診断装置は、インピーダンスマッチングが容易になるとともに、S/Nを向上することができる。

[0177] また、他の一態様では、上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記超音波トランスデューサにおける前記複数の圧電体は、２個であり、前記超音波トランスデューサにおける前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、互いに同方向となるように配列されている。

[0178] このような構成の超音波診断装置では、超音波トランスデューサが２層の積層型圧電体を備えて構成され、３次モード成分の超音波を送受波させるために、各圧電体の残留分極あるいは結晶のＣ軸やＡ軸の向きが、圧電正効果による電気変位や電場の符号に一致させている。このため、このような構成

の超音波診断装置は、2層の積層型圧電体を備えて、3次モード成分の超音波を効果的に送受波することができるとともに、電気インピーダンスを低下することができる。

[0179] また、他の一態様では、上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記超音波トランスデューサにおける前記複数の圧電体は、3個であり、前記超音波トランスデューサにおける前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3段目の圧電体では逆方向となるように配列されている。

[0180] このような構成の超音波診断装置では、超音波トランスデューサが3層の積層型圧電体を備えて構成され、3次モード成分の超音波を送受波させるために、各圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きが、圧電正効果による電気変位や電場の符号に一致させている。このため、このような構成の超音波診断装置は、3層の積層型圧電体を備えて、3次モード成分の超音波を効果的に送受波することができるとともに、電気インピーダンスを低下することができる。

[0181] また、他の一態様では、上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記超音波トランスデューサにおける前記複数の圧電体は、4個以上であり、前記超音波トランスデューサにおける前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3および第4段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように配列されている。

[0182] このような構成の超音波診断装置では、超音波トランスデューサが4層以上の積層型圧電体を備えて構成され、3次モード成分の超音波を送受波させるために、各圧電体の残留分極あるいは結晶のC軸やA軸の向きが、圧電正効果による電気変位や電場の符号に一致させている。このため、このような

構成の超音波診断装置は、4層以上の積層型圧電体を備えて、3次モード成分の超音波を効果的に送受波することができるとともに、電気インピーダンスを低下することができる。

[0183] また、他の一態様では、これら上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記超音波トランスデューサにおける前記積層型圧電体は、超音波の送受信に共用され、該超音波トランスデューサは、 $3\lambda/4$ 共振モードによる超音波を送信する。

[0184] 上記構成によれば、送受信共に $3\lambda/4$ 共振モードを使用して、高周波、すなわち高解像なイメージングに好適な超音波探触子を備えた超音波診断装置が実現される。

[0185] また、他の一態様では、これら上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記超音波トランスデューサにおける前記積層型圧電体は、第1の圧電体として超音波の受信に用いられ、該超音波トランスデューサは、 $\lambda/4$ 共振モードによる基本波成分の超音波を送信する第2の圧電体をさらに備え、背後層側から、前記第2の圧電体および第1の圧電体の順で積層されている。

[0186] 上記構成によれば、送信用と受信用とにそれぞれ適した圧電体を用いることができ、大パワー送信を行い、被検体で発生した高調波を高利得で受信するハーモニックイメージングに好適な超音波探触子を備えた超音波診断装置が実現される。

[0187] また、他の一態様では、これら上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記超音波トランスデューサにおける前記積層型圧電体は、第1の圧電体として超音波の受信に用いられ、該超音波トランスデューサは、 $\lambda/4$ 共振モードによる基本波成分の超音波を送信する2つの第2の圧電体をさらに備え、前記第1の圧電体の両側に、前記第2の圧電体が並設されている。

[0188] 上記構成によれば、送信用と受信用とにそれぞれ適した圧電体を用いることができ、大パワー送信を行い、被検体で発生した高調波を高利得で受信するハーモニックイメージングに好適な超音波探触子を備えた超音波診断装置

が実現される。

[0189] また、他の一態様では、これら上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記第 1 の圧電体は、有機高分子を主成分とする材料から成る。

[0190] 上記構成によれば、有機高分子圧電体は、高周波の信号を扱うことができ、前記高調波の受信に好適である。したがって、受信用に有機圧電体を用いることで、前述のように大パワー送信を行い、被検体で発生した高調波を高利得で受信するハーモニクイメーキングに好適な超音波探触子を備えた超音波診断装置が実現される。

[0191] また、他の一態様では、これら上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記第 2 の圧電体は、無機材料から成り、前記第 1 の圧電体は、有機高分子を主成分とする材料から成り、前記第 1 の圧電体と被検体との間に音響整合を目的とした部材を介在しない。

[0192] 上記構成によれば、無機および有機の積層圧電体において、被検体側が音響インピーダンスの低い有機圧電体であるので、生体などの被検体との間に音響インピーダンス整合を目的とした部材を省略することができる。したがって、このような構成の超音波診断装置は、その超音波トランスデューサにおいて、該有機圧電体と被検体との間に、インピーダンスマッチングのための音響整合層を不要にすることができ、構造を簡略化することができる。

[0193] また、他の一態様では、これら上述の超音波診断装置において、好ましくは、前記送信部は、送信信号を符号化されたパルス電圧として前記超音波トランスデューサの前記積層型圧電体に与え、前記受信部は、前記超音波トランスデューサの前記積層型圧電体で受信した信号をパルス圧縮処理を行い、前記画像処理部に画像化させる。

[0194] このような構成の超音波診断装置は、その超音波トランスデューサにおいて、被検体に与える影響が無闇に大きくなることなく、大振幅、すなわち S/N の良好な受信パルスを得ることができる。

[0195] この出願は、2010 年 3 月 31 日に提出された日本国特許出願特願 2010-84018 および 2010 年 3 月 31 日に提出された日本国特許出願

特願 2 0 1 0 - 8 4 5 3 3 を基礎とするものであり、その内容は、本願に含まれるものである。

[0196] 本発明を表現するために、上述において図面を参照しながら実施形態を通して本発明を適切且つ十分に説明したが、当業者であれば上述の実施形態を変更および／または改良することは容易に為し得ることであると認識すべきである。したがって、当業者が実施する変更形態または改良形態が、請求の範囲に記載された請求項の権利範囲を離脱するレベルのものでない限り、当該変更形態または当該改良形態は、当該請求項の権利範囲に包括されると解釈される。

産業上の利用可能性

[0197] 本発明によれば、積層型圧電体および積層型圧電体の製造方法ならびに前記積層型圧電体を用いた超音波トランスデューサおよび超音波診断装置を提供することができる。

請求の範囲

[請求項1]

互いに積層され、相互に厚みの等しい複数の圧電体と、
互いに積層された前記複数の圧電体における層間および両端の圧電体の表面に配置された複数の電極と、
互いに隣り合う前記圧電体における離反側の電極を連結することによって、前記各圧電体を相互に並列に接続する2組の連絡配線とを備え、
前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、第1の共振モードにおける感度を減少するとともに、前記第1の共振モードよりも高次の第2の共振モードにおける感度を増大する方向に配列していること
を特徴とする積層型圧電体。

[請求項2]

前記複数の圧電体は、2個であり、
前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、互いに同方向となるように配列されていること
を特徴とする請求項1に記載の積層型圧電体。

[請求項3]

前記複数の圧電体は、3個であり、
前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3段目の圧電体では逆方向となるように配列されていること
を特徴とする請求項1に記載の積層型圧電体。

[請求項4]

前記複数の圧電体は、4個以上であり、
前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電

体の軸を基準として、前記第 1 段目の圧電体に接する第 2 段目の圧電体では同方向、前記第 2 段目の圧電体に接する第 3 および第 4 段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように配列されていること

を特徴とする請求項 1 に記載の積層型圧電体。

[請求項 5] 前記第 2 の共振モードは、圧電体の厚み方向における伸縮によって生じる 3 次以上の共振モードであること

を特徴とする請求項 4 に記載の積層型圧電体。

[請求項 6] 前記各圧電体は、さらに厚み方向に 2 個に分割されて、それらが互いに並列に接続されたものが 1 組として積層され、

前記分割された圧電体のそれぞれについて、前記残留分極の向きあるいは結晶軸が、該積層型圧電体内の歪み分布における電気変位または電場の符号と一致するように、その表裏が反転されていること

を特徴とする請求項 3 ないし請求項 5 のいずれか 1 項に記載の積層型圧電体。

[請求項 7] 2 層に積層され、相互に厚みの等しい圧電体を備え、該圧電体の厚み伸縮によって生じる $3\lambda/4$ 共振による 3 次高調波成分の超音波を送受波する積層型圧電体の製造方法であって、

前記各圧電体の層間および各外表面に形成される電極において、前記外表面の電極を連絡配線によって連結することで、前記各圧電体を相互に並列に接続し、

前記両圧電体を、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、互いに同方向となるように配列すること

を特徴とする積層型圧電体の製造方法。

[請求項 8] 複数層に積層され、相互に厚みの等しい圧電体を備え、該圧電体の厚み伸縮によって生じる $3\lambda/4$ 共振による 3 次高調波成分の超音波を送受波する積層型圧電体の製造方法であって、

前記圧電体を 3 層に積層し、

各圧電体の層間および両端の圧電体の表面に形成される電極において、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極を連絡配線によって連結することで、前記各圧電体を相互に並列に接続し、

前記各圧電体を、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、前記第 1 段目の圧電体に接する第 2 段目の圧電体では同方向、前記第 2 段目の圧電体に接する第 3 段目の圧電体では逆方向となるように配列すること

を特徴とする積層型圧電体の製造方法。

[請求項9]

4 層以上に積層され、相互に厚みの等しい圧電体を備える積層型圧電体の製造方法であって、

積層された各圧電体の層間および両端の圧電体の表面に形成される電極において、互いに隣り合う圧電体における離反側の電極を連絡配線によって連結することで、前記複数の圧電体を相互に並列に接続し、

前記各圧電体を、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸が、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、前記第 1 段目の圧電体に接する第 2 段目の圧電体では同方向、前記第 2 段目の圧電体に接する第 3 および第 4 段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように配列すること

を特徴とする積層型圧電体の製造方法。

[請求項10]

前記各圧電体は、さらに厚み方向に 2 個に分割され、互いに並列に接続されたものが 1 組として積層され、

前記分割された圧電体のそれぞれについて、前記残留分極の向きあるいは結晶軸が、該積層型圧電体内の歪み分布における電気変位または電場の符号と一致するように、その表裏を反転すること

を特徴とする請求項 8 または請求項 9 に記載の積層型圧電体の製造方法。

[請求項11] 前記請求項 1 ないし請求項 6 のいずれか 1 項に記載の積層型圧電体を用いることを特徴とする超音波トランスデューサ。

[請求項12] 測定対象である被検体内に超音波を送信し、前記被検体から来た超音波を受信する超音波トランスデューサと、

前記超音波トランスデューサに送信用の超音波信号を与える送信部と、

前記超音波トランスデューサで受信された受信信号に所定の信号処理を施す受信部と、

前記受信部からの受信信号に基づいて、前記被検体の内部状態を断層画像として画像化する画像処理部とを備え、

前記超音波トランスデューサは、

互いに積層され、相互に厚みの等しい複数の圧電体と、互いに積層された前記複数の圧電体における層間および両端の圧電体の表面に配置された複数の電極と、互いに隣り合う前記圧電体における離反側の電極を連結することによって、前記各圧電体を相互に並列に接続する 2 組の連絡配線とを備える積層型圧電体であって、

前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第 1 段目の圧電体の軸を基準として、第 1 の共振モードにおける感度を減少するとともに、前記第 1 の共振モードよりも高次の第 2 の共振モードにおける感度を増大する方向に配列していること

を特徴とする超音波診断装置。

[請求項13] 前記超音波トランスデューサにおける前記複数の圧電体は、2 個であり、

前記超音波トランスデューサにおける前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、互いに同方向となるように配列されていること

を特徴とする請求項 1 2 に記載の超音波診断装置。

[請求項14] 前記超音波トランスデューサにおける前記複数の圧電体は、3個であり、

前記超音波トランスデューサにおける前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3段目の圧電体では逆方向となるように配列されていること

を特徴とする請求項12に記載の超音波診断装置。

[請求項15] 前記超音波トランスデューサにおける前記複数の圧電体は、4個以上であり、

前記超音波トランスデューサにおける前記各圧電体は、圧電正効果による電気変位または電場の符号と関係する残留分極の向きあるいは結晶軸を、固定端側の第1段目の圧電体の軸を基準として、前記第1段目の圧電体に接する第2段目の圧電体では同方向、前記第2段目の圧電体に接する第3および第4段目の圧電体では逆方向となる周期性を持つように配列されていること

を特徴とする請求項12に記載の超音波診断装置。

[請求項16] 前記超音波トランスデューサにおける前記積層型圧電体は、超音波の送受信に共用され、該超音波トランスデューサは、 $3\lambda/4$ 共振モードによる超音波を送信すること

を特徴とする請求項13または請求項14に記載の超音波診断装置。

[請求項17] 前記超音波トランスデューサにおける前記積層型圧電体は、第1の圧電体として超音波の受信に用いられ、該超音波トランスデューサは、 $\lambda/4$ 共振モードによる基本波成分の超音波を送信する第2の圧電体をさらに備え、背後層側から、前記第2の圧電体および第1の圧電体の順で積層されていること

を特徴とする請求項 13 ないし請求項 15 のいずれか 1 項に記載の超音波診断装置。

[請求項18] 前記超音波トランスデューサにおける前記積層型圧電体は、第 1 の圧電体として超音波の受信に用いられ、該超音波トランスデューサは、 $\lambda/4$ 共振モードによる基本波成分の超音波を送信する 2 つの第 2 の圧電体をさらに備え、前記第 1 の圧電体の両側に、前記第 2 の圧電体が並設されていること

を特徴とする請求項 13 ないし請求項 15 のいずれか 1 項に記載の超音波診断装置。

[請求項19] 前記第 1 の圧電体は、有機高分子を主成分とする材料から成ることを特徴とする請求項 17 または請求項 18 に記載の超音波診断装置。

[請求項20] 前記第 2 の圧電体は、無機材料から成り、前記第 1 の圧電体は、有機高分子を主成分とする材料から成り、前記第 1 の圧電体と被検体との間に音響整合を目的とした部材を介在しないこと

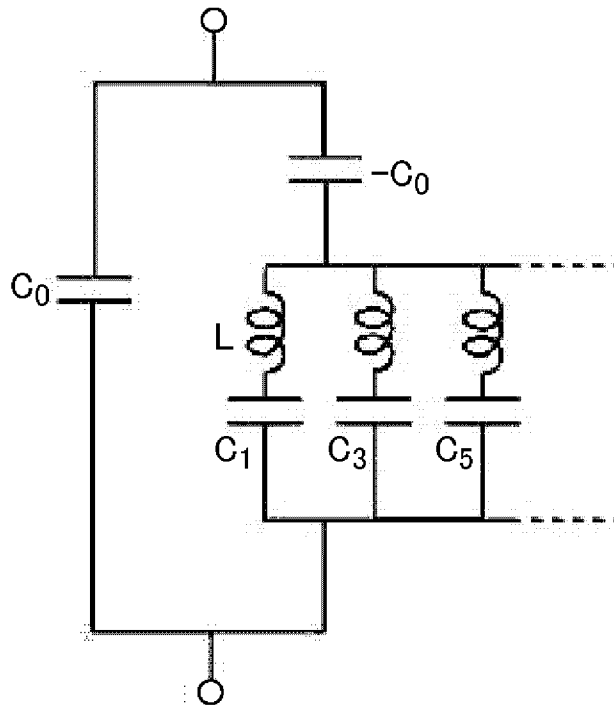
を特徴とする請求項 17 に記載の超音波診断装置。

[請求項21] 前記送信部は、送信信号を符号化されたパルス電圧として前記超音波トランスデューサの前記積層型圧電体に与え、

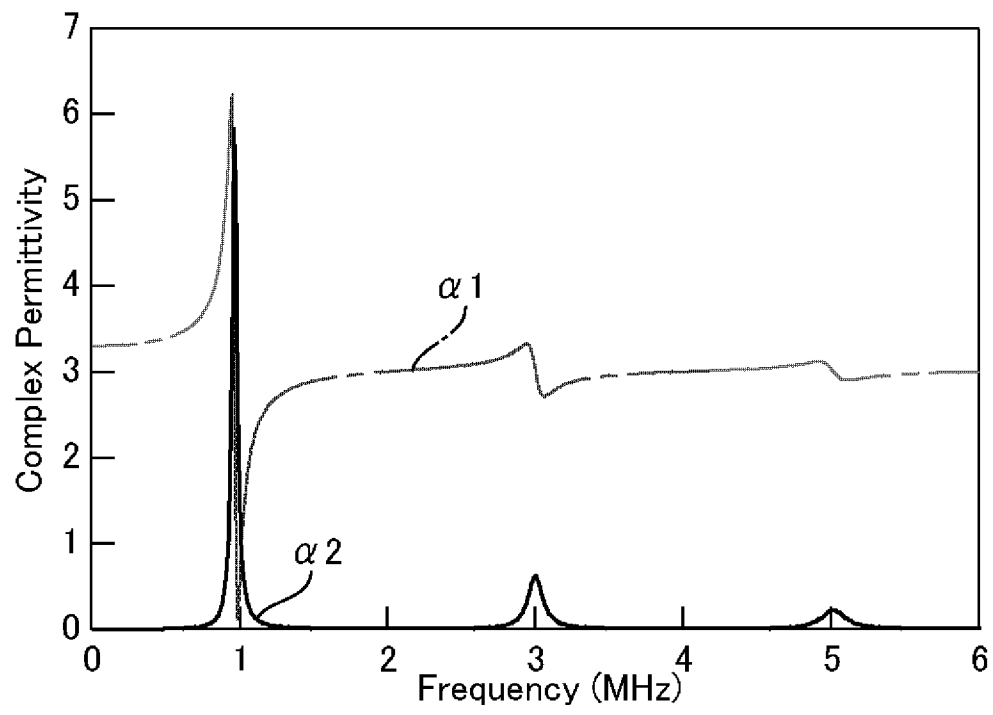
前記受信部は、前記超音波トランスデューサの前記積層型圧電体で受信した信号をパルス圧縮処理を行い、前記画像処理部に画像化させること

を特徴とする請求項 12 ないし請求項 20 のいずれか 1 項に記載の超音波診断装置。

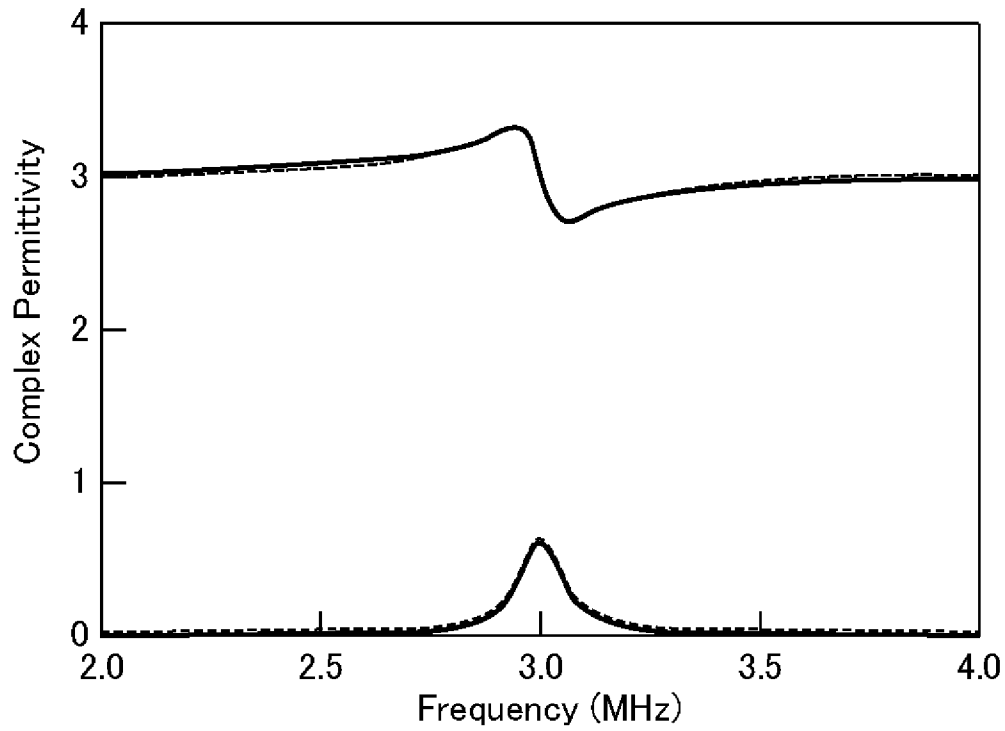
[図1]



[図2]



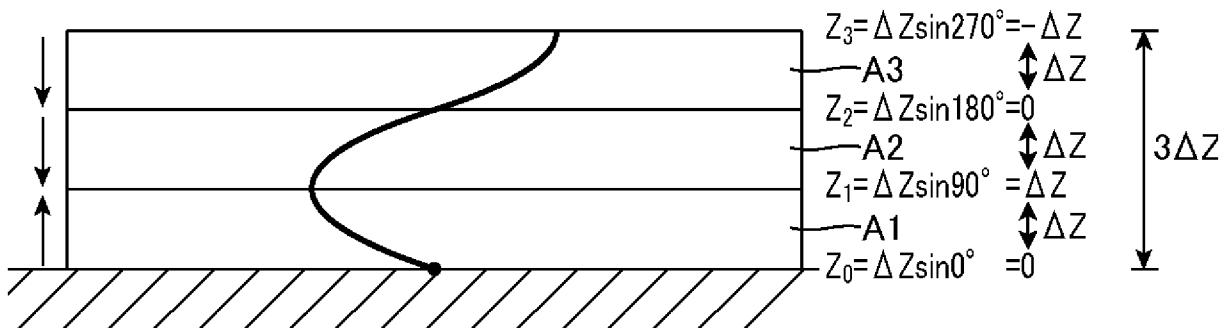
[図3]



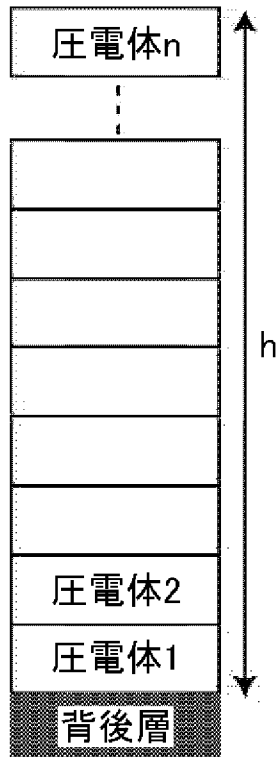
[図4]



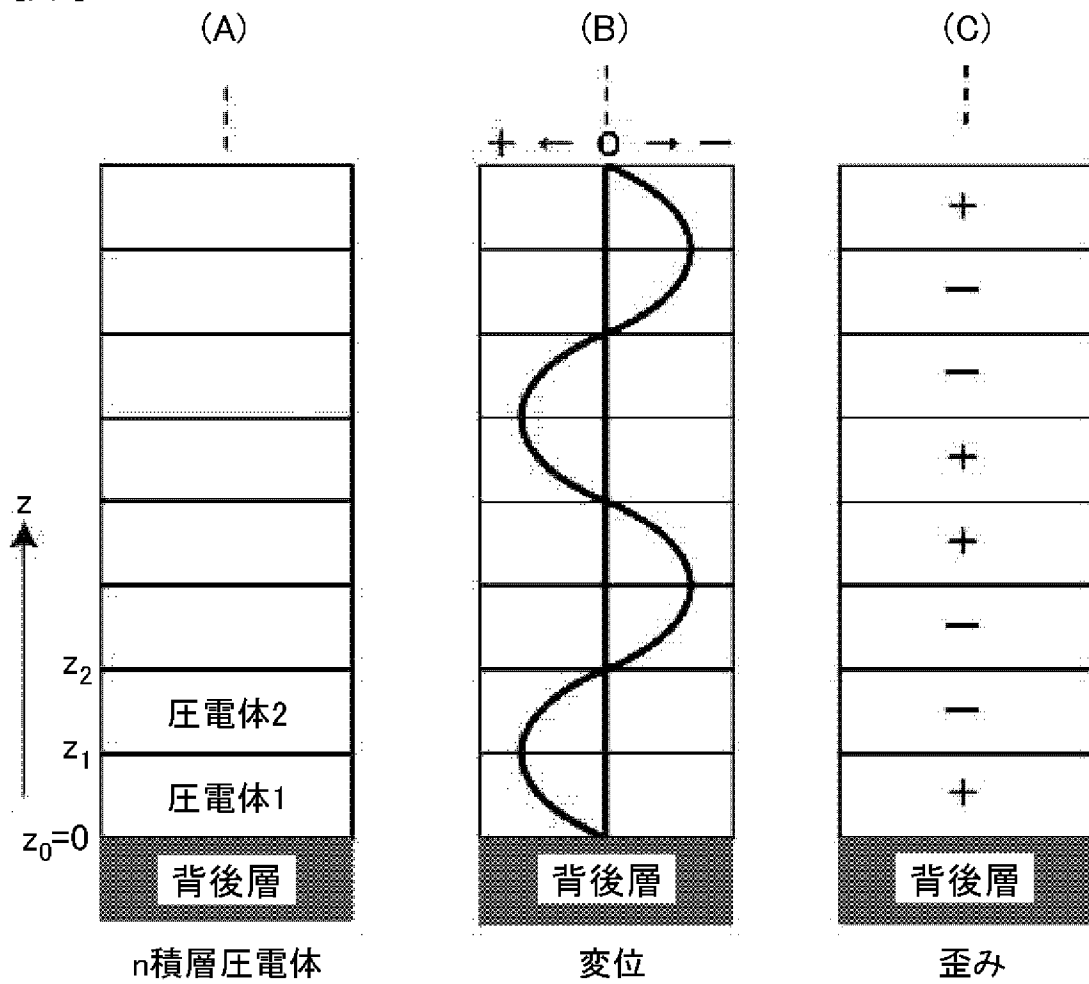
[図5]



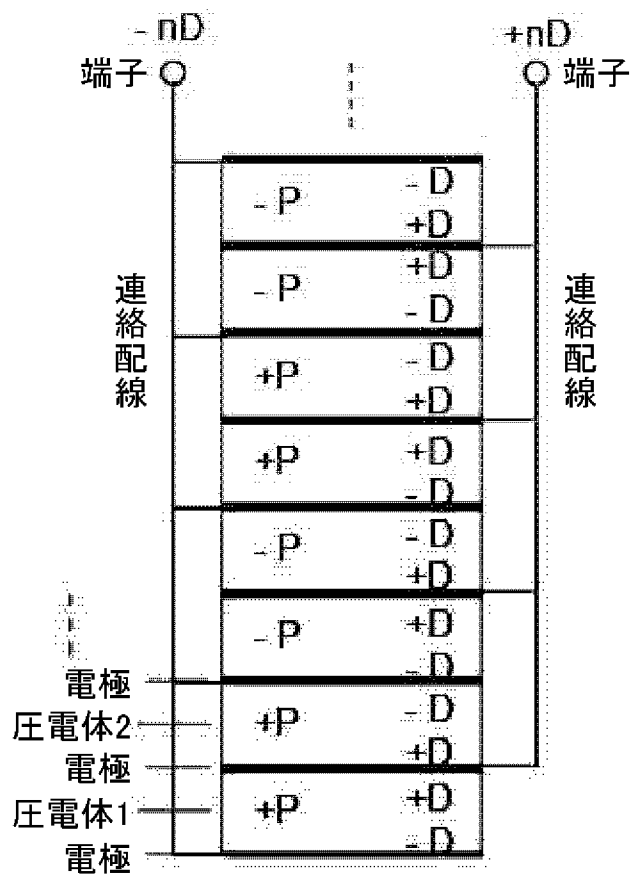
[図6]



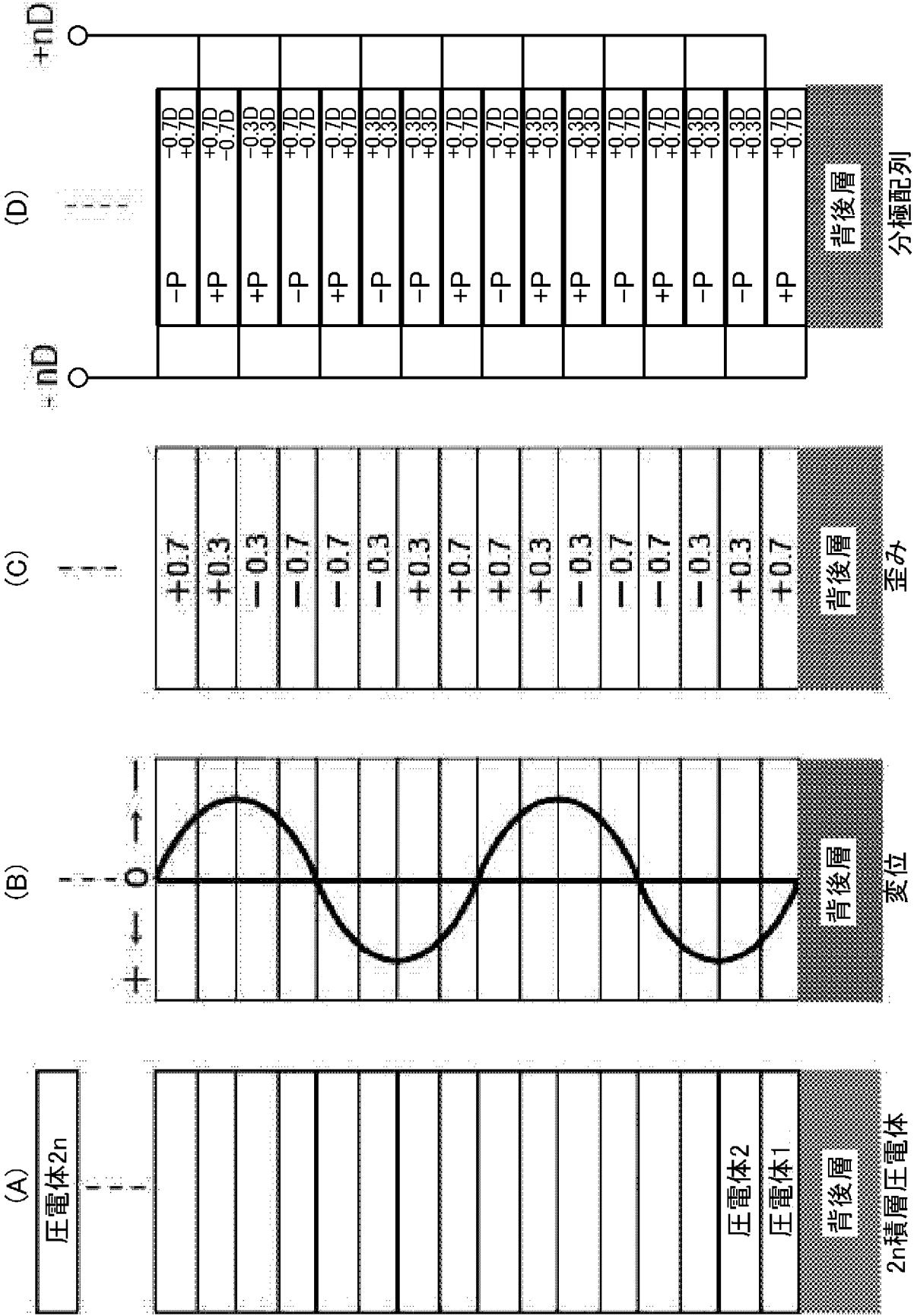
[図7]



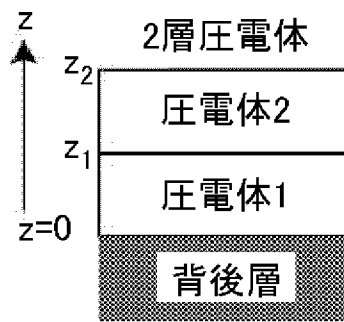
[図8]



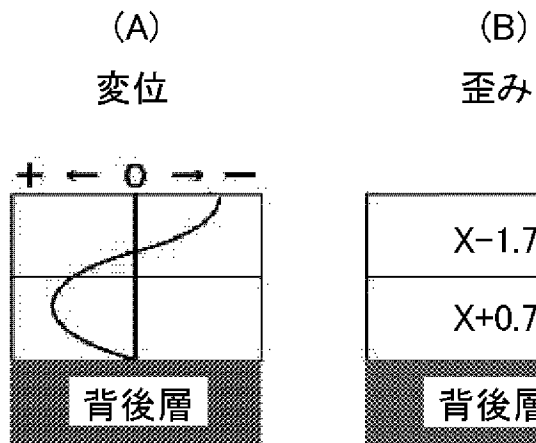
[図9]



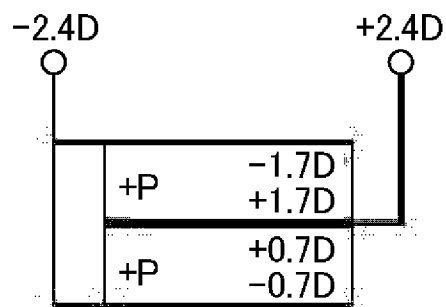
[図10]



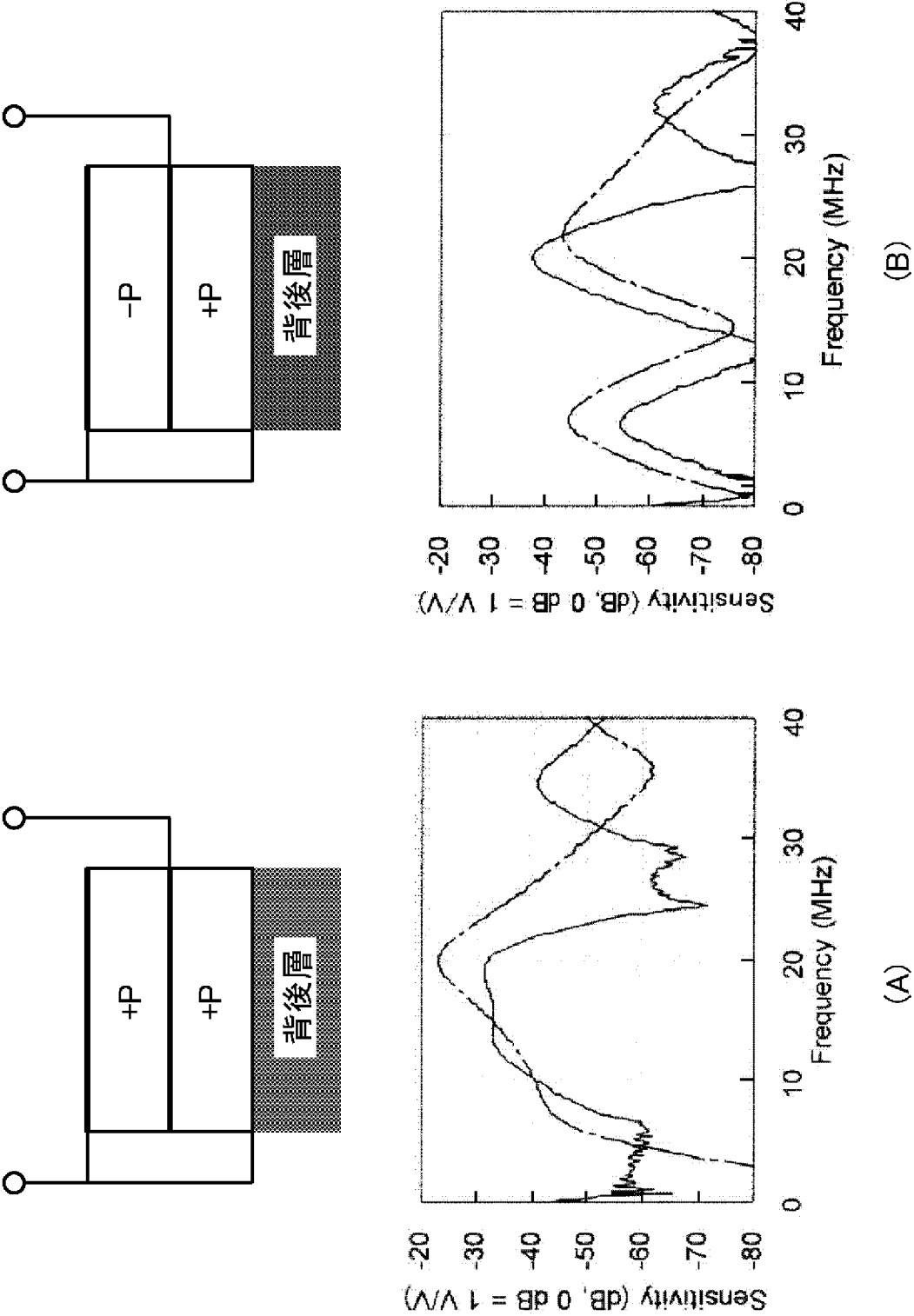
[図11]



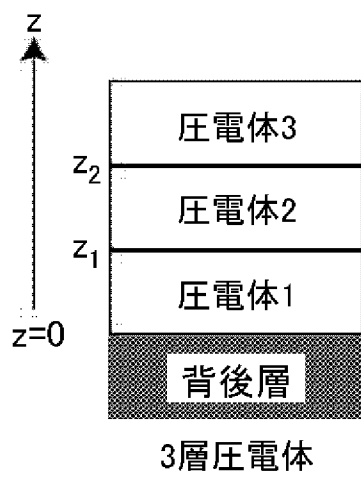
[図12]



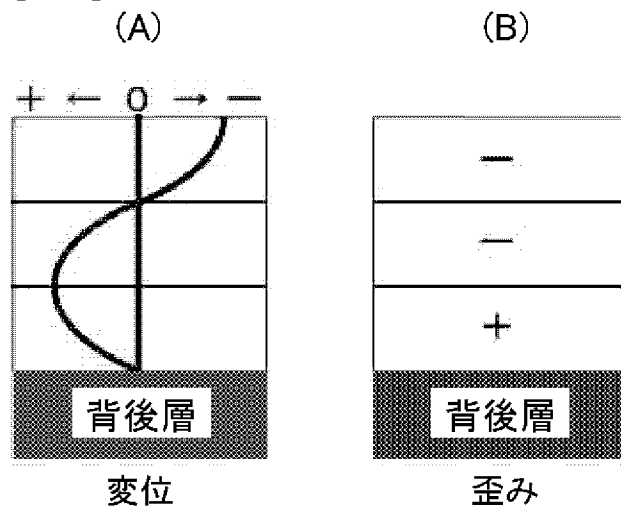
[図13]



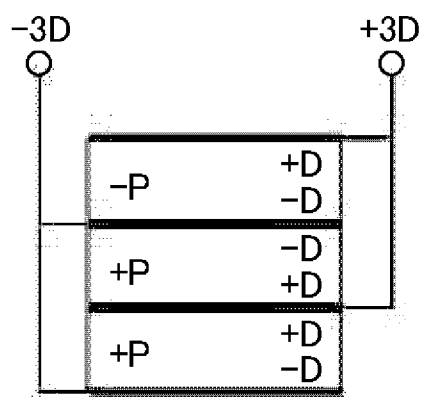
[図14]



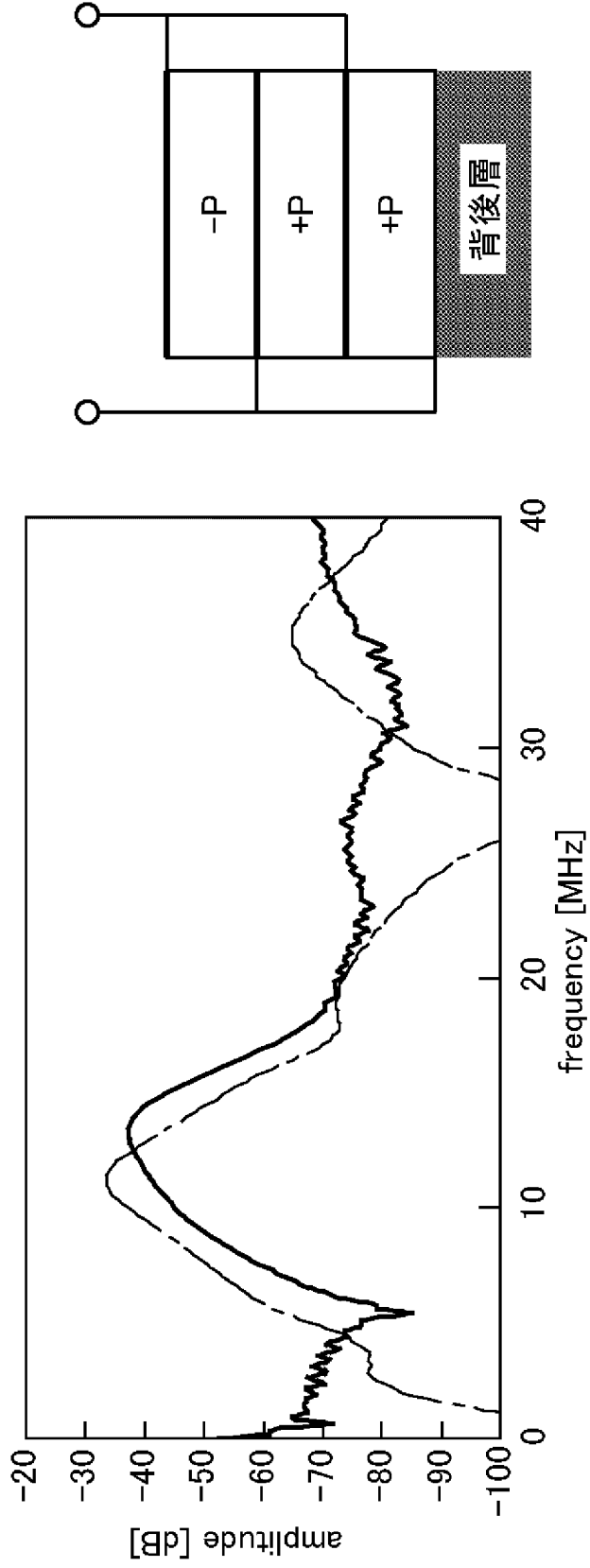
[図15]



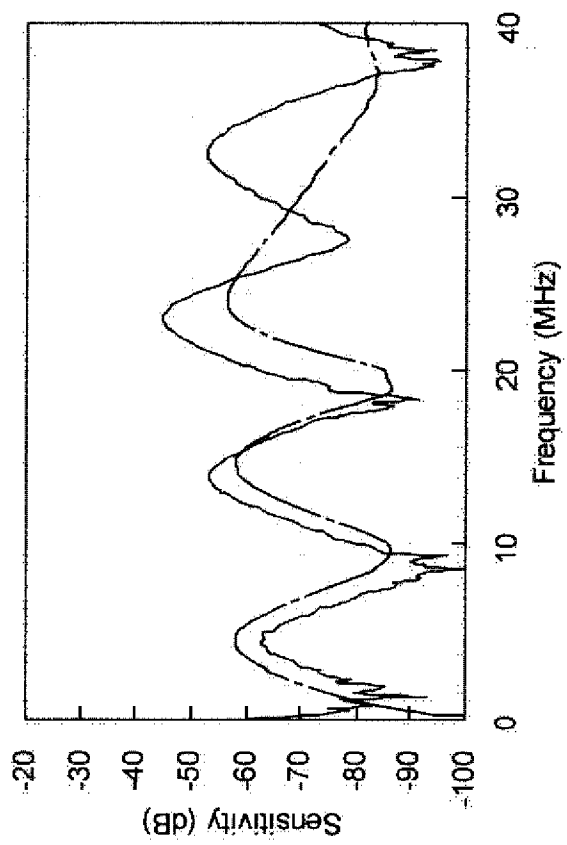
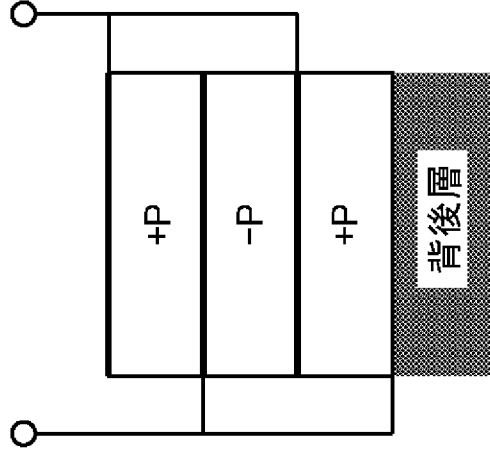
[図16]



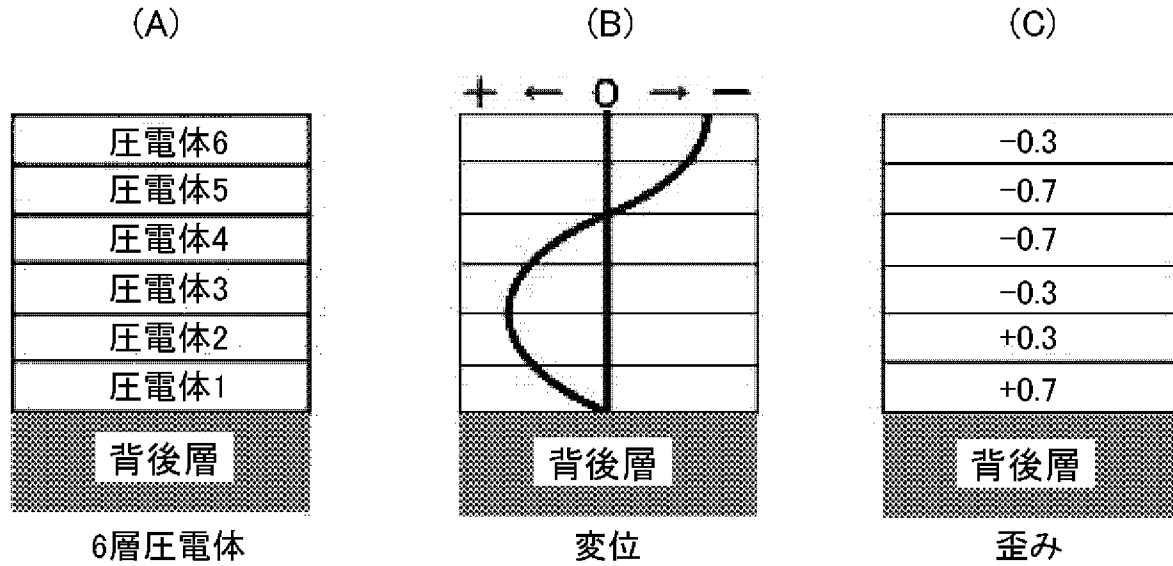
[図17]



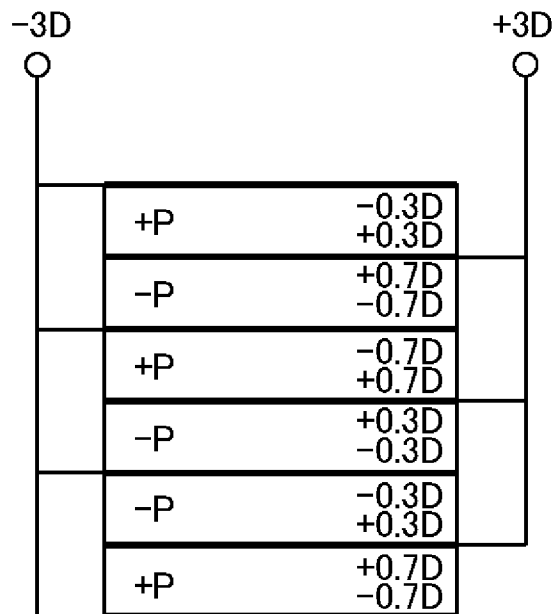
[図18]



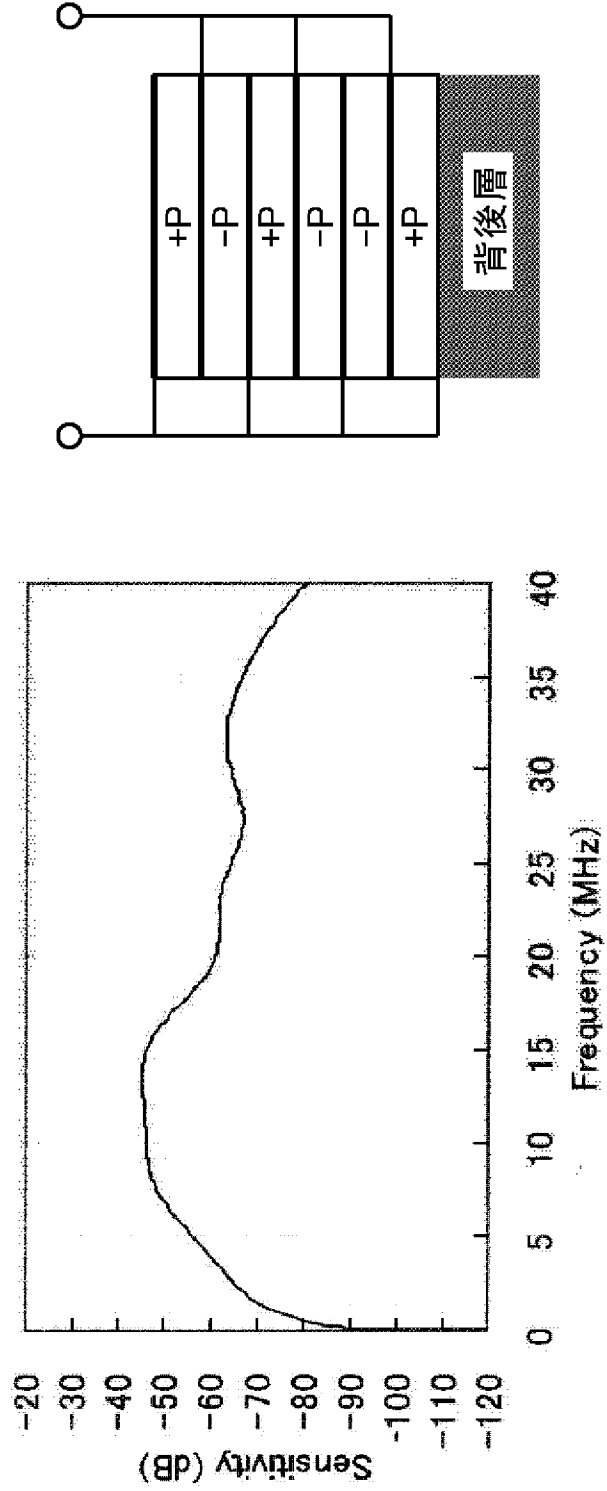
[図19]



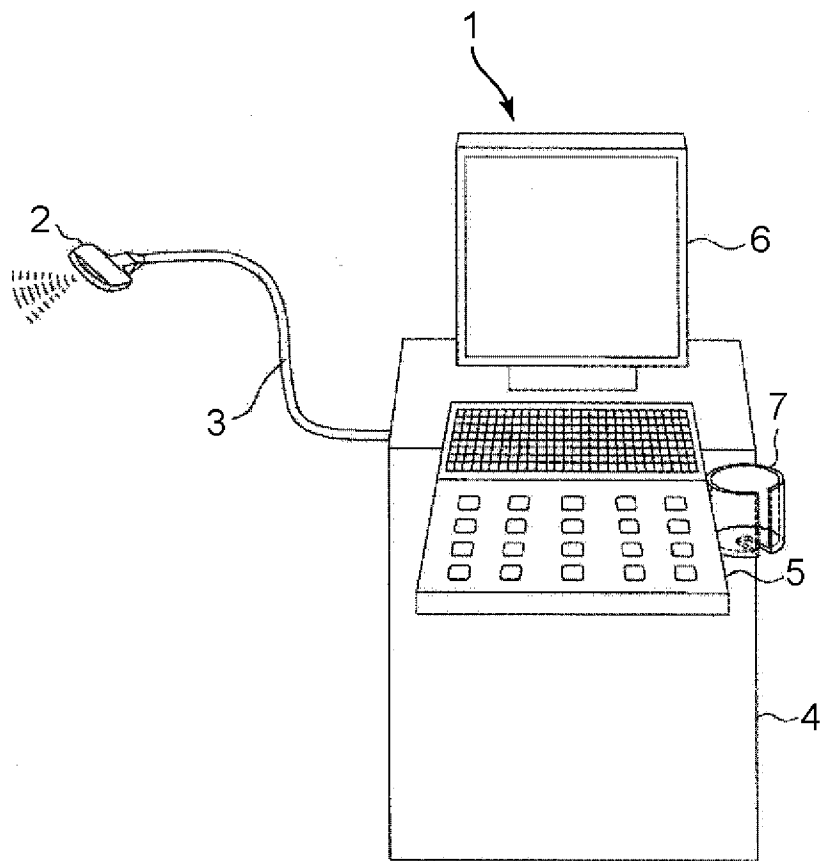
[図20]



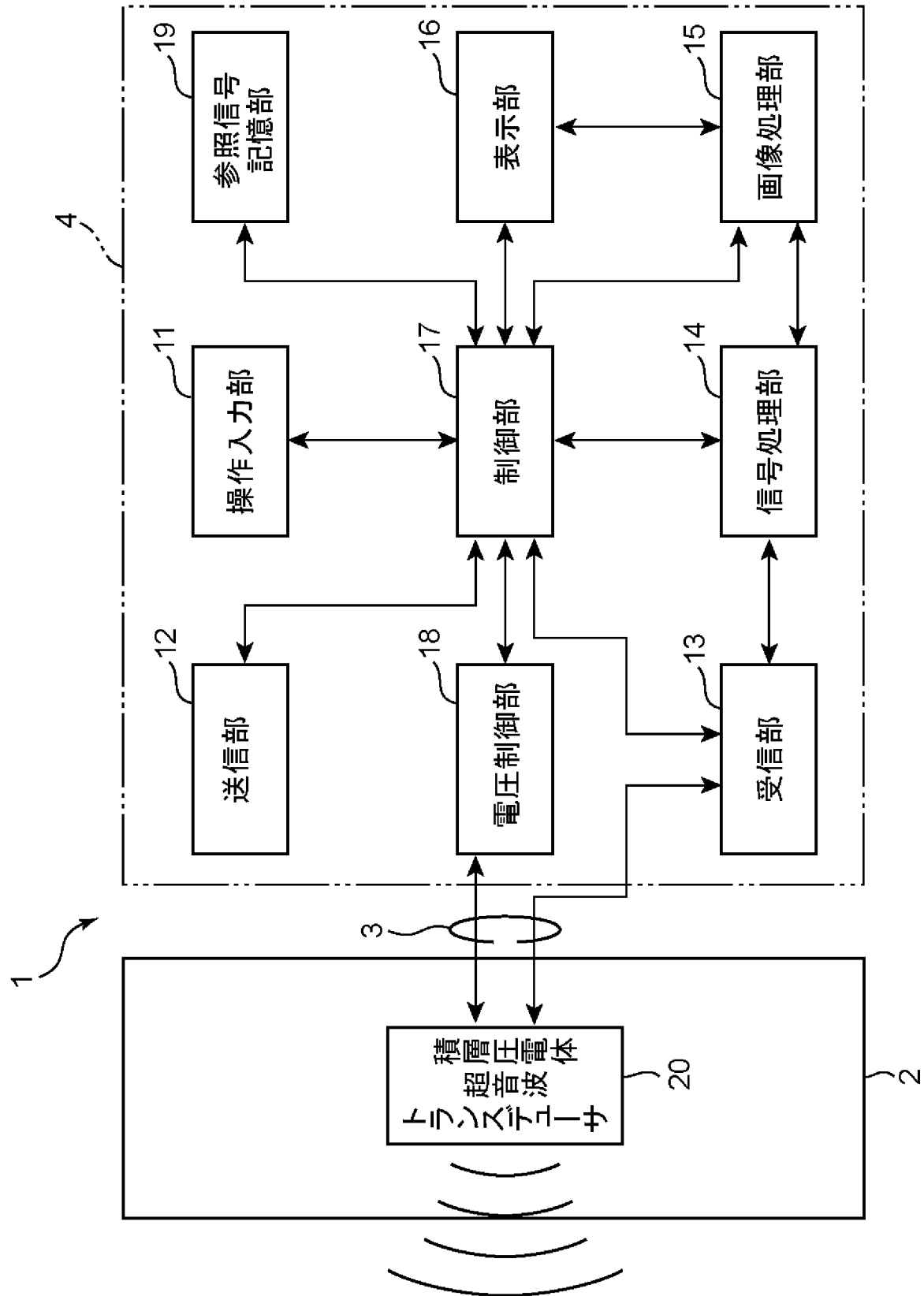
[図21]



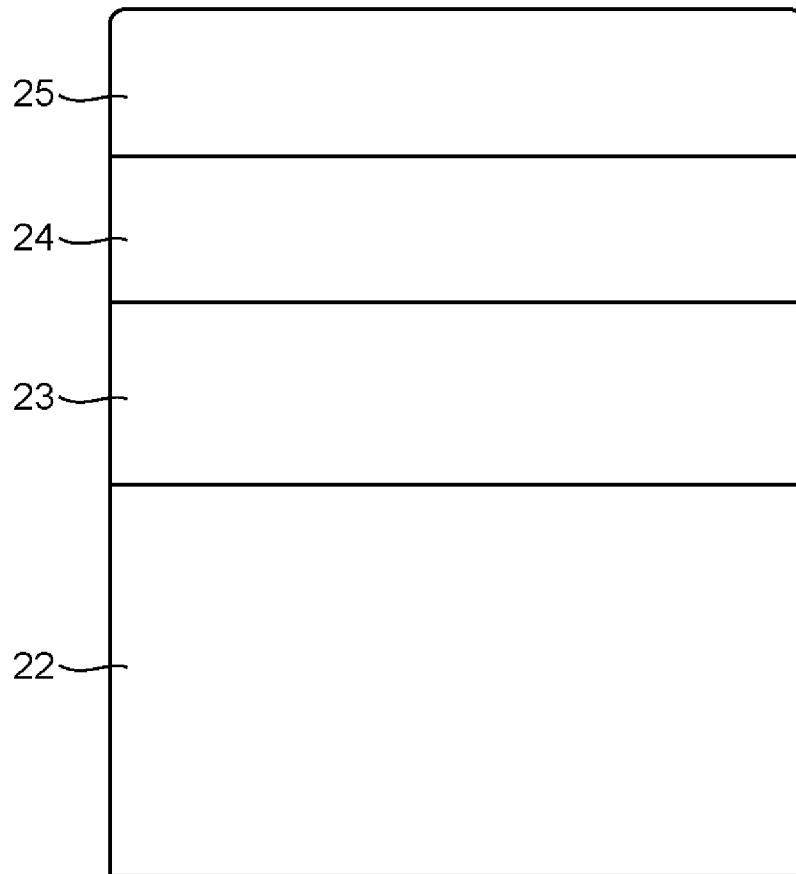
[図22]



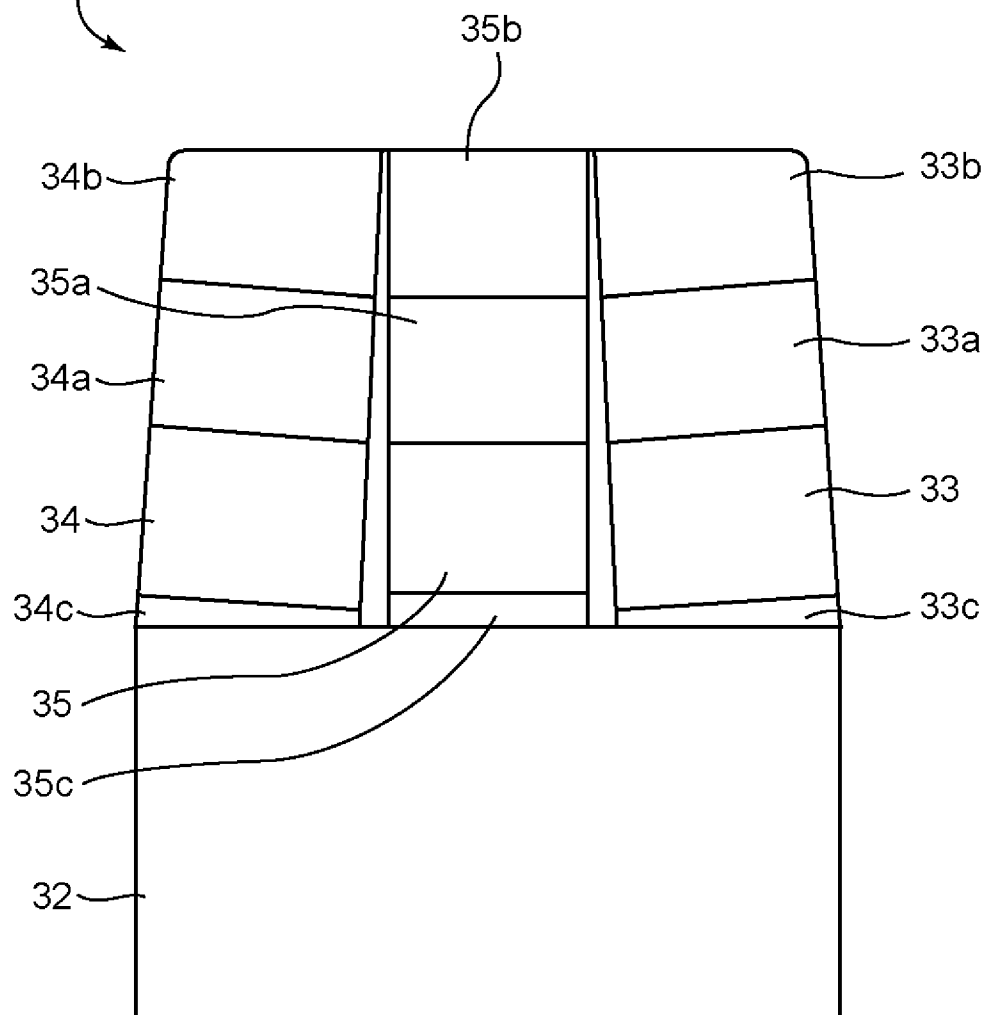
[図23]



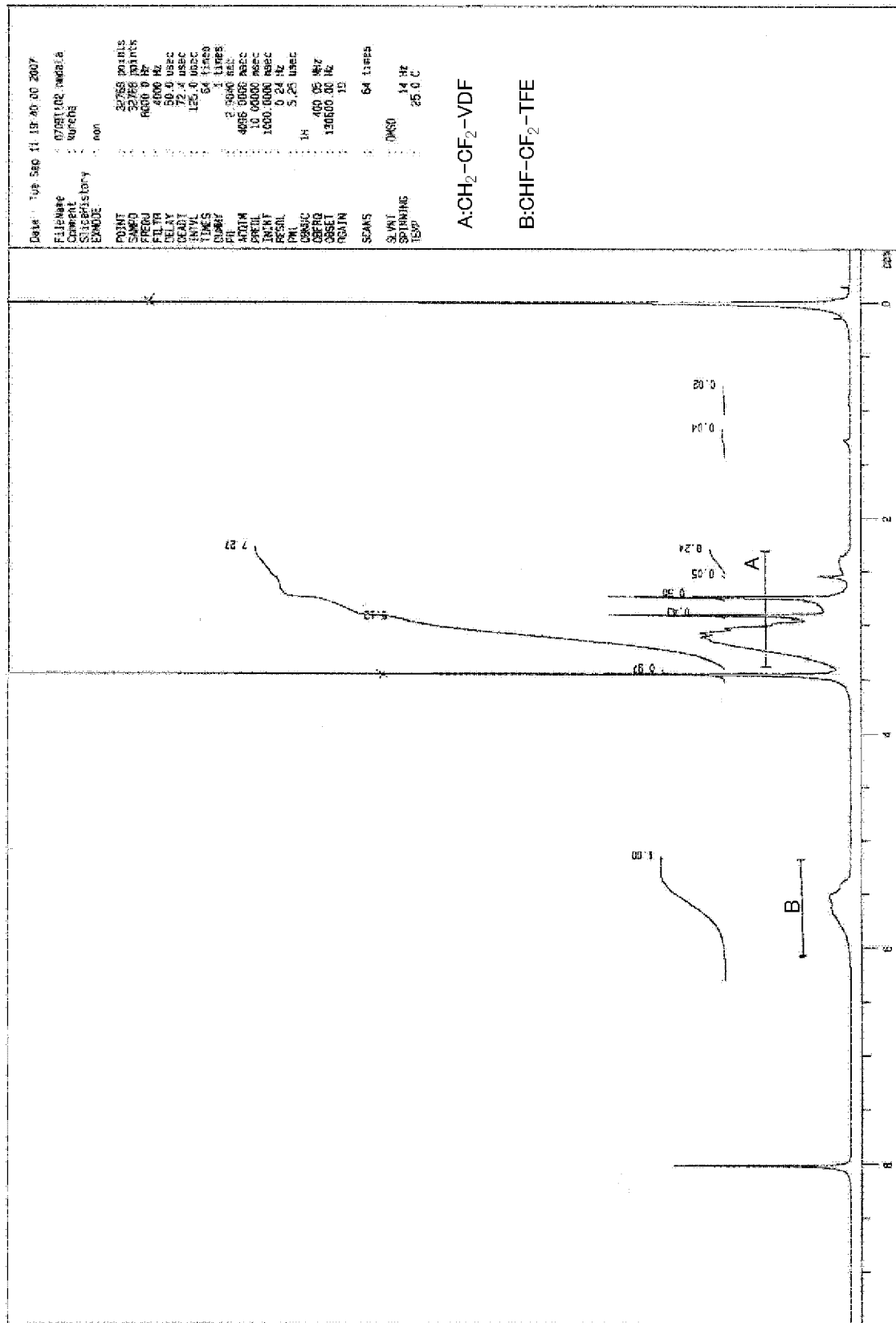
[図24]

21


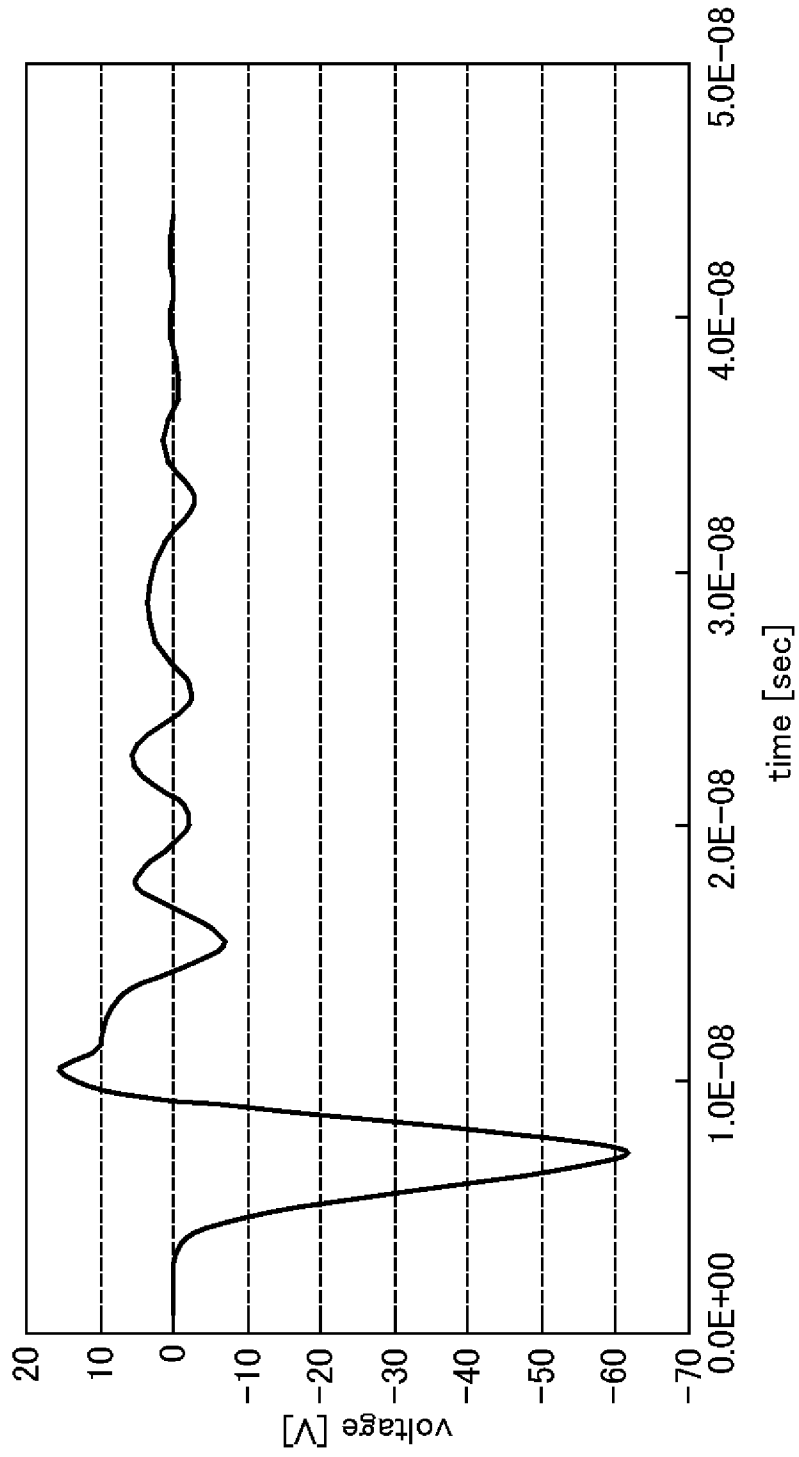
31



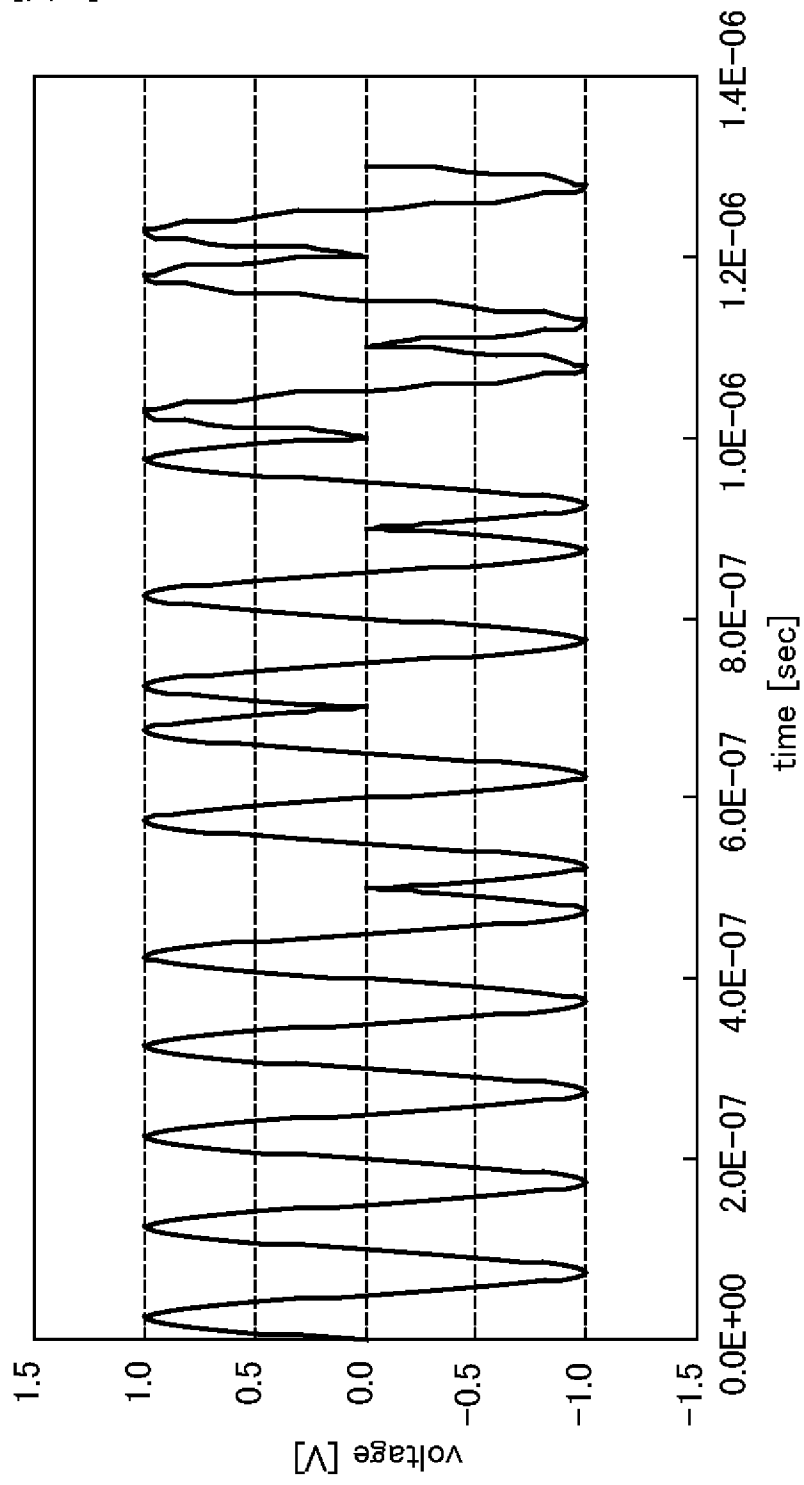
[26]



[図27]



[図28]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/001033

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04R17/10(2006.01)i, A61B8/00(2006.01)i, H04R17/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04R17/10, A61B8/00, H04R17/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2011

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2011 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2011

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 04-211600 A (Toshiba Corp.), 03 August 1992 (03.08.1992), paragraphs [0009] to [0032]; fig. 1 to 9	1, 2, 7, 11-13, 16, 21 17-20
Y	& US 5163436 A & EP 451984 A2	3-6, 8-10, 14, 15
A	& DE 69109923 C	
Y	WO 2008/015917 A1 (Konica Minolta Medical & Graphic, Inc.), 07 February 2008 (07.02.2008), paragraphs [0002] to [0064]; fig. 1	17-20 3-6, 8-10, 14, 15
A	& US 2008/0033298 A1	
A	JP 2003-133898 A (Tayca Corp.), 09 May 2003 (09.05.2003), entire text; all drawings & WO 2003/017720 A1	3-6, 8-10, 14, 15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 May, 2011 (25.05.11)

Date of mailing of the international search report

07 June, 2011 (07.06.11)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/001033

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 05-243632 A (Omron Corp.), 21 September 1993 (21.09.1993), entire text; all drawings (Family: none)	3-6, 8-10, 14, 15
A	JP 01-077298 A (Toshiba Corp.), 23 March 1989 (23.03.1989), entire text; all drawings (Family: none)	3-6, 8-10, 14, 15

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H04R17/10(2006.01)i, A61B8/00(2006.01)i, H04R17/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H04R17/10, A61B8/00, H04R17/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 1 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 1 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 1 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y A	JP 04-211600 A（株式会社東芝）1992.08.03, 【0009】－【0032】及び第1－9図 & US 5163436 A & EP 451984 A2 & DE 69109923 C	1, 2, 7, 11-13, 16, 21 17-20 3-6, 8-10, 14, 15
Y A	WO 2008/015917 A1（コニカミノルタエムジー株式会社）2008.02.07, 【0002】－【0064】及び第1図 & US 2008/0033298 A1	17-20 3-6, 8-10, 14, 15

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日
2 5 . 0 5 . 2 0 1 1

国際調査報告の発送日
0 7 . 0 6 . 2 0 1 1

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（I S A / J P）
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

5 Z

3 6 5 4

境 周一

電話番号 03-3581-1101 内線 3591

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2003-133898 A (テイカ株式会社) 2003.05.09, 全文及び全図面 & WO 2003/017720 A1	3-6, 8-10, 14, 15
A	JP 05-243632 A (オムロン株式会社) 1993.09.21, 全文及び全図面 (ファミリーなし)	3-6, 8-10, 14, 15
A	JP 01-077298 A (株式会社東芝) 1989.03.23, 全文及び全図面 (ファミリーなし)	3-6, 8-10, 14, 15