

明 細 書

発明の名称：弾性波デバイス

技術分野

[0001] 本発明は、弾性波デバイスに関する。

背景技術

[0002] 近年、携帯電話やスマートフォンの普及により、50近い多くのバンドが2.4GHz以下に集中し、隣とのバンドの間隔が非常に狭くなっているため、隣のバンドに干渉しないよう、急峻な周波数特性を有し、温度特性の良いフィルタやデュプレクサが強く求められている。また、急峻な周波数特性を有するフィルタやデュプレクサを実現するためには、大きなインピーダンス比や高いQを有する共振子が必要となる。ここで、Qはフィルタの急峻性を示すパラメータであるが、急峻性のほかに、フィルタの挿入損失も影響する。Qが高ければ、挿入損失も小さくなり、携帯電話やスマートフォンの電池の消耗が少なくなる。このため、フィルタには、良好な挿入損失、良好な温度特性、より良い急峻性が求められ、その共振子には、高いQおよび大きいインピーダンス比が要求される。なお、Qの値はインピーダンス比に比例し、帯域に反比例するため、ほぼ同じ帯域の場合、Qとインピーダンス比は比例関係にある。

[0003] 弾性表面波（SAW）フィルタは、その帯域が用いる圧電基板の電気機械結合係数（結合係数）に依存しているため、従来、フィルタの帯域に必要な結合係数を有するLT（LiTaO₃結晶）やLN（LiNbO₃結晶）から成る圧電基板が多く使用されている。しかし、これらの基板の周波数温度特性（TCF）は、-40ppm/°Cから-120ppm/°Cであり、あまり良いとはいえない。なお、周波数温度特性（TCF）の理論式は、以下の式で定義されている。

[0004]

[数1]

$$TCF = \frac{(V(35^{\circ}\text{C}) - V(15^{\circ}\text{C}))}{20 \times (V(25^{\circ}\text{C}))} - \alpha$$

α ＝線膨張係数

ここで、 $V(T)$ は、温度 T における励振音速である。また、実測では、 $TCF = (f(45^{\circ}\text{C}) - f(25^{\circ}\text{C})) / (20 \times f(25^{\circ}\text{C}))$ となる。ここで、 $f(T)$ は、測定される周波数であり、共振子では共振周波数および／または反共振周波数が測定され、フィルタでは中心周波数が測定される。なお、実測時、温度に対し周波数がリニアに変化しないときには、測定温度内の周波数の最大変化量を測定温度範囲で割り算することにより、 1°C 当たりの周波数変化量が求められる。

[0005] そこで、必要な結合係数および良好な TCF を得るために、マイナスの TCF を有する LT 、 LN 基板と、プラスの TCF をもつ SiO_2 薄膜とを組合せて、 SiO_2 薄膜／高密度電極／ LT または LN 基板の構造とし、さらに電極に起因した SiO_2 膜上の凸部を除去して表面を平坦化した弾性表面波フィルタが、本発明者等により開発されている（例えば、非特許文献 1 参照）。この構造によれば、比較的良好な $-10 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ の TCF が得られ、しかも、 LT または LN 基板単体の特性と同じインピーダンス比や Q が得られる。この共振子のインピーダンス比は 60 dB 、 Q は 800 程度である。

[0006] なお、水晶基板は、周波数温度特性は良好であるが、圧電性を示す結合係数が小さく、スマートフォンや携帯電話で必要とされるフィルタの帯域を満足することができない。また、 AlN （窒化アルミニウム）薄膜のバルク波を利用したフィルタは、共振子の Q が 2000 であり、 SAW フィルタに比べればフィルタ特性は急峻であるが、周波数温度特性が $-30 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ で

あり、あまり良いとはいえない。

先行技術文献

非特許文献

- [0007] 非特許文献1：門田道雄、中尾武志、西山健次、谷口典生、冬爪敏之、「良好な温度特性をもつ小型弾性表面波デュプレクサ」、電気情報通信学会論文誌 A、2013年、Vol. J96-A、No. 6、pp. 301-308

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0008] 非特許文献1に記載の弾性波フィルタでは、比較的良好なTCFが得られるが、 SiO_2 薄膜が柱状構造多結晶膜であるため、その共振子のQやインピーダンス比は、LTやLN基板単体の特性と同じ程度であり、周波数特性の急峻性がまだまだ不十分であるという課題があった。
- [0009] 本発明は、このような課題に着目してなされたもので、TCFが良好で、共振子のQやインピーダンス比を高めることができる弾性波デバイスを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0010] 上記目的を達成するために、本発明に係る弾性波デバイスは、弾性表面波を利用する弾性波デバイスであって、二酸化ケイ素(SiO_2)を70質量%以上含む基板と、前記基板上に設けられた LiTaO_3 結晶または LiNbO_3 結晶から成る圧電薄膜と、前記圧電薄膜に接するよう設けられたすだれ状電極とを、有することを特徴とする。ここで、圧電薄膜には、圧電薄板も含まれている。
- [0011] 本発明に係る弾性波デバイスで、基板は、バルク波の横波音速がLTやLNの横波音速に近い、3,400m/sから4,800m/sであることが好ましい。これらの基板の多くは、等方性の基板であり、X、Y、Z方向に異方性はないが、圧電単結晶である水晶基板は異方性を有するため、異なる性質を持つ。このため、水晶基板を用いた場合には、その水晶基板は、伝搬

する前記弾性表面波の音速が、前記圧電薄膜を伝搬する前記弾性表面波の音速よりも速くなるよう構成されていることがより好ましい。また、その音速差は、300m/s以上であることが好ましく、さらに600m/s以上であることが好ましい。また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記弾性表面波は漏洩弾性表面波（LSAW）であることが好ましい。さらに、SH（shear horizontal）成分を50%以上、より好ましくは65%以上有しているLSAWであることが好ましい。また、前記弾性表面波は、音速が4,500m/s以上のS波であってもよい。なお、用いた弾性表面波が漏洩弾性表面波かどうかは、基板のオイラー角から理論的に求めることができる。

[0012] 二酸化ケイ素（ SiO_2 ）を70質量%以上含む基板は、弾性表面波（SAW）に対してプラスのTCFが得られる。このため、本発明に係る弾性波デバイスでは、マイナスのTCFを有する LiTaO_3 結晶（LT）または LiNbO_3 結晶（LN）から成る圧電薄膜を、プラスのTCFを有する基板上に設けることにより、ゼロppm/°Cに近い良好なTCFを得ることができる。また、LTまたはLNから成る圧電薄膜を、漏洩弾性表面波（LSAW）を励振するオイラー角とし、基板を、LTまたはLNのLSAWの音速と同程度またはそれ以上に速い音速を有するオイラー角とすることにより、圧電薄膜での漏洩成分がないLSAWのモードを用いることができる。このため、LTまたはLN基板単体での特性より、例えば15から20dBも大きいインピーダンス比を得ることができる。また、このインピーダンス比は、帯域が同じ場合は、Qでは6倍から10倍に相当し、非常に優れた急峻性および挿入損失の特性を得ることができる。また、結合係数も、わずかではあるが、圧電薄膜自身より大きくすることができる。

[0013] 本発明に係る弾性波デバイスは、前記基板と前記圧電薄膜との間に、接地された短絡電極および／または絶縁性の接合膜を有していてもよい。この場合、例えば、すだれ状電極／圧電薄膜／基板、すだれ状電極／圧電薄膜／接合膜／基板、すだれ状電極／圧電薄膜／短絡電極／基板、すだれ状電極／圧電薄膜／短絡電極／接合膜／基板、または、すだれ状電極／圧電薄膜／接合

膜／短絡電極／基板の構造を有している。この場合、短絡電極や接合膜を有していても、優れた特性を損なうことなく、良好なTCF、ならびに、高いQおよびインピーダンス比を得ることができる。特に、短絡電極を有する場合には、結合係数を高めることができ、漏洩弾性表面波の伝搬損失を低減することができる。なお、接合膜は、吸音性がなく、硬い材質のものから成ることが好ましく、例えばSi膜やSiO₂膜から成っていてもよい。

[0014] 本発明に係る弾性波デバイスで、前記すだれ状電極は、前記圧電薄膜上に、少なくとも下部が前記圧電薄膜に埋め込まれるよう、および／または、少なくとも上部が前記圧電薄膜から突出するよう設けられていてもよい。この場合、いずれの構造であっても、優れた特性を有し、高いインピーダンス比を得ることができる。特に、すだれ状電極の全体または下部が圧電薄膜に埋め込まれる構造のとき、音速が速くなり、高周波化に有利である。なお、この場合、圧電薄膜と基板との間が電氣的に短絡されていてもよい。

[0015] 本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、二酸化ケイ素（SiO₂）を80質量%以上含んでいることが好ましく、99質量%以上100質量%未満であることがさらに好ましく、100質量%含む熔融石英がより好ましく、さらに圧電単結晶である水晶基板から成ることがさらに好ましい。また、前記基板は、伝搬する前記弾性表面波の音速が3,400乃至4,800 m/sであってもよい。また、前記基板は、水晶を除く等方性の基板から成り、前記圧電薄膜は、厚みが0.001 mm以上0.01 mm未満であってもよい。また、前記基板は、水晶基板から成り、伝搬する前記弾性表面波の音速が4,500 m/s以上、または4,800 m/s以上、または5,000 m/s以上であってもよい。これらのいずれの構成であっても、優れた特性を有し、良好なTCF、ならびに、高いQおよびインピーダンス比を得ることができる。なお、水晶基板の場合は、等方性の基板より大きなプラスのTCFを有するため、圧電薄膜の厚みにはこだわらない。

[0016] 水晶を除く等方性の基板では、弾性波の伝搬方向に依存性はないが、水晶を用いた場合には、異方性を持つため、用いる水晶基板の方位角や伝搬方向

(オイラー角)により特性が異なり、適したオイラー角の選択は重要である。本発明に係る弾性波デバイスは、まず、パワーフローアングル(PFA)がおおむね、ゼロであるオイラー角を選ぶことが望ましい。オイラー角がゼロから大きくずれると、弾性波がすだれ状電極と斜めの方向に伝搬していくためである。PFAがおおむねゼロを示す水晶基板のオイラー角は、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $40^{\circ} \pm 12^{\circ}$)、($10^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $42^{\circ} \pm 8^{\circ}$)、($20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $50^{\circ} \pm 8^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($10^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($10^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$)とそれと等価な方位角である。

[0017] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、オイラー角が($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 125^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $172^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $120^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 49^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $25^{\circ} \sim 105^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $85^{\circ} \sim 95^{\circ}$)、($90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $25^{\circ} \sim 31^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$)であってもよい。また、前記基板は、オイラー角が($20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $120^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 、 $115^{\circ} \pm 10^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 10^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $75^{\circ} \pm 10^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 10^{\circ}$)、($0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $60^{\circ} \pm 10^{\circ}$)であってもよい。これらの場合、良好なTCFを示す。

[0018] また、より高いQおよびインピーダンス比の特性を得るために、以下の音速やオイラー角、膜厚であることが好ましい。すなわち、本発明に係る弾性

波デバイスで、前記基板は、伝搬する前記弾性表面波の音速が $4,500\text{ m/s}$ 以上であり、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 70^\circ \sim 165^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ あるいは $(0^\circ \pm 5^\circ, 95^\circ \sim 155^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であってもよい。好ましくは、基板は、伝搬する弾性表面波の音速が $4,800\text{ m/s}$ 以上であり、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ \sim 150^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ あるいは $(0^\circ \pm 5^\circ, 103^\circ \sim 140^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましく、さらに基板は、伝搬する弾性表面波の音速が $5,000\text{ m/s}$ 以上であり、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 100^\circ \sim 140^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ あるいは $(0^\circ \pm 5^\circ, 110^\circ \sim 135^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であることが好ましい。

[0019] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、レイリー波やLSAWのTCFがプラスを示すオイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 132^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 18^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 42^\circ \sim 65^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 126^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であり、前記圧電薄膜は、 LiTaO_3 結晶から成り、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 82^\circ \sim 148^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であってもよい。この場合、基板は、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 12^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 44^\circ \sim 63^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 135^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましい。また、圧電薄膜は、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ \sim 140^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましい。この組合せでは、特に良好なTCFが得られる。

[0020] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、レイリー波やLSAWのTCFがプラスを示すオイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 42^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 170^\circ \sim 190^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 45^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 123^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であり、前記圧電薄膜は、 LiTaO_3 結晶から成り、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 80^\circ \sim 148^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であってもよい。この場合、基板は、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 34^\circ, 90^\circ \pm$

5°)、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 126^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましい。また、圧電薄膜は、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ \sim 140^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましく、さらに $(0^\circ \pm 5^\circ, 95^\circ \sim 143^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であることが好ましく、さらに $(0^\circ \pm 5^\circ, 103^\circ \sim 125^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましい。

[0021] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、高音速LSAWを有するオイラー角が $(1^\circ \sim 39^\circ, 100^\circ \sim 150^\circ, 0^\circ \sim 20^\circ)$ または $70^\circ \sim 120^\circ$ または $160^\circ \sim 180^\circ$)であり、前記圧電薄膜は、 LiTaO_3 結晶から成り、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 80^\circ \sim 148^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であってもよい。さらに、基板は、5,000m/s前後の高音速fast shearを有するオイラー角、 $(20^\circ \pm 5^\circ, 120^\circ \pm 10^\circ, 115^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ, 75^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ, 0^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ, 60^\circ \pm 10^\circ)$ でもよい。

[0022] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 23^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 32^\circ \sim 69^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 118^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 62^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 118^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 72^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 117^\circ \sim 180^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ であり、前記圧電薄膜は、 LiTaO_3 結晶から成り、オイラー角が $(0^\circ \pm 5^\circ, 80^\circ \sim 148^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ であってもよい。この場合、基板のオイラー角は、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 12^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 37^\circ \sim 66^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 132^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 50^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 126^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 17^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 35^\circ \sim 67^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 123^\circ \sim 180^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ であることがより好ましい。

[0023] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記圧電薄膜は、 LiTaO_3 結晶から成り、オイラー角が($90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $33^\circ \sim 55^\circ$)、($90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $125^\circ \sim 155^\circ$)であってもよい。また、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が($90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $38^\circ \sim 65^\circ$)、($90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $118^\circ \sim 140^\circ$)であってもよい。

[0024] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記圧電薄膜は、 LiTaO_3 結晶から成り、前記弾性波の波長の0.001倍～2倍の厚みを有していてもよい。この場合、圧電薄膜の厚みが、弾性波の波長の0.01倍～0.6倍であることが好ましく、0.02倍～0.6倍であることがより好ましく、さらに0.03倍～0.4倍であることが好ましく、さらに、0.03倍～0.3倍であることがより好ましい。

[0025] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、レイリー波やLSAWのTCFがプラスを示すオイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 132^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 18^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $42^\circ \sim 65^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $126^\circ \sim 180^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であり、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $75^\circ \sim 165^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であってもよく、より好ましくは($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $100^\circ \sim 160^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であってもよい。この場合、基板のオイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 12^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $44^\circ \sim 63^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $135^\circ \sim 180^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であることがより好ましい。また、この場合、前記圧電薄膜は、前記弾性表面波の波長の0.001倍～2倍の厚みを有していることが好ましく、0.01倍～0.6倍であることがより好ましく、0.012倍～0.6倍であることがより好ましく、0.02倍～0.5倍であることがより好ましく、さらに0.03倍～0.33倍であることが好ましい。

[0026] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、レイリー波やLSA

WのTCFがプラスを示すオイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 42^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$) ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \sim 155^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $123^\circ \sim 180^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)であり、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $70^\circ \sim 170^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であってもよい。この場合、基板のオイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 34^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $126^\circ \sim 180^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)であることがより好ましい。また、この場合、前記圧電薄膜は、前記弾性表面波の波長の0.001倍～2倍の厚みを有していることが好ましく、0.01倍～0.5倍の厚みを有していることが好ましく、0.02倍～0.33倍であることがより好ましく、さらに0.06倍～0.3倍であることが好ましい。

[0027] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、オイラー角が($1^\circ \sim 39^\circ$ 、 $100^\circ \sim 150^\circ$ 、 $0^\circ \sim 20^\circ$ または $70^\circ \sim 120^\circ$ または $160^\circ \sim 180^\circ$)であり、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $95^\circ \sim 160^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であってもよい。また、基板は、オイラー角が($1^\circ \sim 39^\circ$ 、 $70^\circ \sim 150^\circ$ 、 $0^\circ \sim 20^\circ$ または $70^\circ \sim 120^\circ$ または $160^\circ \sim 180^\circ$)であり、圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $25^\circ \sim 51^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、であってもよい。

[0028] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、オイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \sim 178^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $80^\circ \sim 160^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)であり、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、レイリー波を励起するオイラー角が($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $35^\circ \sim 70^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、より好ましくは($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \sim 63^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、さらに好ましくは($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $48^\circ \sim 60^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であってもよい。また、この場合、LSAWおよびレイリー波のTCFがプラスを示す基板のオイラー角が、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \sim 178^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、および($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $125^\circ \sim 160^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)であることが好ましい。

。

[0029] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、オイラー角が ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 16^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $42^\circ \sim 64^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $138^\circ \sim 180^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $130^\circ \sim 180^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 28^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $42^\circ \sim 70^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $132^\circ \sim 180^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$) であり、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $75^\circ \sim 165^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、より好ましくは ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \sim 160^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$) であってもよい。この場合、基板のオイラー角は、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $43^\circ \sim 61^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $147^\circ \sim 180^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 15^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $134^\circ \sim 180^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 23^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $43^\circ \sim 67^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $137^\circ \sim 180^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$) であることがより好ましい。

[0030] また、本発明に係る弾性波デバイスで、前記基板は、オイラー角が ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $32^\circ \sim 118^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $173^\circ \sim 180^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 142^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$) であり、前記圧電薄膜は、 LiNbO_3 結晶から成り、オイラー角が ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $35^\circ \sim 70^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、より好ましくは ($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \sim 63^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$) であってもよい。この場合、基板のオイラー角は、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $40^\circ \sim 102^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $0^\circ \sim 17^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $175^\circ \sim 180^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$)、($0^\circ \pm 5^\circ$ 、 $13^\circ \sim 130^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$) であることがより好ましい。

[0031] また、本発明に係る弾性波デバイスで、利用する弾性表面波は基本モードであっても、高次モードであってもよい。高次モードを利用する場合、圧電

薄膜は、弾性表面波の波長の0.35倍～9.3倍の厚みを有していることが好ましい。また、基板と圧電薄膜との間に短絡電極を有する場合には、圧電薄膜は、弾性表面波の波長の0.5倍～9倍の厚みを有していることが好ましい。これらの場合、高いインピーダンス比を得ることができる。

[0032] ここで、オイラー角 (ϕ 、 θ 、 ψ) は、右手系であり、基板や圧電薄膜の切断面と、弾性表面波の伝搬方向とを表現するものである。すなわち、基板を構成する結晶や、LTまたはLNの結晶軸X、Y、Zに対し、Z軸を回転軸としてX軸を反時計回りに ϕ 回転し、X'軸を得る。次に、そのX'軸を回転軸としてZ軸を反時計回りに θ 回転しZ'軸を得る。このとき、Z'軸を法線とし、X'軸を含む面を、基板や圧電薄膜の切断面とする。また、Z'軸を回転軸としてX'軸を反時計回りに ψ 回転した方向を、弾性表面波の伝搬方向とする。また、これらの回転によりY軸が移動して得られる、X'軸およびZ'軸と垂直な軸を、Y'軸とする。

[0033] オイラー角をこのように定義することにより、例えば、40°回転Y板X方向伝搬は、オイラー角で(0°、130°、0°)と表され、40°回転Y板90°X方向伝搬は、オイラー角で(0°、130°、90°)と表される。

[0034] なお、本発明に係る弾性波デバイスで、基板および圧電薄膜は、上記のオイラー角だけでなく、結晶学的に等価なオイラー角を有するものであってもよい。この場合でも、より良好なTCF、ならびに、より高いQおよびインピーダンス比の特性を得ることができる。また、基板や圧電薄膜を所望のオイラー角で切り出す際には、オイラー角の各成分に対して、最大で±0.5°程度の誤差が発生する可能性がある。IDTの形状に関しては、伝搬方向 ϕ に対し、±3°程度の誤差が生じる可能性がある。弾性波の特性に関しては、(ϕ 、 θ 、 ψ)のオイラー角のうち、 ϕ 、 ψ に関しては、±5°程度のずれによる特性差はほとんどない。

発明の効果

[0035] 本発明によれば、TCFが良好で、共振子のQやインピーダンス比を高め

ることができる弾性波デバイスを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0036] 以下、特に説明がない場合、厚み0.08波長のアルミニウム電極から成るすだれ状電極をA I - I D Tと記載する。

[図1] (a) A I - I D T / 圧電基板から成る従来の弾性波デバイス、(b) 本発明の実施の形態の弾性波デバイス、(c) 本発明の実施の形態の弾性波デバイスの、接合膜を有する変形例を示す斜視図である。

[図2]従来の弾性波共振子の(a) A I - I D T / (0°、110°、0°) L T 基板、(b) A I - I D T / (0°、132°、0°) L T 基板の、インピーダンス(Z)の周波数特性を示すグラフである(図中、Zが最小と最大の周波数をそれぞれ、共振周波数(f_r)、反共振周波数(f_a)、インピーダンスをそれぞれ Z_r 、 Z_a といい、帯域は $(f_a - f_r) / f_r$ 、インピーダンス比は $20 \times \text{LOG}(Z_a / Z_r)$ で表される)。

[図3] (a) A I - I D T / (0°、110°、0°) L T 薄膜(厚み0.15波長) / (0°、130°、90°) 水晶基板、(b) A I - I D T / (0°、120°、0°) L T 薄膜(厚み0.15波長) / (0°、130°、0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、インピーダンス(Z)の周波数特性を示すグラフである。

[図4] (a) A I - I D T / (0°、110°、0°) L T 薄膜(厚み0.15波長) / (0°、130°、30°) 水晶基板、(b) A I - I D T / (0°、110°、0°) L T 薄膜(厚み0.15波長) / (0°、130°、60°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、インピーダンス(Z)の周波数特性を示すグラフである。

[図5] (0°、130°、 ϕ) 水晶基板(quartz)における、レイリー波(Rayleigh)およびL S A Wの音速(Phase velocity)の伝搬方向(Propagation direction) ϕ 依存性を示すグラフである。

[図6] (a) A I - I D T / (0°、132°、0°) L T 薄膜 / (110) S i 基板、(b) A I - I D T / (0°、132°、0°) L T 薄膜 / c サ

ファイア基板の構造を有する弾性波共振子の、インピーダンス (Z) の周波数特性を示すグラフである。

[図7] (0° 、 θ 、 0°) 水晶基板 (quartz) における、(a) レイリー波 (Rayleigh) と LSAW の音速 (Phase velocity)、(b) レイリー波と LSAW の TCF、(c) LSAW の縦波の変位成分 U_1 、SH 成分 U_2 、SV (shear vertical) 成分 U_3 の基板表面での変位比率の θ 依存性を示すグラフである。

[図8] (0° 、 θ 、 90°) 水晶基板 (quartz) における、(a) レイリー波 (Rayleigh) と LSAW の音速 (Phase velocity)、(b) レイリー波と LSAW の TCF、(c) LSAW の縦波の変位成分 U_1 、SH 成分 U_2 、SV 成分 U_3 の基板表面での変位比率の θ 依存性を示すグラフである。

[図9] (ϕ 、 θ 、 ϕ) 水晶基板 (quartz) における、様々な ϕ および θ での音速 (Phase velocity) の ϕ 依存性を示すグラフである。

[図10] (0° 、 θ 、 0°) LT 基板における、(a) レイリー波 (Rayleigh) と LSAW の音速 (Phase velocity) (図中、実線 (v_f) および破線 (v_m) は、それぞれ LT 基板表面が電氣的に開放した場合および短絡した場合の音速)、(b) レイリー波 (Rayleigh) と LSAW の電気機械結合係数 (coupling factor)、(c) LSAW の TCF、の θ 依存性を示すグラフである。

[図11] AI-IDT / (0° 、 θ 、 0°) LT 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 $115^\circ \sim 145^\circ$ 、 0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の θ 依存性を示すグラフである (各グラフ中の θ は、水晶基板の θ である)。

[図12] AI-IDT / (0° 、 110° 、 0°) LT 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 θ 、 0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、(a) AI 厚が 0.08 波長、(b) AI 厚が 0.2 波長のときのインピーダンス比 (Impedance ratio) の θ 依存性を示すグラフである (共振・反共振周波数

間において、実線はリップルのない特性を、破線はリップルのある特性を示す）。

[図13] $A I - I D T / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜（厚み 0.15 波長） $/ (0^\circ, 130^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、 $A I$ 厚が 0.08 波長および 0.2 波長のときの (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の LT の膜厚依存性を示すグラフである。

[図14] $A I - I D T / (0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LT 薄膜（厚み 0.15 波長） $/ (0^\circ, 100^\circ \sim 175^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の θ 依存性を示すグラフである（各グラフ中の θ は、水晶基板の θ である）。

[図15] $A I - I D T / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 $/ (0^\circ, \theta, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、(a) LT 厚が 0.15 波長で $A I$ 厚が 0.08 波長、(b) LT 厚が 0.15 波長で $A I$ 厚が 0.1 波長、ならびに、LT 厚が 1.25 波長および 2 波長で $A I$ 厚が 0.2 波長のときの、インピーダンス比 (Impedance ratio) の θ 依存性を示すグラフ（共振・反共振周波数間において、実線はリップルのない特性を、破線はリップルのある特性を示す）、(c) (b) において、水晶基板の $\theta = 125^\circ, 25^\circ$ のときのインピーダンス (Z) の周波数特性を示すグラフである。

[図16] $A I - I D T / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 $/ (0^\circ, 128^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、 $A I$ 厚が 0.08 波長および 0.2 波長のときの (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の LT の膜厚依存性を示すグラフである。

[図17] $A I - I D T / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜（厚み 0.15 波長） $/ (0^\circ, 45^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の (a) インピーダンス (Z) の周波数特性、(b) $A I$ 厚が 0.12 波長および 0.2 波長のときのインピーダンス比 (Impedance ratio) の LT の膜厚依存

性を示すグラフである。

[図18] A I - I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 / (20° 、 120° 、 115°) 水晶基板、および、 A I - I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 / (0° 、 130° 、 0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子のインピーダンス比 (Impedance ratio) の L T の膜厚依存性を示すグラフである。

[図19] (a) (0° 、 θ_{LT} 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 θ_{quartz} 、 0°) 水晶基板、(b) (0° 、 θ_{LT} 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 θ_{quartz} 、 90°) 水晶基板、(c) (0° 、 θ_{LT} 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 θ_{quartz} 、 $30^\circ \sim 60^\circ$) 水晶基板における、 $\theta_{LT} = 80^\circ$ 、 125° 、 148° のときの、 T C F の θ_{quartz} 依存性を示すグラフである。

[図20] (a) (0° 、 θ 、 0°) L N 基板の表面が電氣的に開放 (V_f) および短絡 (V_m) したときのレイリー波 (Rayleigh) と L S A W の音速 (Phase velocity) 、 (b) レイリー波 (Rayleigh) と L S A W の電気機械結合係数 (coupling factor) 、 (c) レイリー波 (Rayleigh) と L S A W の T C F 、 の θ 依存性を示すグラフである。

[図21] A I - I D T / (0° 、 131° 、 0°) L N 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 115° 、 90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、インピーダンス (Z) の周波数特性を示すグラフである。

[図22] (a) A I - I D T / (0° 、 θ 、 0°) L N 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 130° 、 0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、 L S A W およびレイリー波に対するインピーダンス比 (Impedance ratio) の、 θ 依存性を示すグラフ、(b) A I - I D T / (0° 、 131° 、 0°) L N 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 θ 、 0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、 A I 厚が 0.08 波長および 0.2 波長のときの、 L S A W に対するインピーダンス比 (Impedance ratio) 、ならびに、 A I - I D T / (0° 、 55° 、 0°) L N 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 θ 、

0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、A I 厚が0.08波長のときの、レイリー波に対するインピーダンス比 (Impedance ratio) の、 θ 依存性を示すグラフである (共振・反共振周波数間において、実線はリップルのない特性を、破線はリップルのある特性を示す)。

[図23] A I - I D T / (0°、131°、0°) L N 薄膜 / (0°、130°、0°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、A I 厚が0.08波長および0.2波長のときの (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の L N の膜厚依存性を示すグラフである。

[図24] (a) A I - I D T / (0°、 θ 、0°) L N 薄膜 (厚み0.15波長) / (0°、130°、90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、L S A W およびレイリー波に対するインピーダンス比 (Impedance ratio) の、 θ 依存性を示すグラフ、(b) A I - I D T / (0°、131°、0°) L N 薄膜 (厚み0.15波長) / (0°、 θ 、90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、A I 厚が0.08波長および0.2波長のときの、L S A W に対するインピーダンス比 (Impedance ratio)、ならびに、A I - I D T / (0°、38°、0°) L N 薄膜 (厚み0.15波長) / (0°、 θ 、90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、A I 厚が0.08波長のときの、レイリー波に対するインピーダンス比 (Impedance ratio) の、 θ 依存性を示すグラフである (共振・反共振周波数間において、実線はリップルのない特性を、破線はリップルのある特性を示す)。

[図25] A I - I D T / (0°、131°、0°) L N 薄膜 / (0°、115°、90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、A I 厚が0.08波長および0.2波長のときの (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の L N の膜厚依存性を示すグラフである。

[図26] (a) (0°、 θ_{LN} 、0°) L N 薄膜 (厚み0.15波長) / (0°、 θ_{quartz} 、0°) 水晶基板、(b) (0°、 θ_{LN} 、0°) L N 薄膜 (厚み0.15波長) / (0°、 θ_{quartz} 、90°) 水晶基板、(c) (0°、 θ_{LN} 、0°) L N 薄膜 (厚み0.15波長) / (0°、 θ_{quartz} 、30° ~ 60°) 水

晶基板における、 $\theta_{LT}=38^\circ$ 、 85° 、 154° のときの、TCFの θ_{quartz} 依存性を示すグラフである。

[図27] A I - I D T / (90° 、 90° 、 ϕ) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板、および、A I - I D T / (90° 、 90° 、 ϕ) L N 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板の構造を有する縦波型の漏洩弾性表面波共振子のインピーダンス比 (Impedance ratio) の ϕ 依存性を示すグラフである。

[図28] A I - I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / 熔融石英基板の構造を有する弾性波共振子のインピーダンス (Z) の周波数特性を示すグラフである。

[図29] A I - I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / 各種基板の構造を有する弾性波共振子のインピーダンス比 (Impedance ratio) の L T の膜厚依存性を示すグラフである。

[図30] A I - I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 / S i O₂ 膜 / 高音速基板、および、A I - I D T / (0° 、 131° 、 0°) L N 薄膜 / S i O₂ 膜 / 高音速基板の構造を有する弾性波共振子の、L S A W のインピーダンス比の S i O₂ 膜の膜厚依存性を示すグラフである。

[図31] 各種 I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の、様々な材質のすだれ状電極の厚み (Electrode thickness) 依存性を示すグラフである。

[図32] 各種 I D T / (0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の (a) 帯域 (Bandwidth)、(b) インピーダンス比 (Impedance ratio) の、様々な材質のすだれ状電極のメタライゼーション比 (Metalization ratio) 依存性を示すグラフである (メタライゼーション比 = $2 \times$ 電極幅 / 波長) 。

[図33] (a) IDT/圧電薄膜/基板の構造、(b) IDT/圧電薄膜/短絡電極/基板の構造、(c) 圧電薄膜/IDT/基板(上図: IDTが基板側に埋め込まれたもの、下図: IDTが圧電薄膜側に埋め込まれたもの)、(d) 短絡電極/圧電薄膜/IDT/基板(上図: IDTが基板側に埋め込まれたもの、下図: IDTが圧電薄膜側に埋め込まれたもの)の構造を有する弾性波デバイスの正面図である。

[図34] (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜、および、(0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板を有する、図33(a)～(d)に示す各構造の弾性波共振子の(a)帯域(Bandwidth)、(b)インピーダンス比(Impedance ratio)の、LTの膜厚依存性を示すグラフである。

[図35] (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜、および、(0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板を有し、Al-IDTの一部または全部がLT薄膜に埋め込まれている構造、および、Al-IDTがLT薄膜に埋め込まれていない構造を有する弾性波共振子のインピーダンス比(Impedance ratio)のLTの膜厚依存性を示すグラフである。

[図36] Al-IDT/ (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜(厚み0.15波長)/接合膜/ (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の(a)音速(Phase velocity)、(b)帯域(Bandwidth)、(c)インピーダンス比(Impedance ratio)の、接合膜(Boundary film)の膜厚依存性を示すグラフである。

[図37] (a) Al-IDT/ (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜(厚み0.15波長)/ SiO_2 / Si_xN_y / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板、(b) Al-IDT/ (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜(厚み0.15波長)/ Si_xN_y / SiO_2 / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板、(c) Al-IDT/ (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜(厚み0.15波長)/ ZnO / SiO_2 / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板、(d) Al-IDT/ (0° 、 110° 、 0°) LT薄膜(厚み0.15波長)/ Ta_2O_5 / SiO_2 / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板の構造

を有する弾性波共振子のインピーダンス比 (Impedance ratio) の、 SiO_2 の膜厚依存性を示すグラフである。

[図38] (a) $\text{Al-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 (厚み 0.15 波長) / SiO_2 / Si_xN_y / 接合膜の 3 層目 / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板、(b) $\text{Al-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 (厚み 0.15 波長) / Si_xN_y / SiO_2 / 接合膜の 3 層目 / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、接合膜の 3 層目が様々な材料から成るときのインピーダンス比 (Impedance ratio) の、接合膜の 3 層目 (Third layer film) の膜厚依存性を示すグラフである。

[図39] $\text{Al-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 (厚み 0.15 波長) / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子のインピーダンス (Z) の周波数特性を示すグラフである。

[図40] 各種 $\text{IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 (厚み 0.15 波長) / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、高次モードにおけるインピーダンス比 (Impedance ratio) の、様々な材質のすだれ状電極の厚み (Electrode thickness) 依存性を示すグラフである。

[図41] $\text{Au-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板、および、 $\text{Au-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 / 短絡電極 / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子のインピーダンス比 (Impedance ratio) の LT の膜厚依存性を示すグラフである。

[図42] (a) $\text{Al-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 / $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ 水晶基板、(b) $\text{Al-IDT} / (0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT 薄膜 / $(0^\circ, \theta, 90^\circ)$ 水晶基板の構造を有する弾性波共振子の、LT の各種膜厚での、高次モード (1-th) におけるインピーダンス比 (Impedance ratio) の θ 依存性を示すグラフである。

[図43]本発明の実施の形態の弾性波デバイスの製造方法を示す側面図である。

発明を実施するための形態

[0037] 以下、図面に基づいて、本発明の実施の形態について説明する。

図1乃至図43は、本発明の実施の形態の弾性波デバイスを示している。

図1(b)に示すように、本発明の実施の形態の弾性波デバイス10は、基板11と、その基板11の上に設けられた圧電薄膜12と、その圧電薄膜12の上に設けられたすだれ状電極(IDT)13とを有している。

[0038] 基板11は、 SiO_2 を70質量%以上含んでいる。基板11は、例えば、水晶、パイレックス(登録商標)ガラス、熔融石英、ほう珪酸ガラス、合成石英、石英ガラスなどから成っている。圧電薄膜12は、 LiTaO_3 結晶(LT)または LiNbO_3 結晶(LN)から成っている。また、弾性波共振子の場合、すだれ状電極13を挟むよう設けられた、多数本電極指から成る反射器14を有している。

[0039] すだれ状電極(IDT)13は、1組から成り、それぞれバスバーと、バスバーの長さ方向に対して垂直方向に伸びるよう、バスバーに接続した複数の電極指21とを有している。各IDT13は、複数の電極指21が互いに交互するように(噛み合うように)配置されている。各IDT13は、各電極指21のピッチがほぼ一定になっている。電極指21が m 本の場合、 $(m-1)/2=N$ を対数と呼ぶ。隣り合う電極指21(中央)間の長さを l とすると、 $2l=\lambda$ が1周期になり、弾性波デバイスで励振される弾性波の波長に相当する。

[0040] 各反射器14は、弾性表面波の伝搬方向に沿って、すだれ状電極13との間に間隔を開けて、すだれ状電極13を両側から挟むよう設けられている。各反射器14は、1組のバスバーと、各バスバー間に架け渡されて延びる複数の電極指とを有している。各反射器14は、各電極指のピッチが、すだれ状電極13の各電極指のピッチとほぼ同じピッチで、一定になっている。

[0041] なお、比較のため、図1(a)に、従来の弾性波デバイス50を示す。図

1 (a) に示すように、従来の弾性波デバイス 50 は、L T や L N から成る圧電基板 51 の上に、すだれ状電極 (I D T) 52 が形成された構造を有している。また、すだれ状電極 52 を挟むよう 1 組ずつの反射器 53 を有している。

[0042] なお、以下では、オイラー角 (ϕ 、 θ 、 ψ) を、単に (ϕ 、 θ 、 ψ) で表す。また、圧電薄膜 12 やすだれ状電極 13、すだれ状電極 52 の厚みを、使用する弾性波デバイスの波長 λ に対する倍率で表す。また、基板 11 としては、特に断りがない限り、水晶基板 11 を用いている。また、以下に示す基板 11 や圧電薄膜 12 のオイラー角は、結晶学的に等価なオイラー角であってもよい。

[0043] [L T、L N、水晶の各基板等の特性の具体例]

図 2 (a) および (b) に、図 1 (a) に示す従来の弾性波デバイス 50 で、(0° 、 110° 、 0°) の L T 基板から成る圧電基板 51、および (0° 、 132° 、 0°) の L T 基板から成る圧電基板 51 の上に、それぞれ厚みが 0.08 波長の A l のすだれ状電極 52 を形成して作製した S A W 共振子について、得られたインピーダンス (Z) の周波数特性をそれぞれ示す。

[0044] 図 2 (a) に示すように、(0° 、 110° 、 0°) L T 基板の場合、共振周波数 f_r と反共振周波数 f_a との間に大きなリップルがあり、 f_r と f_a との間の帯域 $BW [= (f_a - f_r) / f_r]$ は 5.2%、共振インピーダンスと反共振インピーダンスとの比 (Z 比) は 53 dB であった。また、図 2 (b) に示すように、(0° 、 132° 、 0°) L T 基板の場合、 f_r と f_a との間のリップルは改善され、 BW は 3.8%、インピーダンスの比は 63 dB であった。

[0045] 図 3 (a) および (b) に、図 1 (b) に示す弾性波デバイス 10 で、L T の圧電薄膜 12 と水晶基板 11 とを組み合わせ、(0° 、 110° 、 0°) L T 薄膜 12 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 130° 、 90°) 水晶基板 11、および、(0° 、 120° 、 0°) L T 薄膜 12 (厚み 0.15

波長) / (0° 、 130° 、 0°) 水晶基板 11 の上に、それぞれ厚みが 0.08 波長の Al のすだれ状電極 13 を形成したものについて、得られたインピーダンス (Z) の周波数特性をそれぞれ示す。

[0046] 図 3 (a) に示すように、(0° 、 110° 、 0°) LT 薄膜 12 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 130° 、 90°) 水晶基板 11 の場合、LT のオイラー角が図 2 (a) と同じであるにもかかわらず、リップルがなくなり、BW は 6.1% で約 20% 広くなり、インピーダンス比は 77.5 dB で 24.5 dB 大きくなり、大幅に改良されている。このインピーダンス比の増加は、Q では 10 倍以上に相当する。また、図 3 (b) に示すように、(0° 、 120° 、 0°) LT 薄膜 12 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 130° 、 0°) 水晶基板 11 の場合、BW は 5.5%、インピーダンス比は 77.0 dB であり、図 2 (b) と比べて、BW が広くなり、インピーダンス比も 15 dB と大幅に改良されている。これらのインピーダンス比の増加は、Q では 10 倍以上に相当する。この結果から、水晶基板 11 を用いることにより、LT 基板単体の場合と比べて、非常に優れた急峻性および挿入損失の特性を得ることができるといえる。また、結合係数も、わずかではあるが大きくすることができる。

[0047] なお、(0° 、 130° 、 90°) 水晶基板 11 や (0° 、 130° 、 0°) 水晶基板 11 では、LSAW とレイリー波とが励振されるが (図 5、図 7 および図 8 参照)、図 3 の特性は LSAW を用いたものである。レイリー波を用いたときの SAW は、全くあるいは小さなレスポンスしか確認されなかった。

[0048] 図 4 (a) および (b) に、(0° 、 110° 、 0°) LT 薄膜 12 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 130° 、 30°) 水晶基板 11、および、(0° 、 110° 、 0°) LT 薄膜 12 (厚み 0.15 波長) / (0° 、 130° 、 60°) 水晶基板 11 の上に、それぞれ厚みが 0.08 波長の Al のすだれ状電極 13 を形成したものについて、得られたインピーダンス (Z) の周波数特性をそれぞれ示す。図 4 (a) および (b) とともに、帯域内に大き

なりリップルが生じており、良好な特性が得られなかった。しかし、水晶の ϕ が、 85° 、 95° 、 -5° 、 5° のときには、図3(a)および(b)と同じ特性が得られている。このように、A1厚とオイラー角によっては、大きなリップルが生じることがあるため、A1厚とオイラー角の選定は重要である。

[0049] 図5に、(0° 、 130° 、 ϕ)水晶基板11における、レイリー波およびLSAWの音速の伝搬方向 ϕ 依存性を求めたものを示す。図5に示すように、 $\phi=0^\circ$ 、 90° の水晶基板11のLSAW音速は、約 $5,000\text{ m/s}$ と高音速であるが、 $\phi=30^\circ$ 、 60° でのLSAW音速は、約 $3,800\text{ m/s}$ と低音速である。なお、伝搬方向 ϕ に対する音速 V の接線 $\delta V/\delta \phi$ が0のとき、PFA(パワーフローアングル) $=0$ となる。図5のレイリー波では $\phi=0^\circ$ 、 35° 、 90° で、漏洩弾性表面波では $\phi=0^\circ$ 、 42° 、 90° 近傍で、PFA $=0$ となる。

[0050] 図3乃至図5に示すように、用いたLT薄膜12のLSAW音速が $4,100\text{ m/s}$ であるのに対し、LSAW音速が $3,800\text{ m/s}$ で低音速である(0° 、 130° 、 30°)および(0° 、 130° 、 60°)の水晶基板11を用いた場合には、A1厚が0.08波長のときは、良好な特性が得られず、LSAW音速が $5,000\text{ m/s}$ 程度で高音速の(0° 、 130° 、 0°)および(0° 、 130° 、 90°)の水晶基板11を用いた場合には、良好な特性が得られている。また、図2および図3に示すように、(0° 、 110° 、 0°)LT基板と(0° 、 132° 、 0°)LT基板とでは、前者の方が大きな漏洩成分をもつにもかかわらず、特性改善効果が大きい。これらの結果から、特性向上の大きな原因として、LT薄膜12よりもLSAWが高音速の水晶基板11を接合することにより、LT薄膜12のLSAWの漏洩成分がゼロになることが考えられる。

[0051] 図6(a)および(b)に、高音速を持つ(110)面(001)方向伝搬Si基板およびcサファイア基板に、それぞれ(0° 、 132° 、 0°)LT薄膜(厚み0.15波長)を接合し、その上にそれぞれ厚みが0.08

波長のA1のすだれ状電極を形成したSAW共振子について、得られたインピーダンス(Z)の周波数特性をそれぞれ示す。図6(a)に示すように、Si基板を用いた場合、BWは4.4%、インピーダンス比は69dBであった。また、図6(b)に示すように、サファイア基板を用いた場合、BWは5.7%、インピーダンス比は68dBであった。

[0052] 図6(a)および(b)に示す特性は、図2(b)のLT基板単体のSAW共振子の特性に比べ、BWは広く、インピーダンス比は5から6dB良好になっているが、図3に示すLT薄膜12/水晶基板11の方が、より良好な特性を有している。水晶、LT、LNなどの圧電基板は、レイリー波の他に、LSAWが励起されるが、Si基板やサファイア基板は圧電性がないため、SAWモードのうちレイリー波しか励起されない。このことから、Si基板やサファイア基板を使用するより、水晶基板11を使用した方が良好な特性が得られるのは、用いた水晶基板11がLT薄膜12と同じLSAWを使用しているのに対し、Si基板やサファイア基板では、LT薄膜に比べバルク波の横波音速が大きく、かつ、使用したLT薄膜のLSAWとは異なるレイリー波を用いているためだと考えられる。

[0053] 以上の結果から、用いるLT、LNなどの圧電薄膜12に対し、バルク波の横波の音速が近く、その音速よりSH成分を主成分とする高音速の基板を下地基板として接合することにより、良好な特性が得られる。圧電薄膜12と基板とのLSAWの音速差は、大きければ大きいほど好ましく、例えば300m/s以上であることが好ましく、さらに600m/s以上であることが好ましい。

[0054] 図7(a)および(b)に、(0° 、 θ 、 0°)水晶基板11のレイリー波とLSAWの、音速およびTCFの θ 依存性をそれぞれ示す。また、図7(c)に、LSAWの縦波の変位成分U1、SH成分U2、SV成分U3の基板表面での変位の比率を示す。図7(a)に示すように、 $\theta = 70^\circ \sim 165^\circ$ で4,500m/s以上、 $\theta = 90^\circ \sim 150^\circ$ で4,800m/s以上、 $\theta = 100^\circ \sim 140^\circ$ で5,000m/s以上の高音速が得られている。また、図7(b)に示すように、レイリー波では、 $\theta = 0^\circ \sim 132^\circ$

° でTCFがプラスになり、LSAWでは、 $\theta = 0^\circ \sim 18^\circ$ 、 $43^\circ \sim 66^\circ$ 、 $132^\circ \sim 180^\circ$ でTCFがプラスになっている。LSAWでマイナスのTCFを有するLTおよびLNとの組み合わせでは、このレイリー波やLSAWでTCFがプラスになるオイラー角を有する水晶基板11が好ましく、ゼロppm/°に近い良好なTCFを得ることができる。より好ましくは、+5ppm/°以上のTCFを有する、レイリー波の $\theta = 0^\circ \sim 130^\circ$ 、LSAWの $\theta = 0^\circ \sim 16^\circ$ 、 $44^\circ \sim 65^\circ$ 、 $135^\circ \sim 180^\circ$ の水晶基板11と組み合わせることにより、より良好なTCFを得ることができる。また、図7(c)に示すように、LSAW音速の大きい $\theta = 70^\circ \sim 165^\circ$ で、SH成分(U2成分)が50%以上と多くなっていることがわかる。

[0055] 図8(a)および(b)に、(0° 、 θ 、 90°)水晶基板11のレイリー波とLSAWの、音速およびTCFの θ 依存性をそれぞれ示す。また、図8(c)に、LSAWの縦波の変位成分U1、SH成分U2、SV成分U3の基板表面での変位の比率を示す。図8(a)に示すように、 $\theta = 90^\circ \sim 150^\circ$ で4,500m/s以上、 $\theta = 103^\circ \sim 143^\circ$ で4,800m/s以上、 $\theta = 110^\circ \sim 135^\circ$ で5,000m/s以上の高音速が得られている。また、図8(b)に示すように、レイリー波では、 $\theta = 0^\circ \sim 42^\circ$ 、 $170^\circ \sim 180^\circ$ でTCFがプラスになり、LSAWでは、 $\theta = 0^\circ \sim 41^\circ$ 、 $123^\circ \sim 180^\circ$ でTCFがプラスになっている。LSAWでマイナスのTCFを有するLTおよびLNとの組み合わせでは、レイリー波やLSAWでTCFがプラスになるオイラー角を有する水晶基板11が好ましく、ゼロppm/°に近い良好なTCFを得ることができる。より好ましくは、+5ppm/°以上のTCFを有する、レイリー波では $\theta = 0^\circ \sim 39^\circ$ 、 $172^\circ \sim 180^\circ$ 、LSAWでは $\theta = 0^\circ \sim 39^\circ$ 、 $126^\circ \sim 180^\circ$ の水晶基板11と組み合わせることにより、より良好なTCFを得ることができる。また、図8(c)に示すように、LSAW音速の大きい $\theta = 85^\circ \sim 165^\circ$ で、SH成分(U2成分)が65%以上と多くなってい

ることがわかる。

[0056] 図9に、各種オイラー角の水晶基板11の音速を示す。図9に示すオイラー角の水晶基板11では、 $\phi = 0^\circ \sim 20^\circ$ 、 $70^\circ \sim 120^\circ$ 、 $160^\circ \sim 180^\circ$ で、4,500 m/s以上の高音速が得られている。また、図示していないが、 $(1^\circ \sim 39^\circ, 100^\circ \sim 150^\circ, 0^\circ \sim 20^\circ)$ 、 $(1^\circ \sim 39^\circ, 100^\circ \sim 150^\circ, 70^\circ \sim 120^\circ)$ 、 $(1^\circ \sim 39^\circ, 100^\circ \sim 150^\circ, 160^\circ \sim 180^\circ)$ で、高音速のLSAWが得られる。

[0057] 弾性波デバイスでは、LSAWが斜めに伝搬しないよう、パワーフローアングルがゼロに近い方向（LSAWの伝搬方向の接線がゼロの伝搬方向）の基板を使用するのが好ましい。図9に示すオイラー角の水晶基板11では、パワーフローアングルがゼロに近い方向は、 $(0^\circ \pm 5^\circ, \theta, 35^\circ \pm 8^\circ)$ 、 $(10^\circ \pm 5^\circ, \theta, 42^\circ \pm 8^\circ)$ 、 $(20^\circ \pm 5^\circ, \theta, 50^\circ \pm 8^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, \theta, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(10^\circ \pm 5^\circ, \theta, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(20^\circ \pm 5^\circ, \theta, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, \theta, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(10^\circ \pm 5^\circ, \theta, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(20^\circ \pm 5^\circ, \theta, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であり、これらのオイラー角の基板を用いることが好ましい。

[0058] [LT薄膜／水晶基板の構造を有する弾性波デバイスの具体的な実施例]

図10(a)および(b)に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LT基板のレイリー波とLSAWの、音速および電気機械結合係数（結合係数：coupling factor）の θ 依存性を示す。また、図10(c)に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LT基板のLSAWの、TCFの θ 依存性を示す。図10(a)および(b)に示すように、LT基板では一般的に、漏洩成分が小さく、結合係数が4%以上である、 $\theta = 120^\circ \sim 146^\circ$ のLSAWが使用されている。このときの音速 V_m （基板表面を電氣的に短絡した時の音速）は、4,000～4,100 m/sである。しかし、フィルタの帯域は、使用する基板の結合係数に依存するため、所望の帯域を満足させる結合係数を選ぶ必要がある。本発明の実施の形態の弾性波デバイス10によれば、LTの下に同程度あるいは高音速

な基板を使用すると漏洩成分が小さくなるため、結合係数が大きい $\theta = 65^\circ \sim 148^\circ$ を使用し、そのときの音速 $3,700 \sim 4,100 \text{ m/s}$ と同程度あるいはそれより高音速である水晶基板11を用いることにより、良好な特性が得られる。

[0059] また、図10(c)に示すように、LT基板のLSAWのTCFはいずれもマイナスで、 $-30 \sim -70 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ である。LT基板単体で使用されている $\theta = 120^\circ \sim 146^\circ$ のLSAWのTCFは、約 $-33 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ であるが、レイリー波やLSAWのプラスのTCFを有する水晶基板11、すなわち図7に示すレイリー波の $(0^\circ, 0^\circ \sim 130^\circ, 0^\circ)$ 、LSAWの $(0^\circ, 132^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ)$ の水晶基板11、または、図8に示すレイリー波の $(0^\circ, 0^\circ \sim 39^\circ, 90^\circ)$ 、 $(0^\circ, 172^\circ \sim 180^\circ)$ 、LSAWの $(0^\circ, 0^\circ \sim 41^\circ, 90^\circ)$ 、 $(0^\circ, 123^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ)$ の水晶基板11と組み合わせることにより、LT基板単体のTCFの $1/3$ 以下の良好なTCFが得られる。

[0060] 図11(a)および(b)に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LT薄膜12(厚み0.15波長) / $(0^\circ, 115^\circ \sim 145^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた共振子の帯域およびインピーダンス比の、LTの θ 依存性を示す。なお、図11(a)および(b)のグラフ中の θ は、水晶基板11の θ である。図11(a)に示すように、LTの $\theta = 82^\circ \sim 148^\circ$ で、3.5%の帯域が得られている。また、図11(b)に示すように、LTの $\theta = 85^\circ \sim 148^\circ$ で、70dB以上、LTの $\theta = 90^\circ \sim 140^\circ$ で、73dB以上、LTの $\theta = 95^\circ \sim 135^\circ$ で、75dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0061] 図12(a)にAl厚0.08波長のときの、図12(b)にAl厚0.2波長のときの、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12(厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、Alのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、得られた弾性波共振子のインピーダ

ンス比の、水晶の θ 依存性を示す。図12(a)では、実線は共振子の $f_r \sim f_a$ 間の帯域内にリップルのない特性を、破線はリップルのある特性を示している。水晶の(0° 、 $115^\circ \sim 145^\circ$ 、 0°)で、良好なインピーダンス比が得られているがそれ以外では、リップルが見られる。しかし、図12(b)ではほとんど、リップルは見られず、どの方位角でも大きなインピーダンス比が得られている。このように、A1電極厚により、インピーダンス比の θ 依存性が異なる。なお、図示していないが、A1電極厚が0.08波長以上では、A1電極厚が0.2波長に近い特性が得られている。A1電極が0.08波長のとき、図7(b)から、水晶のLSAWがプラスのTCFとなる範囲を考慮すると、水晶基板11が(0° 、 $132^\circ \sim 145^\circ$ 、 0°)であることが好ましく、(0° 、 $135^\circ \sim 145^\circ$ 、 0°)であることがより好ましい。この場合、マイナスのTCFを有するLT薄膜12と、プラスのTCFを有する水晶基板11とを組み合わせることにより、弾性波デバイス10のTCFを大幅に改善することができる。特に、水晶基板11が(0° 、 $135^\circ \sim 145^\circ$ 、 0°)のときには、より良好なTCFが得られる。

[0062] 図13(a)および(b)に、(0° 、 110° 、 0°)LT薄膜12／(0° 、 130° 、 0°)水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のA1のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、LTの膜厚依存性を示す。図13(a)に示すように、LTの膜厚が0.02波長～2波長で、3%以上の帯域が得られている。また、図13(b)に示すように、A1厚が0.08波長のとき、LTの膜厚が0.01波長～0.6波長で70dB以上、0.02波長～0.4波長で73dB以上、0.03波長～0.3波長で75dBのインピーダンス比が得られている。一方、A1厚が0.2波長のときは、LT厚2波長以下で70dBのインピーダンス比が、0.02波長～0.043波長で73dB以上、0.03波長～0.33波長で75dBのインピーダンス比が得られている。なお、A1厚が0

． 1 波長～0. 3 波長のときも、A l 厚が 2 波長のときとほぼ同じ値を示す。

[0063] 図 1 4 (a) および (b) に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ L T 薄膜 1 2 (厚み 0. 1 5 波長) / $(0^\circ, 100^\circ \sim 175^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板 1 1 の上に、厚みが 0. 0 8 波長の A l のすだれ状電極 1 3 を形成した弾性波デバイス 1 0 について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、L T の θ 依存性を示す。なお、図 1 4 (a) および (b) のグラフ中の θ は、水晶基板 1 1 の θ である。図 1 4 (a) に示すように、水晶基板 1 1 の $\theta = 165^\circ, 175^\circ$ を除けば、L T の $\theta = 75^\circ \sim 155^\circ$ で 3. 5 % の帯域が得られている。また、図 1 4 (b) に示すように、L T の $\theta = 80^\circ \sim 152^\circ$ で 7 0 d B 以上、 $\theta = 90^\circ \sim 140^\circ$ で 7 3 d B 以上、 $\theta = 95^\circ \sim 135^\circ$ で 7 5 d B 以上、L T の $\theta = 103^\circ \sim 125^\circ$ でおおむね 7 7 d B 以上のインピーダンス比が得られている。

[0064] 図 1 5 (a) に、 $(0^\circ, 120^\circ, 0^\circ)$ L T 薄膜 1 2 (厚み 0. 1 5 波長) / $(0^\circ, \theta, 90^\circ)$ 水晶基板 1 1 の上に、厚みが 0. 0 8 波長の A l のすだれ状電極 1 3 を形成した弾性波デバイス 1 0 について、得られた弾性波共振子のインピーダンス比の、水晶基板 1 1 の θ 依存性を示す。図中、実線は共振子の帯域内にリップルのない特性を、破線はリップルのある特性を示している。一方、図 1 5 (b) に、L T 厚が 0. 1 5 波長のとき、A l 厚が 0. 1 波長、ならびに、L T 厚が 1. 2 5 波長および 2 波長のとき、A l 厚が 0. 2 波長の、インピーダンス比とオイラー角 θ との関係を示す。

[0065] A l 厚の 0. 0 8 波長の図 1 5 (a) では、水晶の $(0^\circ, 100^\circ \sim 165^\circ, 90^\circ)$ で、良好なインピーダンス比が得られている。図 8 (b) から、A l 厚の 0. 0 8 波長近傍では、水晶のレイリー波や L S A W がプラスの T C F となる水晶基板 1 1 のオイラー角が $(0^\circ, 123^\circ \sim 165^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であることが好ましく、 $+5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以上の T C F となる水晶のオイラー角 $(0^\circ, 126^\circ \sim 165^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ がより好ましく、 $+7 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以上の T C F となる $(0^\circ, 127^\circ \sim 165^\circ,$

90° ± 5°) であることがさらに好ましい。この場合、マイナスのTCFを有するLT薄膜12と、プラスのTCFを有する水晶基板11とを組み合わせることにより、弾性波デバイス10のTCFを大幅に改善することができる。特に、水晶基板11が(0°、127° ~ 165°、90° ± 5°)のときには、より良好なTCFが得られる。

[0066] 図15(c)に、Al厚が0.1波長のときの、(0°、120°、0°) LT薄膜12(厚み0.15波長) / (0°、125.25°、90°) 水晶基板11の周波数特性を示す。この水晶の方位角では、特定のAl厚で帯域内にリップルが発生しており、そのために図15(b)のインピーダンス比が他の方位角より小さくなっている。特に、(0°、126°、0°) LT薄膜12との組み合わせのときに大きなリップルが発生しやすいため、(0°、126°、0°) LT薄膜12と(0°、125.25°、90°) 水晶基板11との組み合わせは避けるのが望ましい。

[0067] 図16(a)および(b)に、(0°、110°、0°) LT薄膜12 / (0°、128°、90°) 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、LTの膜厚依存性を示す。図16(a)に示すように、図13(a)とほぼ同じ特性が得られ、LTの膜厚が0.04波長以上2波長以下で、3%以上の帯域が得られている。また、図16(b)に示すように、図13(b)とほぼ同じ特性が得られ、Al厚が0.08波長のとき、LTの膜厚が0.01波長~0.6波長で70 dB以上、0.02波長~0.4波長で73 dB以上、0.03波長~0.3波長で75 dBのインピーダンス比が得られている。一方、Al厚が0.2波長のとき、LT厚が2波長以下で70 dBのインピーダンス比が、0.02波長~0.043波長で73 dB以上、0.03波長~0.33波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。なお、Al厚が0.1波長以下では、0.08波長と同程度の値を示し、Al厚が0.1波長~0.3波長のとき、Al厚が0.2波長のときとほぼ

同じ値を示す。

- [0068] 図17(a)および(b)に、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12/ $(0^\circ, 45^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.12波長および0.2波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ、LT薄膜12の厚みが0.15波長のときのインピーダンス(Z)の周波数特性および、インピーダンス比のLTの膜厚依存性を示す。ここで、使用した $(0^\circ, 45^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11は、レイリー波のTCFがプラスの25ppm/°C、レイリー波の音速が3270m/s、LSAWの音速が3950m/sである。図17(a)に示すように、周波数は3GHzと低い、75dBの良好なインピーダンス比が得られている。また、図17(b)に示すように、LTの膜厚が0.43波長以下で、70dB以上のインピーダンス比が得られている。このように、Al電極を少し厚くすることにより、LSAW音速の遅い基板でも良好な特性が得られる。
- [0069] 図18に、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12/ $(20^\circ, 120^\circ, 115^\circ)$ 水晶基板11、および、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12/ $(0^\circ, 130^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、インピーダンス比のLTの膜厚依存性を示す。ここで、使用した $(20^\circ, 120^\circ, 115^\circ)$ 水晶基板11は、音速5000m/s前後の高音速のS波(fast shear wave)を励振する方位角を有し、 $(0^\circ, 130^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11は、高音速のLSAWを励振する方位角を有するものである。図18に示すように、 $(0^\circ, 130^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11のものでは、70dB以上のインピーダンス比が得られるのは、LT厚が0.8波長以下のときだけであるのに対し、高音速のS波の $(20^\circ, 120^\circ, 115^\circ)$ 水晶基板11のものでは、LT厚が10波長でも72dBのインピーダンス比が得られ、図示していないが、LT厚が20波長でも70dBが得られている。このような高音速S波のオイラー角には、 $(20^\circ \pm 5^\circ, 120^\circ \pm 10^\circ, 115^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \pm 10^\circ)$

、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 90^\circ, 75^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ, 0^\circ \pm 10^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ, 60^\circ \pm 10^\circ)$ がある。

[0070] 図19(a)～(c)にそれぞれ、 $(0^\circ, \theta_{LT}, 0^\circ)$ LT薄膜12(厚み0.15波長)／ $(0^\circ, \theta_{\text{quartz}}, 0^\circ)$ 水晶基板11、 $(0^\circ, \theta_{LT}, 0^\circ)$ LT薄膜12(厚み0.15波長)／ $(0^\circ, \theta_{\text{quartz}}, 90^\circ)$ 水晶基板11、 $(0^\circ, \theta_{LT}, 0^\circ)$ LT薄膜12(厚み0.15波長)／ $(0^\circ, \theta_{\text{quartz}}, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 水晶基板11における、TCFの θ_{quartz} 依存性を示す。図19(c)の水晶基板11の $30^\circ \sim 60^\circ$ は伝搬方向であり、水晶基板11の θ に応じてPFA=0の伝搬方向が少しずつ変化するが、PFA=0の伝搬方向はいずれも、 $30^\circ \sim 60^\circ$ の範囲内である。LT薄膜12は、最適方位角 $(0^\circ, 80^\circ \sim 148^\circ, 0^\circ)$ のうち、図10(c)に示すTCFの絶対値のほぼ最大値を示す $(0^\circ, 125^\circ, 0^\circ)$ 、最小値を示す $(0^\circ, 80^\circ, 0^\circ)$ および $(0^\circ, 148^\circ, 0^\circ)$ について示した。図19(a)～(c)に示すように、LT薄膜12のTCFの半分で、実用的な $-20 \sim +20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ を実現できる水晶基板11の方位角は、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 23^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 32^\circ \sim 69^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 118^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 62^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 118^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 72^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 117^\circ \sim 180^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ である。より良好な $-10 \sim +10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ を実現できる水晶基板11の方位角は、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 12^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 37^\circ \sim 66^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 132^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 50^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 126^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 17^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 35^\circ \sim 67^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 123^\circ \sim 180^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ である。

[0071] [LN薄膜／水晶基板の構造を有する弾性波デバイスの具体的な実施例]

図20(a)および(b)に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LN基板のレイリー波とLSAWの、音速および電気機械結合係数の θ 依存性を示す。また、図20(c)に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LN基板のレイリー波とLSAWの、TCFの θ 依存性を示す。図20(a)および(b)に示すように、LN基板では一般的に、漏洩成分が小さく結合係数が多い、 $\theta = 131^\circ \sim 154^\circ$ のLSAWや、結合係数が多い、 $\theta = 90^\circ$ 近傍のLSAWや、基板表面に音速の遅い電極を用いて、漏洩成分をゼロにしたラブ波などが使用されている。使用されているLSAWの音速 V_m は、 $4,150 \sim 4,450 \text{ m/s}$ である。

[0072] また、図20(c)に示すように、LN基板のLSAWのTCFはいずれもマイナスであり、LN基板単体で使用されている $\theta = 131^\circ \sim 154^\circ$ や $\theta = 90^\circ$ 近傍のLSAWのTCFは、 $-73 \sim -93 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ と良くない。

[0073] 図21に、LSAW音速が $4,250 \text{ m/s}$ の $(0^\circ, 131^\circ, 0^\circ)$ LN薄膜12（厚み0.15波長）と、LSAW音速が $5,040 \text{ m/s}$ の $(0^\circ, 115^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11（図8(a)参照）とを組み合わせ、LN薄膜12の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波共振子について、得られたインピーダンス（Z）の周波数特性を示す。図21に示すように、インピーダンス比は、79.3 dBであり、LN基板単体の従来のSAW特性に比べ19 dB大きくなった。このように、LNを用いても、LTの場合と同様に、良好な特性が得られる。すなわち、結合係数が多いLN薄膜12を使用し、そのときのLSAW音速と同程度あるいは音速より高音速である水晶基板11を用いることにより、良好な特性が得られる。

[0074] 図22(a)に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LN薄膜12（厚み0.15波長）／ $(0^\circ, 130^\circ, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、LSAWおよびレイリー波に対して得られた弾性波共振子のインピー

ダンス比の、 LN の θ 依存性を示す。図22(a)に示すように、 $LSAW$ の場合、 A の厚が0.08波長と0.2波長のときの共振子のインピーダンス比を示し、中央に広がるインピーダンス比70dB以上の実線がリップルのない良好な特性を、両側の70dB以下の破線がリップルのある特性を示している。 A の厚が0.08波長のとき、 LN の $\theta = 100^\circ \sim 160^\circ$ で、 A の厚が0.2波長のとき、 LN の $\theta = 70^\circ \sim 165^\circ$ で、大きなインピーダンス比が得られている。 A の厚が0.06波長から0.09波長のときには、 A の厚が0.08波長と同じインピーダンス比を示す。 A の厚が0.09波長から0.22波長のときには、0.2波長のときと同じインピーダンス比が得られる。一方、レイリー波の場合、 A の厚が0.08波長のときの共振子のインピーダンス比を示し、 LN の $\theta = 35^\circ \sim 70^\circ$ で70dB以上、 $\theta = 45^\circ \sim 63^\circ$ で75dB以上の大きなインピーダンス比が得られている。

[0075] 図22(b)に、 $(0^\circ, 131^\circ, 0^\circ)$ LN 薄膜12(厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長の A のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、 $LSAW$ に対して得られた弾性波共振子のインピーダンス比、ならびに、 $(0^\circ, 55^\circ, 0^\circ)$ LN 薄膜12(厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長の A のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、レイリー波に対して得られた弾性波共振子のインピーダンス比の、水晶基板11の θ 依存性を示す。図中、両側に分かれた75dB以下のインピーダンス比を示しているのは、帯域内にリップルのある特性であり、インピーダンス比75dB以上の値を示しているのはリップルのない良好な特性である。図22(b)に示すように、 $(0^\circ, 131^\circ, 0^\circ)$ LN 薄膜12のものは、 A の厚が0.08波長でも、水晶の $\theta = 120^\circ \sim 145^\circ$ で、大きなインピーダンス比が得られているが、 A の厚が0.2波長のときには、全方位角で大きなインピーダンス比が得られている。なお、 A の厚が0.06波長から0.09波長ときには

、A I 厚が0.08波長と同じインピーダンス比を示す。A I 厚が0.09波長から0.22波長のときには、0.2波長のときと同じインピーダンス比が得られる。A I 厚が0.08波長のときには、図7(b)から、水晶基板11のLSAWのTCFがプラスとなるオイラー角は、(0° 、 $132^\circ \sim 180^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であり、 $+5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ のTCFとなるオイラー角は、(0° 、 $135^\circ \sim 180^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)である。この場合、マイナスのTCFを有するLN薄膜12と、プラスのTCFを有する水晶基板11とを組み合わせることにより、弾性波デバイス10のTCFを大幅に改善することができる。図7(b)および図22(b)の結果から、TCFとインピーダンス比とを考慮すると、水晶基板11のオイラー角は(0° 、 $132^\circ \sim 145^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であることが好ましく、(0° 、 $135^\circ \sim 145^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)であることがより好ましい。一方、図22(b)に示すように、(0° 、 55° 、 0°) LN薄膜12のものは、実線で示すように、水晶基板11のオイラー角が(0° 、 $90^\circ \sim 178^\circ$ 、 $0^\circ \pm 5^\circ$)で、70dBのインピーダンス比が得られている。また、破線部分はリップがあり、インピーダンス比が70dB以下の特性を示している。この水晶基板11の方位角では、LSAWあるいはレイリー波のいずれかが、TCFプラスを示している。

[0076] 図23(a)および(b)に、(0° 、 131° 、 0°) LN薄膜12／(0° 、 130° 、 0°) 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のA I のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、LNの膜厚依存性を示す。図23(a)に示すように、LNの膜厚が0.03波長～2波長で、7%以上の帯域が得られている。また、図23(b)に示すように、A I 厚が0.08波長のとき、LNの膜厚が0.012波長～0.6波長で70dB以上、0.02波長～0.5波長で73dB以上、0.03波長～0.33波長で75dBのインピーダンス比が得られている。A I 厚が0.2波長のとき、LNの膜厚が0.012波長～2波長で70dB以

上、0.02波長～0.7波長で73 dB以上、0.03波長～0.4波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0077] 図24 (a) に、 $(0^\circ, \theta, 0^\circ)$ LN薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, 130^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のA1のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、LSAWおよびレイリー波に対して得られた弾性波共振子のインピーダンス比の、LNの θ 依存性を示す。図24 (a) に示すように、LSAWの場合、A1厚0.08波長と0.2波長のときの共振子のインピーダンス比を示し、インピーダンス比70 dB以上の中央の実線が帯域内にリップルのない特性を、両側の70 dB以下の破線がリップルのある特性を示している。A1厚が0.08波長のとき、LNの $\theta = 95^\circ \sim 155^\circ$ で、A1厚が0.2波長のとき、 $\theta = 70^\circ \sim 170^\circ$ で、大きなインピーダンス比が得られている。なお、A1厚が0.06波長から0.09波長のときには、A1厚が0.08波長と同じインピーダンス比を示す。A1厚が0.09波長から0.22波長のときには、0.2波長のときと同じインピーダンス比が得られる。一方、レイリー波の場合、A1厚が0.08波長のときの共振子のインピーダンス比を示し、LNの $\theta = 25^\circ \sim 51^\circ$ で70 dB以上、 $\theta = 29^\circ \sim 47^\circ$ で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0078] 図24 (b) に、 $(0^\circ, 131^\circ, 0^\circ)$ LN薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のA1のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、LSAWに対して得られた弾性波共振子のインピーダンス比、ならびに、 $(0^\circ, 38^\circ, 0^\circ)$ LN薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長のA1のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、レイリー波に対して得られた弾性波共振子のインピーダンス比の、水晶基板11の θ 依存性を示す。図24 (b) に示すように、LSAWの場合、インピーダンス比70 dB以上の中央の実線が帯域内にリップルのない特性を、両側の70 dB以下の破

線がリップルのある特性を示している。A I 厚が0.08波長のとき、水晶の $\theta = 90^\circ \sim 155^\circ$ で、A I 厚が0.2波長のとき、全方位角で、大きなインピーダンス比が得られている。なお、A I 厚が0.06波長から0.09波長のときには、A I 厚が0.08波長と同じインピーダンス比を示す。A I 厚が0.09波長から0.22波長のときには、0.2波長のときと同じインピーダンス比が得られる。一方、図8(b)から、水晶基板11は、LSAWのTCFがプラスとなるオイラー角は、 $(0^\circ, 123^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であり、 $+5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ のTCFとなるオイラー角は、 $(0^\circ, 126^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ である。この場合、マイナスのTCFを有するLN薄膜12と、プラスのTCFを有する水晶基板11とを組み合わせることにより、弾性波デバイス10のTCFを大幅に改善することができる。図8(b)および図24(b)の結果から、TCFとインピーダンス比とを考慮すると、水晶基板11のオイラー角は $(0^\circ, 123^\circ \sim 155^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であることが好ましく、 $(0^\circ, 126^\circ \sim 155^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ であることがより好ましい。さらに好ましいのは、水晶のLSAWのTCFが $+7 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以上の $(0^\circ, 127^\circ \sim 155^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ である。一方、レイリー波の場合、水晶基板11のオイラー角が $(0^\circ, 80^\circ \sim 160^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ で70dBの、 $(0^\circ, 115^\circ \sim 145^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ で75dBのインピーダンス比が得られている。LSAWやレイリー波がプラスTCFを示す方位角を考慮に入れると、水晶基板11のオイラー角は、 $(0^\circ, 125^\circ \sim 160^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ が望ましい。

[0079] 図25(a)および(b)に、 $(0^\circ, 131^\circ, 0^\circ)$ LN薄膜12/ $(0^\circ, 115^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長および0.2波長のA I のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、LNの膜厚依存性を示す。図25(a)に示すように、LNの膜厚が0.012波長～2波長で、5%以上の帯域が得られている。また、図25(b)に

示すように、A I 厚が0.08波長のとき、L Nの膜厚が0.01波長～0.5波長で70 dB以上、0.02波長～0.33波長で73 dB以上、0.06波長～0.3波長で75 dBのインピーダンス比が得られている。一方、A I 厚が0.2波長のとき、L Nの膜厚が0.01波長～2波長で70 dB以上、0.02波長～0.43波長で73 dB以上、0.06波長～0.36波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0080] 図26 (a)～(c)にそれぞれ、 $(0^\circ, \theta_{LN}, 0^\circ)$ L N薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta_{\text{quartz}}, 0^\circ)$ 水晶基板11、 $(0^\circ, \theta_{LN}, 0^\circ)$ L N薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta_{\text{quartz}}, 90^\circ)$ 水晶基板11、 $(0^\circ, \theta_{LN}, 0^\circ)$ L N薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, \theta_{\text{quartz}}, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 水晶基板11における、TCFの θ_{quartz} 依存性を示す。図26 (c)の水晶基板11の $30^\circ \sim 60^\circ$ は伝搬方向であり、水晶基板11の θ に応じてPFA=0の伝搬方向が少しずつ変化するが、PFA=0の伝搬方向はいずれも、 $30^\circ \sim 60^\circ$ の範囲内である。L N薄膜12は、最適方位角 $(0^\circ \pm 5^\circ, 75 \sim 165^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ のうち、図20 (c)に示すLSAWのTCFの絶対値の最小値を示す $(0^\circ, 154^\circ, 0^\circ)$ 、最大値を示す $(0^\circ, 85^\circ, 0^\circ)$ 、およびレイリー波の最適方位の $(0^\circ, 38^\circ, 0^\circ)$ について示した。図26 (a)～(c)に示すように、TCFの実用的な $-20 \sim +20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ を実現できる水晶基板11の方位角は、LSAWでは、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 16^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 42^\circ \sim 64^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 138^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 30^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 130^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 28^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 42^\circ \sim 70^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 132^\circ \sim 180^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ である。レイリー波では、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 32^\circ \sim 118^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 30^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 173^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 142^\circ, 30 \sim 60^\circ)$ で

ある。より良好な $-10 \sim +10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ を実現できる水晶基板11の方位角は、LSAWでは、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 43^\circ \sim 61^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 147^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 15^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 134^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 23^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 43^\circ \sim 67^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 137^\circ \sim 180^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ)$ である。レイリー波では、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 40^\circ \sim 102^\circ, 0^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 0^\circ \sim 17^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 175^\circ \sim 180^\circ, 90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(0^\circ \pm 5^\circ, 13^\circ \sim 130^\circ, 30 \sim 60^\circ)$ である。

[0081] 図27に、 $(90^\circ, 90^\circ, \phi)$ LT薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11、および、 $(90^\circ, 90^\circ, \phi)$ LN薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した、縦波型の漏洩弾性表面波共振子の弾性波デバイス10について、インピーダンス比のLTの ϕ 依存性を示す。図27に示すように、LT薄膜12のものでは、 $\phi = 33^\circ \sim 55^\circ, 125^\circ \sim 155^\circ$ のときに、LN薄膜12のものでは、 $\phi = 38^\circ \sim 65^\circ, 118^\circ \sim 140^\circ$ のときに、70 dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0082] [水晶以外の基板の検討]

基板11として、水晶以外の材料について検討を行った。図28に、基板11として熔融石英基板を用い、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12 (厚み0.15波長) / 熔融石英基板の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、インピーダンス(Z)の周波数特性を示す。また、表7に、熔融石英など、基板11等の薄膜に使用される各種材料の定数を示す。表7に示すように、使用した熔融石英は、 SiO_2 が100質量%であり、バルク波の横波の音速が約 $3,757 \text{ m/s}$ である。図28に示すように、熔融石英基板で、76 dBの良好なイン

ピーダンス比が得られている。表 7 に示すように、 SiO_2 膜は溶融石英と同じ定数であり、 SiO を成分とする膜は、 SiOF や SiON などの膜であり、 SiO 以外の成分を Z としたとき、 SiO_xZ_y の化学式において、 x が $x+y$ に対し 30% 以上である膜を示している。この膜は、 SiO_2 膜と同じ特性が得られる。

[0083]

[表7]

材料	密度(Kg/m ³)	C33E(Pa)	縦波音速(m/s)	音響インピーダンス	C44E(Pa)	横波音速(m/s)	音響インピーダンス	線膨張係数(°C)	SiO ₂ 成分
TeO ₂	5990	1.058E+11	4202.71	2.517E+07	2.650E+10	2103.34	1.280E+07		0
Ta ₂ O ₅	8015	2.148E+11	5176.85	4.149E+07	5.690E+10	2664.43	2.136E+07		0
TaN	14300	4.570E+11	5653.14	8.084E+07	1.058E+11	2717.46	3.886E+07		0
ZnO	5665	2.096E+11	6082.69	3.446E+07	4.230E+10	2732.56	1.548E+07		0
シリカガラス	2400	7.100E+10	5439.06	1.305E+07	2.500E+10	3227.49	7.746E+06		60%
バイレックス	2230	7.270E+10	5709.72	1.273E+07	2.72E+10	3494.39	7.792E+06		81%
ほう珪酸ガラス	2.365	7.470E+10	5620.11	1.329E+07	2.930E+10	3519.80	8.324E+06		82%
LN	4640	2.424E+11	7227.82	3.354E+07	5.94E+10	3577.95	1.680E+07	1.54E-05	0
LT	7454	2.80E+11	6126.74	4.567E+07	9.68E+10	3603.65	2.686E+07	1.61E-05	0
合成石英	2200	7.820E+10	5982.00	1.312E+07	2.900E+10	3630.68	7.987E+06	4.70E-07	99%
溶融石英	2210	7.850E+10	5959.90	1.317E+07	3.120E+10	3757.35	8.304E+06	5.90E-07	100%
SiO ₂ 膜	(溶融石英に同じ)								
SiOを主成分とする膜	2000-2200	7.2-7.9E+10	5500-6000	1.26-1.32E+7	2.6-3.2E+10	3490-3760	7.7-8.4E+07		> 30%
石英ガラス	2200	7.860E+10	5977.23	1.315E+07	3.130E+10	3771.91	8.298E+06	4.70E-07	98%
水晶	2650	1.07E+11	6360.25	1.685E+07	5.79E+10	4675.91	1.239E+07	1.04E-05	100%
多結晶Si	2331	1.865E+11	8944.75	2.085E+07	6.650E+10	5341.21	1.245E+07		0
TiO ₂	4249	4.790E+11	10617.55	4.511E+07	1.232E+11	5384.71	2.288E+07	6.90E-06	0
単結晶Si	2331	1.657E+11	8431.21	1.965E+07	7.960E+10	5843.67	1.362E+07	3.35E-06	0
Si ₃ N ₄	3200	3.710E+11	10767.43	3.446E+07	1.130E+11	5942.43	1.902E+07		0
AlN	3260	3.950E+11	11007.53	3.588E+07	1.180E+11	6016.34	1.961E+07		0
サファイア	3986	4.980E+11	11177.53	4.455E+07	1.470E+11	6072.81	2.421E+07	7.10E-06	0
Al ₂ O ₃ (アルミナ)	3800	4.170E+11	10475.54	3.981E+07	1.460E+11	6198.47	2.355E+07		0
SiC	3200	4.580E+11	11963.49	3.828E+07	1.85E+11	7603.45	2.433E+07		0

[0084] 図29に、基板11として、パイレクスガラス、ほう珪酸ガラス、合成石英、熔融石英、石英ガラスの基板を用い、それぞれ(0° 、 110° 、 0°)LT薄膜12(厚み0.15波長)／各種基板の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、インピーダンス比のLTの膜厚依存性を示す。図29に示すように、 SiO_2 の含有率が高い熔融石英、合成石英、石英ガラスの基板では、LTの膜厚が0.52波長以下で、 SiO_2 の含有率が70～80質量%程度のパイレクスガラス、ほう珪酸ガラスの基板では、LTの膜厚が0.34波長以下で、70dB以上の良好なインピーダンス比が得られている。なお、LT薄膜の代わりにLN薄膜を用いた場合でも、同様な特性が得られることも確認している。

[0085] 図30に、(0° 、 110° 、 0°)LT薄膜12／ SiO_2 膜／高音速基板、および、(0° 、 131° 、 0°)LN薄膜12／ SiO_2 膜／高音速基板の上に、厚みが0.08波長のAlのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、LSAWのインピーダンス比の SiO_2 膜の膜厚依存性を示す。表7に示すサファイアやアルミナ(Al_2O_3)、SiCなどの、横波音速が5,900m/s以上の高音速基板上にLT薄膜やLN薄膜を形成しただけでは、図6(b)のcサファイア基板の例のように、70dB以下のインピーダンス比しか得えられない。しかし、図30に示すように、高音速基板と薄膜との境界に、0.15波長の SiO_2 膜を形成することにより、LT薄膜で73dB、LN薄膜で78dBの大きなインピーダンス比が得られる。また、 SiO_2 膜の膜厚が0.3波長以上では、LT薄膜で75dB、LN薄膜で79dBの大きなインピーダンス比が得られる。厚い SiO_2 膜が形成された基板は反ってしまうため、 SiO_2 膜をあまり厚くすることは好ましくない。このため、 SiO_2 膜の膜厚は、1波長以下、できれば0.5波長以下が望ましい。

[0086] [すだれ状電極についての検討]

すだれ状電極13の最適な厚みやメタライゼーション比について検討を行った。図31(a)および(b)に、(0° 、 110° 、 0°)LT薄膜1

2（厚み0.15波長）／（0°、132.75°、90°）水晶基板11の上に、様々な材質のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、すだれ状電極13の厚み依存性を示す。すだれ状電極13として、Al、Cu、MoおよびPtから成るものを用いた。また、すだれ状電極13のメタライゼーション比は、0.5とした。

[0087] 図31（a）に示すように、すだれ状電極13がいずれの材質であっても、電極厚みが0.005～0.2波長で、4%以上の帯域が得られている。また、図31（b）に示すように、すだれ状電極13が密度2,699 kg/m³のAlから成る場合、電極厚みが0.005～0.32波長で70 dB以上、0.005～0.28波長で73 dB以上、0.005～0.25波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。また、すだれ状電極13が密度8,930 kg/m³のCuから成る場合、電極厚みが0.005～0.20波長で70 dB以上、0.005～0.19波長で73 dB以上、0.005～0.18波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0088] また、すだれ状電極13が密度10,219 kg/m³のMoから成る場合、電極厚みが0.005～0.28波長で70 dB以上の、0.005～0.27波長で73 dB以上、0.005～0.20波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。また、すだれ状電極13が密度21,400 kg/m³のPtから成る場合、電極厚みが0.005～0.20波長で70 dB以上、0.005～0.13波長で73 dB以上、0.005～0.11波長で75 dB以上のインピーダンス比が得られている。

[0089] このように、電極の種類により、最適な厚みが異なり、低密度の電極ほど、大きなインピーダンス比のとれる最適厚みの範囲が広い。このことから、最適厚みの範囲は電極の密度に依存するといえる。最適厚みの範囲と電極の密度との関係を、表8に示す。表8中の「A」は70 dB以上のインピーダンス比が得られる条件、「B」は73 dB以上のインピーダンス比が得られ

る条件、「A」は75 dB以上のインピーダンス比が得られる条件を示している。合金や多層電極膜を用いる場合には、電極厚みと理論的な電極密度から平均密度を求め、その平均密度に基づいて、表8から最適な電極厚みを求めればよい。なお、表8の関係は、圧電薄膜12がLNから成る場合でも適用できることを確認している。

[0090] [表8]

密度範囲(kg/m ³)	電極の厚み[波長; λ]		
	A	B	C
2000～5000	0.005～0.32	0.005～0.28	0.005～0.25
5001～9500	0.005～0.20	0.005～0.19	0.005～0.18
9501～15000	0.005～0.28	0.005～0.27	0.005～0.20
15001～220000	0.005～0.20	0.005～0.13	0.005～0.11

[0091] 図32(a)および(b)に、(0°、110°、0°)LT薄膜12(厚み0.15波長)／(0°、132.75°、90°)水晶基板11の上に、各材質のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、電極のメタライゼーション比依存性を示す。各すだれ状電極13は、それぞれ図31(b)から求めた最適膜厚とした。すなわち、すだれ状電極13がAlのとき、電極厚みは0.08波長、Cuのとき0.045波長、Moのとき0.05波長、Ptのとき0.03波長とした。

[0092] 図32(a)に示すように、すだれ状電極13がいずれの材質であっても、メタライゼーション比が0.5より小さいところで、最も広い帯域が得られている。また、図32(b)に示すように、電極の種類により、インピーダンス比が高くなるメタライゼーション比、すなわち最適なメタライゼーション比が異なっている。表9に、最適メタライゼーション比と電極の密度との関係を示す。表9中の「A」は高いインピーダンス比(概ね75.5 dB以上)が得られる条件、「B」はより高いインピーダンス比(概ね76.5 dB以上)が得られる条件、「C」は最も高いインピーダンス比(概ね77.5 dB以上)が得られる条件を示している。合金や多層電極膜を用いる場

合には、電極厚みと理論的な電極密度から平均密度を求め、その平均密度に基づいて、表 9 から最適なメタライゼーション比を求めればよい。なお、表 9 の関係は、圧電薄膜 12 が L N から成る場合でも適用できることを確認している。

[0093] [表9]

密度範囲(kg/m ³)	電極のメタライゼーション比		
	A	B	C
2000～5000	0.15～0.63	0.27～0.58	0.32～0.48
5001～9500	0.15～0.63	0.24～0.53	0.3～0.48
9501～15000	0.15～0.71	0.20～0.6	0.32～0.48
15001～220000	0.15～0.65	0.21～0.54	0.27～0.48

[0094] [水晶基板、圧電薄膜、すだれ状電極および短絡電極の配置の変形例]

図 1 (b) には、弾性波デバイス 10 として、IDT (すだれ状電極) 13 / 圧電薄膜 12 / 水晶基板 11 の構造を示しているが、短絡電極 31 を含めて、図 33 (a) ～ (d) に示すような構造も考えられる。なお、図 33 では、圧電薄膜 12 が LiTaO₃ 結晶 (LT) から成り、基板 11 が水晶基板から成る例を示している。図 33 (a) は、IDT 13 / 圧電薄膜 12 (LT) / 基板 11 から成る構造であり、図 1 (b) と同じ構造である。図 33 (b) は、IDT 13 / 圧電薄膜 12 (LT) / 短絡電極 31 / 基板 11 である。図 33 (c) は、圧電薄膜 12 (LT) / IDT 13 / 基板 11 であり、IDT 13 が基板 11 の側に埋め込まれているもの (上図) と、圧電薄膜 12 の側に埋め込まれているもの (下図) がある。図 33 (d) は、短絡電極 31 / 圧電薄膜 12 (LT) / IDT 13 / 基板 11 であり、IDT 13 が基板 11 の側に埋め込まれているもの (上図) と、圧電薄膜 12 の側に埋め込まれているもの (下図) がある。

[0095] 図 34 (a) および (b) に、図 33 (a) ～ (d) の 4 通りの構造の弾性波デバイス 10 について、それぞれ得られた弾性波共振子の帯域およびインピーダンス比の、LT の膜厚依存性を示す。ここで、圧電薄膜 12 は、(0°、110°、0°) LT 薄膜であり、水晶基板 11 は、(0°、132

、 75° 、 90° ）水晶基板であり、IDT13は、厚みが0.08波長のA1電極である。なお、短絡電極31は、薄い電極面が水晶基板11や圧電薄膜12の表面全体を覆うよう設けられたもので、その電極面が全て電氣的に短絡されている。また、短絡電極31は、IDT13には接続されていない浮き電極である。

[0096] 図34(a)に示すように、LTの膜厚がいずれの膜厚であっても、図33(a)に示すIDT/LT/水晶の構造で、もっとも広い帯域が得られている。また、図34(b)に示すように、図33(a)に示すIDT/LT/水晶、および図33(b)に示すIDT/LT/短絡電極/水晶の構造で、大きなインピーダンス比が得られている。なお、必要とされる帯域は用途によって異なるが、インピーダンス比は、機械的Qに大きく影響を与えるため、大きいほど良い。このため、図33(b)に示す構造であっても、図33(a)に示す構造と同じ条件で、同様の効果が得られると考えられる。

[0097] また、図35に示すように、弾性波デバイス10は、IDT13の全体が圧電薄膜12に埋め込まれていてもよく、下部が圧電薄膜12に埋め込まれ、上部が圧電薄膜12から突出するよう設けられていてもよい。図35には、それら2つの構造および図33(a)の構造の弾性波デバイス10について、それぞれ得られたインピーダンス比の圧電薄膜12の膜厚依存性を示す。ここで、圧電薄膜12は、(0° 、 110° 、 0°)LT薄膜であり、水晶基板11は、(0° 、 132° 、 75° 、 90°)水晶基板であり、IDT13は、厚みが0.08波長のA1電極である。図35に示すように、LTの膜厚が0.5波長以下ではいずれの構造とも、よく似たインピーダンス比が得られている。また、図35に示すように、圧電薄膜12にIDT13を埋め込んだ構造では、埋め込んでいない構造に比べ、音速が速く、高周波化に有利であると考えられる。

[0098] [接合膜を有する変形例]

図1(c)に示すように、弾性波デバイス10は、水晶基板11と圧電薄膜12との間に、絶縁性の接合膜32を有していてもよい。接合膜32は、

吸音性が小さく、硬い材質のものから成ることが好ましく、例えば、五酸化タンタル (Ta_2O_5)、酸化亜鉛 (ZnO)、二酸化シリコン (SiO_2)、多結晶 Si 、窒化シリコン (Si_xN_y : x, y は整数) などから成っている。

[0099] 図36 (a) ~ (c) に、(0° 、 110° 、 0°) LT 薄膜12 (厚み 0.15 波長) / 接合膜32 / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板11の上に、厚みが 0.08 波長の Al のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、それぞれ得られた弾性波共振子の音速、帯域およびインピーダンス比の、接合膜32の膜厚依存性を示す。接合膜32としては、五酸化タンタル (Ta_2O_5)、酸化亜鉛 (ZnO)、二酸化シリコン (SiO_2)、多結晶 Si 、および窒化シリコン (Si_xN_y : x, y は整数) を用いた。用いた接合膜32の材料定数を、表7に示す。なお、表7には、検討には用いていないが、接合膜32として使用可能な材料の材料定数も示している。

[0100] 図36 (a) ~ (c) に示すように、接合膜32が、バルク横波音速 [$(C_{44}^E/\text{密度})^{1/2}$] が水晶の音速より大幅に遅い Ta_2O_5 や ZnO から成る場合には、接合膜32の膜厚が増えるに従って、SAWの音速が急激に小さくなり、帯域も急激に狭くなり、インピーダンス比も急激に小さくなる。また、接合膜32が、横波音速が速い Si_xN_y から成る場合には、接合膜32の膜厚が増えるに従って、SAWの音速が大きくなり、帯域がわずかに狭くなり、インピーダンスがわずかに小さくなる。また、接合膜32が、横波音速が水晶の音速に近い多結晶 Si や SiO_2 から成る場合には、接合膜32の膜厚が増えるに従って、SAWの音速がわずかに変化し、帯域もわずかに狭くなるが、インピーダンス比は、接合膜32の厚み3波長まで、大きな変動は認められない。特に SiO_2 膜の場合には、プラスのTCFを有するため、TCF改善に有効であり、 SiO_2 膜が 0.1 波長以上ではTCFがプラス $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以上、 0.2 波長以上ではプラス $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以上改善される。また、水晶の方位角 θ が $\pm 10^\circ$ 程度ずれても、同じTCFが得られる。

しかも、図36(c)に示すように、 SiO_2 膜が1.2波長以下では、インピーダンス比の劣化がない。また、図36(b)に示すように、 SiO_2 膜が0.3波長以下では、帯域に減少はなく、0.5波長でも94%の帯域を確保できる。また、前述の SiO を主成分とする SiO_xZ_y 膜でも、 SiO_2 と同じ特性が得られる。

[0101] 表7および図36から、接合膜32とその最適厚みとの関係は、バルク横波音速に依存していることがわかる。接合膜32を用いたときの弾性波デバイス10の特性は、図36(c)に示すように、接合膜32の厚みが0.34波長以下では、バルク横波音速にはほとんど関係なく、大きなインピーダンス比が得られる。しかし、それ以上の厚みになると、接合膜32の最適厚みは、接合膜32のバルク横波音速に大きく依存している。また、接合膜32の厚みが0.13波長以下で、より大きなインピーダンス比が得られ、接合膜32の厚みが0.04波長以下で、さらに大きなインピーダンス比が得られる。

[0102] 表10に、接合膜32の横波音速と、接合膜32の最適な膜厚との関係を示す。表10中の「A」は高いインピーダンス比（概ね70dB以上）が得られる条件、「B」はより高いインピーダンス比（概ね73dB以上）が得られる条件、「C」は最も高いインピーダンス比（概ね75dB以上）が得られる条件を示している。なお、表10の関係は、圧電薄膜12がLNから成る場合でも適用できることを確認している。

[0103] [表10]

接合膜の横波音速 $V_s(\text{m/s})$	接合膜の膜厚 T [波長]		
	A	B	C
$1500 \leq V_{s1} \leq 2200$	$0 < T \leq 0.5$	$0 < T \leq 0.22$	$0 < T \leq 0.12$
$2200 < V_{s2} \leq 3400$	$0 < T \leq 0.67$	$0 < T \leq 0.54$	$0 < T \leq 0.23$
$3400 < V_{s3} \leq 5900$	$0 < T \leq 3$	$0 < T \leq 3$	$0 < T \leq 3$
$5900 < V_{s4} \leq 13000$	$0 < T \leq 0.6$	$0 < T \leq 0.22$	$0 < T \leq 0.12$

[0104] [接合膜が複数の場合の変形例]

接合層32が2層の場合について検討を行った。(0°、110°、0°

) LT 薄膜 12 (厚み 0.15 波長) / 接合膜 32 の 1 層目 / 接合膜 32 の 2 層目 / (0° 、 132.75° 、 90°) 水晶基板 11 の上に、厚みが 0.08 波長の Al のすだれ状電極 13 を形成した弾性波デバイス 10 について、共振子のインピーダンス比の、接合膜 32 の 1 層目および 2 層目の膜厚依存性を求めた。このとき、表 10 に示す横波音速が異なる 4 種の材料を、それぞれ V_{s1} 、 V_{s2} 、 V_{s3} 、 V_{s4} とし、これらのうちの 2 つを接合膜 32 の 1 層目および 2 層目として様々な組み合わせたものについて求めた。また、 V_{s1} を Ta_2O_5 、 V_{s2} を ZnO 、 V_{s3} を SiO_2 、 V_{s4} を Si_xN_y として検討した。

[0105] 検討結果のうち、接合膜 32 の 1 層目および 2 層目をそれぞれ、 V_{s3} 膜および V_{s4} 膜、 V_{s4} 膜および V_{s3} 膜、 V_{s2} 膜および V_{s3} 膜、 V_{s1} 膜および V_{s3} 膜としたときの、 V_{s3} (SiO_2) 膜の膜厚依存性の結果を、図 37 (a) ~ (d) に示す。各図中の数値は、接合膜 32 の膜の内、 V_{s3} とは異なる方の膜の厚さ (波長) を示している。また、表 11 に、これらの検討結果から得られた、接合膜 32 の 1 層目および 2 層目の組合せと最適な合計膜厚との関係を示す。表 11 中の「A」は高いインピーダンス比 (概ね 70 dB 以上) が得られる条件、「B」はより高いインピーダンス比 (概ね 73 dB 以上) が得られる条件、「C」は最も高いインピーダンス比 (概ね 75 dB 以上) が得られる条件を示している。良好なインピーダンス比を示す条件は、接合膜 32 の 1 層目は表 10 の条件を、1 層目および 2 層目の合計膜厚は、表 11 の条件を満たせばよい。なお、図 37 (a) ~ (d) に示すように、2 層目が SiO_2 膜の場合、1 層目の層の種類や厚みを選ぶことにより、 SiO_2 膜が 1.5 波長以下で、75 dB 以上のインピーダンス比を得ることができる。

[0106]

[表11]

2層の場合

1層目と2層目の 組み合わせ	1層目と2層目の合計膜厚 T (波長)		
	A	B	C
Vs1 Vs2	$0 < T \leq 1.17$	$0 < T \leq 0.76$	$0 < T \leq 0.35$
Vs1 Vs3	$0 < T \leq 3.5$	$0 < T \leq 3.22$	$0 < T \leq 3.12$
Vs1 Vs4	$0 < T \leq 1.1$	$0 < T \leq 0.44$	$0 < T \leq 0.24$
Vs2 Vs3	$0 < T \leq 3.67$	$0 < T \leq 3.54$	$0 < T \leq 3.23$
Vs2 Vs4	$0 < T \leq 1.27$	$0 < T \leq 0.76$	$0 < T \leq 0.35$
Vs3 Vs4	$0 < T \leq 3.6$	$0 < T \leq 3.22$	$0 < T \leq 3.12$

- [0107] 次に、接合層 3 2 が 3 層の場合について検討を行った。(0°、110°、0°) LT 薄膜 1 2 (厚み 0.15 波長) / 接合膜 3 2 の 1 層目 / 接合膜 3 2 の 2 層目 / 接合膜 3 2 の 3 層目 / (0°、132.75°、90°) 水晶基板 1 1 の上に、厚みが 0.08 波長の Al のすだれ状電極 1 3 を形成した弾性波デバイス 1 0 について、共振子のインピーダンス比の、接合膜 3 2 の 3 層目の膜厚依存性を求めた。このとき、表 1 0 に示す横波音速が異なる 4 種の材料を、それぞれ Vs1、Vs2、Vs3、Vs4 とし、これらのうちの 3 つを接合膜 3 2 の 1 層目、2 層目および 3 層目として様々な組み合わせたものについて求めた。また、Vs1 を Ta₂O₅、Vs2 を ZnO、Vs3 を SiO₂、Vs4 を Si_xN_y として検討した。
- [0108] 検討結果のうち、接合膜 3 2 の 1 層目を Vs3 (厚み 0.1 波長)、2 層目を Vs4 (厚み 0.1 波長) とし、3 層目を Vs1、Vs2、Vs3、または Vs4 としたときの結果を、図 3 8 (a) に示す。図 3 8 (a) に示すように、3 層目が Vs1 (Ta₂O₅) 膜や Vs2 (ZnO) 膜のとき、膜厚 1 波長以下で 70 dB 以上のインピーダンス比が得られ、3 層目が Vs3 (SiO₂) 膜や Vs4 (Si_xN_y) 膜のとき、膜厚 5 波長以下で 75 dB 程度のインピーダンス比が得られている。
- [0109] また、検討結果のうち、接合膜 3 2 の 1 層目を Vs4 (厚み 0.01 波長)、2 層目を Vs3 (厚み 0.1 波長) とし、3 層目を Vs1、Vs2、Vs3、または Vs4 としたときの結果を、図 3 8 (b) に示す。図 3 8 (b)

）に示すように、3層目がV s 1 (T a₂O₅) 膜やV s 2 (Z n O) 膜のとき、膜厚1波長以下で70 dB以上のインピーダンス比が得られ、3層目がV s 3 (S i O₂) 膜やV s 4 (S i_xN_y) 膜のとき、膜厚5波長以下で73 dB程度のインピーダンス比が得られている。

[0110] また、表12に、これらの検討結果から得られた、接合膜32の1層目～3層目の組合せと最適な合計膜厚との関係を示す。表12中の「A」は高いインピーダンス比（概ね70 dB以上）が得られる条件、「B」はより高いインピーダンス比（概ね73 dB以上）が得られる条件を示している。良好なインピーダンス比を示す条件は、接合膜32の1層目は表10の条件を、1層目～3層目の合計膜厚は、表12の条件を満たせばよい。なお、接合膜32が4層以上の場合でも、1層目は表10を満たす必要がある。

なお、音速などを求める材料の定数は、公に公表されている定数を用いている。また、薄膜が2つ以上の膜の混合膜の場合は、それぞれの膜の相加平均とすればよい。

なお、図38（a）および（b）に示すように、1層目または2層目がS i O₂膜の場合、S i O₂膜以外の層の種類や厚みを選ぶことにより、S i O₂膜が1.5波長以下で、75 dB以上のインピーダンス比を得ることができる。

[0111]

[表12]

3層の場合

1層目、2層目、3層目の組み合わせ			1層目、2層目、3層目の合計膜厚 T (波長)	
			A	B
Vs1	Vs2	Vs1	$0 < T \leq 1.67$	$0 < T \leq 0.98$
Vs1	Vs2	Vs3	$0 < T \leq 4.17$	$0 < T \leq 3.76$
Vs1	Vs2	Vs4	$0 < T \leq 1.77$	$0 < T \leq 0.98$
Vs1	Vs3	Vs1	$0 < T \leq 4.00$	$0 < T \leq 3.44$
Vs1	Vs3	Vs4	$0 < T \leq 4.17$	$0 < T \leq 3.44$
Vs1	Vs4	Vs1	$0 < T \leq 1.6$	$0 < T \leq 0.66$
Vs2	Vs1	Vs2	$0 < T \leq 1.84$	$0 < T \leq 1.3$
Vs2	Vs3	Vs2	$0 < T \leq 4.34$	$0 < T \leq 4.08$
Vs2	Vs3	Vs4	$0 < T \leq 4.27$	$0 < T \leq 3.76$
Vs3	Vs1	Vs3	$0 < T \leq 6.5$	$0 < T \leq 6.22$
Vs3	Vs2	Vs3	$0 < T \leq 6.67$	$0 < T \leq 6.54$
Vs3	Vs4	Vs3	$0 < T \leq 6.6$	$0 < T \leq 6.22$
Vs4	Vs1	Vs4	$0 < T \leq 1.70$	$0 < T \leq 0.66$
Vs4	Vs2	Vs4	$0 < T \leq 1.87$	$0 < T \leq 0.98$
Vs4	Vs3	Vs4	$0 < T \leq 4.20$	$0 < T \leq 3.44$

[0112] [弾性表面波の高次モードを利用する場合についての検討]

弾性波デバイス10で、弾性表面波の高次モードを利用する場合について検討を行った。図39に、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.6波長のA1のすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、インピーダンス(Z)の周波数特性を示す。図39に示すように、1.25GHzに基本モード(0-th)が、3.6GHzにその高次モード(1-th)が確認された。

[0113] 図40に、各種の材料から成るすだれ状電極13について、高次モードにおける弾性波デバイス10のインピーダンス比と電極厚との関係を示す。ここでは、弾性波デバイス10として、 $(0^\circ, 110^\circ, 0^\circ)$ LT薄膜12 (厚み0.15波長) / $(0^\circ, 132.75^\circ, 90^\circ)$ 水晶基板11の上に、厚みが0.6波長の各種のすだれ状電極13を形成したものをを用いている。図40に示すように、電極の種類により、最適な厚みが異なり、低

密度の電極ほど、大きなインピーダンス比のとれる最適厚みの範囲が広く、最適厚みが高くなることがわかる。最適厚みの範囲と電極の密度との関係を、表 13 に示す。表 13 は、すだれ状電極 13 のメタライゼーション比が 0.5 のときのものである。

[0114] [表13]

密度範囲(kg/m ³)	該当する電極例	適した電極厚 [波長]
2000～5000	Al、Ti	0.17～0.8
5001～9500	Cu、Ni	0.08～0.44
9501～15000	Mo、Ag	0.08～0.43
15000～22000	Au、Pt	0.06～0.4

[0115] すだれ状電極 13 として合金や多層電極膜を用いる場合には、電極厚みと理論的な電極密度から平均密度を求め、その平均密度に基づいて、表 13 から最適な電極厚みを求めればよい。また、表 13 はメタライゼーション比が 0.5 のものであるため、メタライゼーション比を考慮して、例えばメタライゼーション比が 0.25 の場合には、電極の厚みは、 $0.5 / 0.25 = 2$ になるため、表 13 の 2 倍の厚みを考慮すればよい。

[0116] 弾性表面波の高次モードを利用する場合の、圧電薄膜 12 の厚みについて検討を行った。図 41 に、図 33 (a) に示す IDT 13 / 圧電薄膜 12 / 水晶基板 11 の構造、および、図 33 (b) に示す IDT 13 / 圧電薄膜 12 / 短絡電極 31 / 水晶基板 11 の構造の弾性波デバイス 10 について、それぞれ得られたインピーダンス比の圧電薄膜 12 の膜厚依存性を示す。ここで、圧電薄膜 12 は、(0°、110°、0°) LT 薄膜であり、水晶基板 11 は、(0°、132.75°、90°) 水晶基板であり、IDT 13 は、厚みが 0.2 波長の Au 電極である。図 41 に示すように、短絡電極 31 を有しない図 33 (a) の構造では、LT の膜厚が 0.35～9.3 波長るとき、短絡電極 31 を有する図 33 (b) の構造では、LT の膜厚が 0.5

～9波長のとき、70 dB以上のインピーダンス比が得られている。なお、LT薄膜の代わりにLN薄膜を用いた場合でも、同様な特性が得られることも確認している。

[0117] 図42(a)および(b)に、それぞれ(0° 、 110° 、 0°) LT薄膜12 / (0° 、 θ 、 0°) 水晶基板11、および(0° 、 110° 、 0°) LT薄膜12 / (0° 、 θ 、 90°) 水晶基板11の上に、Auのすだれ状電極13を形成した弾性波デバイス10について、得られた弾性波共振子の高次モード(1-th)のインピーダンス比の、水晶基板11の θ 依存性を示す。ここで、LTの厚みを、0.5波長(λ)、1波長、2波長、4波長の4種類とした。また、すだれ状電極13の厚みを、0.2波長とした。

[0118] 図42(a)および(b)に示すように、LTの膜厚が0.5～4波長のとき、ほぼ全ての θ の範囲で、概ね70 dB以上のインピーダンス比が得られている。これは、基本モードのときと同様に、LTの膜厚が厚くても、すだれ状電極13のAuの厚みも0.2波長と比較的厚いためであると考えられる。

[0119] [本発明の実施の形態の弾性波デバイスの製造方法]

図43に示すように、弾性波デバイス10は、以下のようにして製造される。まず、LTまたはLNから成る圧電基板12aを準備し(図43(a)参照)、水晶基板11の上に、その圧電基板12aを接合する(図43(b)の左図参照)。また、圧電基板12aと水晶基板11との間に、短絡電極31や接合膜32を形成する場合には、水晶基板11の上に短絡電極31や接合膜32を接合した後、その上に圧電基板12aを接合する(図43(b)の右図参照)。各基板や膜は、接着剤を用いて接合してもよいが、接合面をプラズマなどで活性化処理して接合する、いわゆる直接接合で接合してもよい。

[0120] 接合後、圧電基板12aを研磨して薄膜状(圧電薄膜12)にする(図43(c)参照)。その圧電薄膜12の表面に、Alなどから成る電極膜を形成し、その上にレジストを塗布した後、パターニング(露光、現像)してエ

ッチングを行い、レジストを除去することにより、すだれ状電極 13 および反射器 14 を形成する（図 43（d）参照）。その後、不要な部分を分離することにより、弾性波デバイス 10 を製造することができる（図 43（e）参照）。なお、図 43（c）～（e）には、図 43（b）の左図の場合を示しているが、図 43（b）の右図の場合には、水晶基板 11 と圧電薄膜 12 との間に、短絡電極 31 や接合膜 32 を有する弾性波デバイス 10 を製造することができる。

符号の説明

- [0121] 10 弾性波デバイス
- 11 基板（水晶基板）
- 12 圧電薄膜（LT 薄膜、LN 薄膜）
- 12a 圧電基板
- 13 すだれ状電極（IDT）
- 21 電極指
- 14 反射器
- 31 短絡電極
- 32 接合膜
- 50 従来の弾性波デバイス
- 51 圧電基板
- 52 すだれ状電極（IDT）
- 53 反射器