ジルコン酸鉛系圧電セラミックス基板を用いる SH 波デバイス

非会員 杉 崎 五 郎 (東京理科大)

正 員 竹 中 正 (東京理科大)

正 員 坂 田 好一郎 (東京理科大)

正 員 戸 田 耕 司 (防 衛 大)

Shear Horizontal Wave Device Using PbZrO_3 -Based Piezoelectric Ceramic Substrate

Goro Sugizaki, Non-member, Tadashi Takenaka, Member, Koichiro Sakata, Member (Science University of Tokyo), Kohji Toda, Member (The National Defense Academy)

The piezoelectric constants and propagation characteristics of shear horizontal (SH) waves in a PbZrO_3 -based ceramic substrate are described. Numerical analysis for the phase velocity of SH waves is carried out under various electrical and mechanical boundary conditions. The results confirmed experimentally are given in the form of a function of the product of the frequency and the substrate thickness, which suggest that the zeroth-order symmetrical (S_0) mode is promising for the device construction because of high electromechanical coupling and low dispersive property. The S_0 mode device is in a single mode operation in a considerably wide frequency range, which is suitable for constructing a stable oscillator. A delay line oscillator is composed of the S_0 mode device, an amplifier and an electrically controllable phase shifter, of which oscillation frequency varies with the applied voltage. The oscillator has fine frequency modulation characteristics over a wide frequency range from DC to 100 kHz. The device performance is useful for FM signal processing or voltage sensing.

キーワード：ジルコン酸鉛系圧電セラミックス, SH 波, SH 波デバイス, 遅延線発振器, 周波数変調

1. ま え が き

反強誘電体であるジルコン酸鉛は、数 mol% の適当なペロブスカイト形強誘電体で置換することによって室温で強誘電性を示すことが知られている⁽¹⁾。ジルコン酸鉛を主体とする強誘電体セラミックスは誘電率と誘電損失が小さく、自発分極の温度変化が比較的大きいことから、焦電材料としての研究と実用化が進められ、既に一部では実用の域に達している⁽²⁾。一方、弾性波デバイス基板としての材料特性の評価に関する報告はほとんどなく、波長に比べて薄い基板を伝わる板波、すなわち、Lamb 波や Shear Horizontal (SH) 波

の伝搬特性に関してはまだその検討がされていない。

弾性表面波 (SAW) を問題にする場合には、波長に比べて十分な厚さの基板が必要であるため⁽³⁾、HF 帯を含めて比較的低周波域でのデバイスの構成には不向きとされ、実用上数十 MHz 以上の領域で使用されている。板波には波長よりも薄い基板を伝搬するモードが複数個存在すると共に、それらのモードは SAW モードよりも電気機械結合係数が高い場合が多いという可能性を有している⁽⁴⁾。零次対称 (S_0) モード SH 波は純弾性的であるときに、速度分散のないことが知られており⁽⁵⁾⁽⁶⁾、周波数変調 (FM) デバイスを構成するうえで良好な位相特性を期待することができる。

圧電セラミックスは結晶の対称性が高いために、単結晶に比べて伝搬特性が単純であると予想される。分極軸に垂直な面内にすだれ状トランスデューサ(IDT)を設けると、Lamb波やSAWは励起されるが、SH波は問題外となる。一方、分極軸に平行な面内でしかも分極軸に垂直な方向へはSH波しか励起されない。このようなSH波が利用できる横方向分極基板に関して、SH波を用いるデバイスを設計するうえで不可欠な伝搬特性を明らかにすると共に実際的なデバイスを構成し、実験的にFM変調特性を検討することが本研究の目的である。

2. 試料の作成と材料定数

SH波デバイスの設計に必要な波長の伝搬特性を明らかにするために、普通焼成法によってセラミック基板を作成し、弾性・圧電定数などの材料定数を測定した。SH波デバイス用基板は、100 μm 以下の厚みの試料の作成が比較的容易に行えるようにテープキャスティング法により準備した。出発原料はPbO, ZrO₂, ZnO, Nb₂O₅, TiO₂で、純度はいずれも99%以上のものである。秤量した原料はアセトン、ジルコニアボールと共にボールミルで湿式混合した後、800°Cで1時間焼成した。更に、ボールミルと遊星ミルにより粒径が1 μm 以下になるまで微粉碎した後、溶剤とバインダを適量加えて十分混合し、脱泡を行うことによって、テープ用スラリーを作成した。スラリーをドクターブレードを用いたテープキャスティング装置で厚さ約100 μm に成膜後、適当枚数を積層熱圧着し、MgOるつぼ中で1,280°Cで1時間焼成した。焼成後の冷却は100°C/h以下の温度こう配で行った。焼成後のセラミックスの密度比は96%以上であった。得られた試料に導伝性銀塗料で形成した電極を用いて分極した後、所望の寸法にダイヤモンドカッタで切出し、更に研磨を施した。

誘電定数は、LCRメータ(YHP 4275)を用いて10 kHzにおける値を測定した。圧電定数はIEEE基準⁽⁷⁾に準じて共振-反共振法により求めた。すなわち、圧電体のアドミタンス周波数特性から、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a を測定し、電気機械結合係数 k および周波数定数 N (試料を伝搬する音速の1/2)を求め、一連の計算手順⁽⁸⁾で圧電諸定数を求めた。測定対象とした振動モードは、円板の径方向広がり(ρ モード)および厚み(t モード)、棒の縦効果伸び(33モード)、方形板の長さ方向(31モード)および厚み滑り(15モード)振動である。0.92PbZrO₃-0.032Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.048PbTiO₃(PZNT(92/4.8)

と略記)の20°Cでの測定結果を以下にまとめている。

$$[c^E] = \begin{bmatrix} 14.9 & 5.82 & 5.13 & 0 & 0 & 0 \\ 5.82 & 14.9 & 5.13 & 0 & 0 & 0 \\ 5.13 & 5.13 & 14.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.53 \end{bmatrix} \times 10^{10} (\text{N/m}^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 3.35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.35 & 0 & 0 \\ -0.41 & -0.41 & 5.46 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\text{C/m}^2) \dots\dots\dots (2)$$

$$[\epsilon^S/\epsilon_0] = \begin{bmatrix} 287 & 0 & 0 \\ 0 & 287 & 0 \\ 0 & 0 & 212 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho = 7,612 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots (4)$$

c^E : 弾性定数, e : 圧電定数, ϵ^S/ϵ_0 : 比誘電率, ρ : 密度

3. SH波の伝搬特性

SH波には複数個のモードが存在し、それらの位相速度と電気機械結合係数 k^2 は基板の厚さと波長の関係に大きく依存することから、基板上でのSH波の伝搬特性を明らかにすることはデバイス構成上不可欠である。伝搬特性の解析には、二つの自由境界面を有す

図1 周波数 f と基板の厚さ d の積を変数とするSH波速度分散特性の数値計算結果
Fig.1. Numerically calculated dispersive characteristics of SH waves as function of product of frequency f and plate thickness d .

る圧電体の波動伝搬問題としてとらえ、Farnell らによる方法を基にして数値計算を試みた^{(9)~(11)}。圧電基板の両面で電気的・機械的境界条件を満足する形で圧電方程式と運動方程式から変位と電位を算出している。電気的境界条件では、境界面が開放状態のときに電束が連続で、短絡のときに電位が零である。機械的境界条件では圧電基板と空気との界面が機械的に拘束のない自由境界面であるため垂直方向成分を含む応力のテンソル成分は零である。

図1はSH波の位相速度を周波数 f と基板の厚さ d の積 fd の関数の形で表現した数値計算結果で、 S_0 モードは fd 値が零から存在する唯一のモードである

図2 IDT/open状態でのIDTの k^2 の fd 依存性の数値計算結果

Fig. 2. Numerically calculated fd dependences of k^2 of IDT under condition of IDT/open.

図3 IDT/short状態でのIDTの k^2 の fd 依存性の数値計算結果

Fig. 3. Numerically calculated fd dependences of k^2 of IDT under condition of IDT/short.

と同時に純弾性関数状態にあるときには速度分散が存在しない。ここでは短絡条件下にあり、圧電基板の二つの自由面が電気的に短絡した場合の特性を示している。若干の速度分散を生じている。 S_0 モード以外のすべてのモードには臨界的にモードが出現する遮断周波数が存在する。 S_0 モードだけの存在領域があり、この領域で動作するSH波デバイスを設計することは有利な特性につながるという。

図2と図3は二つの自由境界面の一方がIDT、他方の面が電気的に開放か短絡状態でのIDTの電気機械結合係数 k^2 を、 fd 値の関数の形で算出した結果を示している。基板のIDTとの対向面が電気的に開放状態である場合のほうが短絡状態よりも S_0 モードの結合係数は高い。しかも開放状態では1MHz・mm以下の fd 値の領域で3%以上という大きい値を有する。二つの図の比較から明らかなように、対称モードはいずれも開放状態での k^2 値が大きく、反対称モードは反対の傾向を呈している。

4. 遅延線発振器の構成

前章でのSH波の伝搬特性の数値解析結果から、 S_0 モードSH波は低分散性で、3%以上の高い結合係数を有することが明らかになった。これらの特性を生かす形の具体的デバイスとして遅延線発振器を構成する

図4 SH波遅延線発振器を用いる電位センサの回路図

Fig. 4. Voltage sensing circuit using SH wave delay line oscillator.

ことを試み、電圧印加に対応する周波数変調特性を評価した。

図4はSH波デバイスと増幅器と移相器の組合せによって遅延線発振器を構成した実際の例を示している。可変抵抗素子として使用するJ-FET(2SK117)とコンデンサ(100 pF)が移相器の機能を果たしている。測定信号(変調信号)をJ-FETのGate-Source間に印加すると、Drain-Source間抵抗 R_{D-S} が電圧値と共に変化し、回路の位相遅延量が移動する。このフィードバックループが発振を維持するためには以下の振幅と位相条件を満足する必要がある。

$$G(\text{dB}) - IL(\text{dB}) \geq 0 \quad (5)$$

$$\phi_A(\text{rad}) + \phi_E(\text{rad}) = -2n\pi \quad (6)$$

(a) 0.3~20 MHz

(b) 3~6 MHz

図5 発振器に用いた S_0 モードSH波遅延素子の周波数特性

Fig.5. Frequency characteristics of S_0 mode-SH wave delay line device for oscillator.

ここで、 IL :素子の挿入損失、 G :回路の利得、 ϕ_A :音響的な位相、 ϕ_E :電氣的な位相、 n :発振次数

発振周波数を $f(\text{Hz})$ 、SH波の位相速度を $v(\text{m/s})$ 、伝搬路長を $L(\text{m})$ 、移相器の電圧に対する位相変化の比例定数を $B(\text{rad/V})$ 、移相器によらない位相遅延量を $\phi_0(\text{rad})$ とすると、 $\phi_A(\text{rad})$ および $\phi_E(\text{rad})$ は次式で与えられる。

$$\phi_A = -2\pi fL/v \quad (7)$$

$$\phi_E = BV_{G-S} + \phi_0 \quad (8)$$

結果的には、 f は次式で表現できることになる。

図6 発振スペクトルの測定結果
Fig.6. Measured oscillation spectrum.

○: 実験値

図7 S_0 モードSH波の位相速度と k^2 値の fd 依存性

Fig.7. fd dependences of phase velocity and k^2 for S_0 mode-SH wave.

$$f(V_{G-s}) = BV_{G-s}/(2\pi L) + (2n\pi + \phi_0)v/(2\pi L) \quad \dots\dots\dots (9)$$

すなわち、発振周波数はJ-FETに印加されるGate電圧に依存し、しかも直線関係にある。

使用したSH波遅延素子の基板寸法は $12 \times 18 \times 0.07$ mmで、14 pサイズのICソケットに固定されている。素子基板の一方の面には、電極周期長 $2P$ が600 μ m、電極指の数が7対のIDTが9.6 mmの距離を隔てて2個設けられている。SH波遅延デバイスの特性が図5に示されている。(a)図は A_0 以上のモードが存在しない周波数領域であるために、 S_0 モードだけの安定な発振特性を得るために有利である。(b)図は S_0 モードの通過帯域の部分拡大した特性であるが、挿入損失と位相特性の直線性が共に比較的良好であることがわかる。

図6は図4に示した構成での発振器発振スペクトルである。4.4284 MHzで発振し、しかも高周波成分が50 dB以上抑圧されている。3種類の電氣的境界条件下での位相速度から、位相速度と k^2 を fd 値の関数の形で算出した結果が図7に示されている。図中には実際のデバイスでの位相速度の測定結果2,657 m/sが○印で付加されている。

5. 周波数変動特性

図4の実験系において、入力電圧と発振周波数静特性の関係を測定した結果を図8に示している。入力としてのGate電圧が、 $-0.33 \text{ V} < V_{G-s} < -0.17 \text{ V}$ の範

図8 J-FETへの印加電圧 V_{G-s} と発振周波数の関係の測定結果

Fig. 8. Measured relation between voltage V_{G-s} applied to J-FET and oscillation frequency.

囲では電圧値と共に直線的に周波数が偏移するが、特に4.415~4.442 MHzまでの27 kHzの範囲は直線区間であり、変換率は $\eta = 173 \text{ kHz/V}$ である。

図9はJ-FETへの電圧印加に伴う電氣的位相変化に対応して発振周波数がどのように変化するかを示すもので、この関係が直線であることから、図9における印加電圧と発振周波数の関係の曲線部は移相器の特性によるものであると考えられる。ここで、図8の傾きは図5(b)での位相特性の傾きとほぼ一致している

図9 J-FETへの印加電圧 V_{G-s} に伴う電氣的位相変化と発振周波数の関係の測定結果
Fig. 9. Measured relation between electrical phase change, accompanied by voltage V_{G-s} applied to J-FET, and oscillation frequency.

図10 -0.25 V の直流バイアス下での変調信号電圧 V_m と周波数偏移 Δf の関係の測定結果

Fig. 10. Measured relation between modulating voltage V_m and frequency deviation Δf under DC bias voltage of -0.25 V .

図 11 変調周波数 f_m と周波数偏移 Δf の関係の測定結果

Fig. 11. Measured relation between modulating frequency f_m and frequency deviation Δf .

図 12 f_m をパラメータとした FM 出力のスペクトル

Fig. 12. Spectrum of FM output signal as parameter of f_m .

ことがわかる。図 8 の直線区間に対応する SH 波の平均速度分散は、10 ppm/kHz・mm であり、直線性への影響を無視し得る程度のものである。図 10 は J-FET へのゲート電圧が -0.25 V の直流バイアスと周波数 f_m が 1 kHz の交流電圧を重畳した信号である場合に、変調信号の振幅と周波数偏移 Δf の関係を測定した結果で、電圧振幅と Δf の変換率 η が 86.5 kHz/V_{p-p} (=173 kHz/V) の直線関係が得られている。

変調信号電圧振幅を一定にした状態で周波数を DC から連続的に変化させることによって測定した変調周波数と周波数偏移の関係が図 11 に示されている。直流から 100 kHz までの広範囲な周波数領域で平坦な特性が得られた。この結果は、オーディオ帯を含むアナログ信号伝送に必要な条件を十分に満足するものである。図 12 は $f_c = 4.4284$ MHz, $\Delta f = 5$ kHz のもとで観測された発振スペクトルの測定例を示したもので、変調周波数に等しい間隔で側波帯が現れていることがわかる。

6. む す び

本論文では、普通焼成によってジルコン酸鉛系圧電セラミックス PZNT (92/4.8) を作成し、材料定数を求めると共に、分極した圧電板上での SH 波の伝搬特性を数値解析と実験の両面から検討している。SH 波には多数のモードが存在するが、なかでも零次対称モードは fd 値が 1 MHz・mm 以下の領域で、 k^2 が 3% 以上の大きな値をとり、しかも速度分散性が数～30 ppm/kHz・mm と低い値であることがわかった。

テープキャスティング法で作成した基板に SH 波の励振に有利なように横方向の分極を施した後で、送受波用 IDT を設けることによって高結合の S_0 モード SH 波デバイスを作成した。このデバイスでは A_0 モードを含めて高次モードが存在しない、実質的には単一モードとして扱いうることが確認された。

S_0 モードを利用した SH 波遅延デバイスと増幅器と移相器の組合せによって遅延線発振器を構成すると共に、移相器へ印加する電圧によって位相変化を誘起し、これによって発振周波数が変化することを実験的に検討した。移相器の構成部品である J-FET の Gate-Source 間への印加電圧の変化と共に発振周波数は直線的に変化した。電圧を印加しない場合の発振スペクトルは高調波成分が 50 dB 以上抑圧され、単一モード発振器としての良好な特性を示した。

振幅一定のもとでは DC から 100 kHz までの広い周波数範囲にわたって一定の周波数偏移が得られ、 S_0 モード SH 波の速度分散が変調特性には実質的に影響を及ぼさないことがわかった。この結果は PZNT (92/4.8) 基板が電位センサ用としても有効であることを物語っている。 (平成 3 年 11 月 8 日受付)

文 献

- (1) E. Sawaguchi: "Ferroelectricity versus antiferroelectricity in solid solutions of PbZrO_3 and PbTiO_3 ", *J. Phys. Soc. Japan*, 8, 615 (1953)
- (2) R. Clarke, A. M. Glazer, F. Ainger, D. Appleby, N. J. Poole

- & S. G. Porter: "Phase transitions in lead zirconate-titanate and their applications in thermal detectors", *Ferroelectrics*, 11, 359 (1976)
- (3) H. Matthews edited: Surface wave filters, Chap. 1 (1977) John Wiley & Sons, New York
- (4) K. Mizutani & K. Toda: "Analysis of Lamb wave propagation characteristics in piezoelectric ceramic plates", *Japan J. Appl. Phys.*, 24, Suppl. 24-1, 109 (1985)
- (5) K. Mizutani & K. Toda: "Propagation characteristics of SH-waves in piezoelectric ceramic plates", *ibid.*, 25, Suppl. 25-1, 160 (1986)
- (6) 電子材料工業会編: 表面波デバイスとその応用. 応用編 (昭53) 日刊工業新聞社
- (7) IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics (1961)
- (8) 竹中: 「圧電特性測定法」, セラミックス, 24, 1176 (平元)
- (9) G. W. Farnell & E. Ackaya: "Field distributions for surface-skimming bulk-wave transducers", *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.*, SU-26, 202 (1979)
- (10) G. G. Koerber & R. F. Vorgel: "SH-mode piezoelectric surface on rotated cuts", *ibid.*, SU-20, 9 (1973)
- (11) G. W. Farnell: "Symmetry considerations for elastic layer modes propagating in anisotropic piezoelectric crystals", *ibid.*, SU-17, 229 (1970)

杉崎五郎 (非会員)

昭和42年2月2日生。平成3年3月東京理科大学大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。現在、同博士課程在学中。ジルコン酸鉛系セラミックスの圧電性に関する研究に従事。

竹中正 (正員)

昭和45年芝浦工業大学電子工学科卒業。48年電気通信大学大学院修士課程通信材料工学専攻修了。同年4月東京理科大学理工学部電気工学科助手、講師

を経て、平成3年4月同助教授、現在に至る。工学博士。61年8月～62年8月アメリカ・ペンシルバニア州立大学材料科学研究所客員研究員。63年4月より科学技術庁無機材質研究所客員研究官。電子情報通信学会、応用物理学会、AIEEE、米セラミック協会会員。

坂田好一郎 (正員)

昭和6年2月22日生。28年山形大学工学部電気卒業。32年東北大学大学院修士課程修了。同年防衛大学電気助手。36年東北大学通研助手、38年同助教授。44年東京理科大学理工電気助教授、46年同教授。工学博士。強誘電体を主体とした単結晶ならびに電子セラミック材料の研究に従事。49年度オーム賞受賞。日本物理学会、応用物理学会、電子情報通信学会、日本セラミック協会会員。

戸田耕司 (正員)

昭和15年11月12日生。39年3月防衛大学校(電気工学専攻)卒業。44年3月京都大学大学院工学研究科電気系修士課程修了。同年4月防衛大学校電気工学教室助手。48年～49年スタンフォード大学電気工学科客員助教授。現在、防衛大学校電子工学科教授。工学博士。表面波デバイス、強誘電体材料、音響撮像、センサなどの研究に従事。47年度電子通信学会米沢賞、60年度科学技術庁長官賞受賞。Sigma Xi 会員。アメリカ音響学会フェロー。