

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2012-60418

(P2012-60418A)

(43) 公開日 平成24年3月22日(2012.3.22)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>H03H 9/145 (2006.01)</b>	H03H 9/145 Z	5J097
<b>H03H 9/25 (2006.01)</b>	H03H 9/25 C	

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2010-201749 (P2010-201749)	(71) 出願人	000002369
(22) 出願日	平成22年9月9日 (2010.9.9)		セイコーエプソン株式会社
			東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
		(74) 代理人	100098062
			弁理士 梅田 明彦
		(74) 代理人	100095728
			弁理士 上柳 雅誉
		(74) 代理人	100107261
			弁理士 須澤 修
		(74) 代理人	100127661
			弁理士 宮坂 一彦
		(72) 発明者	山中 國人
			東京都日野市日野421-8 エプソント
			ヨコム株式会社内
		Fターム(参考)	5J097 AA13 AA21 AA24 BB02 DD04
			DD28 GG02 KK07 KK09

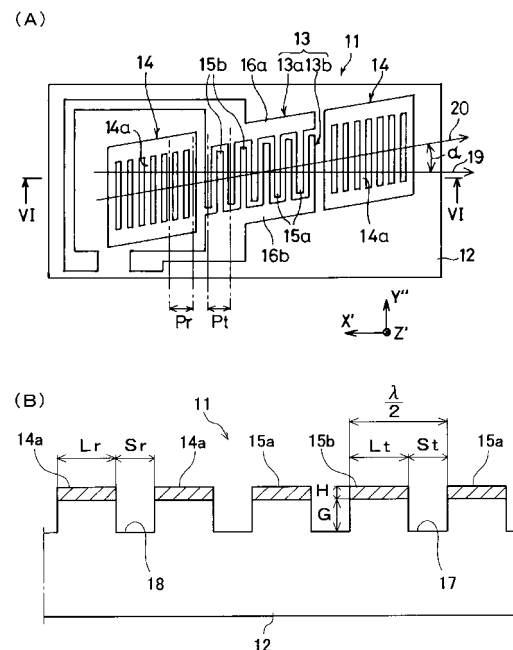
(54) 【発明の名称】 弾性表面波デバイス、電子機器及びセンサー装置

## (57) 【要約】

【課題】動作温度範囲で優れた周波数温度特性と高いQ値とを同時に実現するSAWデバイスを提供する。

【解決手段】SAWデバイス11は、オイラー角( - 1.5°、1.5°、117°、142°、42.79°、49.57° )の水晶基板12の主面に、ストップバンド上端モードのSAWを励振するIDT13、その両側に配置した一対の反射器14、IDTの電極指15a、15b間に凹設した電極指間溝17、及び反射器の導体ストリップ14a間に凹設した導体ストリップ間溝18を有する。電極指及び導体ストリップに直交する第1の方向(X'軸)と水晶基板の電機軸(X軸)とが角度αをもって交差し、IDT及び反射器の少なくとも一部が、1.0°、2.75°の角度αをもって第1の方向と交差する第2の方向に配置される。

【選択図】図6



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

オイラー角 (  $-1.5^\circ$  ,  $1.5^\circ$  ,  $117^\circ$  ,  $142^\circ$  ,  $42.79^\circ$  |  
|  $49.57^\circ$  ) の水晶基板と、

前記水晶基板の主面に設けられた複数の電極指からなり、ストップバンド上端モードの弾性表面波を励振する IDT と、

前記弾性表面波の伝播方向に沿って前記 IDT を挟むようにその両側に配置した、それぞれ複数の導体ストリップからなる一対の反射器と、

前記 IDT の隣り合う前記電極指間の前記水晶基板の表面に凹設した電極指間溝と、

前記反射器の隣り合う前記導体ストリップ間の前記水晶基板の表面に凹設した導体ストリップ間溝とを有し、

前記弾性表面波の波長 と前記電極指間溝の深さ  $G$  とが、  $0.01 \leq G/\lambda \leq 0.05$  の関係を満足し、

前記 IDT のライン占有率 と前記電極指間溝の深さ  $G$  とが、

## 【数 8】

$$-2.0000 \times G/\lambda + 0.7200 \leq \eta \leq -2.5000 \times G/\lambda + 0.7775 \quad \text{ただし } 0.0100\lambda \leq G \leq 0.0500\lambda$$

及び、

## 【数 9】

$$-3.5898 \times G/\lambda + 0.7995 \leq \eta \leq -2.5000 \times G/\lambda + 0.7775 \quad \text{ただし } 0.0500\lambda < G \leq 0.0695\lambda$$

の関係を満足し、

前記電極指及び前記導体ストリップに直交する第 1 の方向と前記水晶基板の電機軸とのなす角度が前記オイラー角 であり、

前記 IDT 及び反射器の少なくとも一部が、前記第 1 の方向と角度 をもって交差する第 2 の方向に配置され、かつ前記角度 が  $1.0^\circ$  ,  $2.75^\circ$  の範囲内にあることを特徴とする弾性表面波デバイス。

## 【請求項 2】

前記角度 と前記オイラー角 とが、  $\theta = 1.06^\circ + 43.69^\circ + 0.05^\circ$  の関係を満足することを特徴とする請求項 1 記載の弾性表面波デバイス。

## 【請求項 3】

前記 IDT のライン占有率 が、

## 【数 7】

$$\begin{aligned} \eta = & -1963.05 \times (G/\lambda)^3 + 196.28 \times (G/\lambda)^2 - 6.53 \times (G/\lambda) \\ & - 135.99 \times (H/\lambda)^2 + 5.817 \times (H/\lambda) + 0.732 \\ & - 99.99 \times (G/\lambda) \times (H/\lambda) \end{aligned}$$

ことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の弾性表面波デバイス。

## 【請求項 4】

前記電極指間溝の深さ  $G$  と前記電極指の膜厚  $H$  との和が、  $0.0407 \leq G + H/\lambda \leq 0.0695$  を満足することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか記載の弾性表面波デバイス。

## 【請求項 5】

前記 IDT を駆動するための IC を更に有することを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか記載の弾性表面波デバイス。

## 【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれか記載の弾性表面波デバイスを備えることを特徴とする電子機器。

## 【請求項 7】

請求項 1 乃至 5 のいずれか記載の弾性表面波デバイスを備えることを特徴とするセンサ

10

20

30

40

50

一装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、弾性表面波（surface acoustic wave: SAW）を利用した共振子、発振器等の弾性表面波デバイス、SAWデバイスを備えた電子機器及びセンサー装置に関する。

【背景技術】

【0002】

SAWデバイスは、例えば携帯電話、ハードディスク、パーソナルコンピューター、BS及びCS放送の受信チューナー、同軸ケーブルまたは光ケーブル中を伝播する高周波信号や光信号の処理機器、広い温度範囲で高周波・高精度クロック（低ジッタ、低位相雑音）を必要とするサーバー・ネットワーク機器、無線通信用機器等の電子機器や、圧力センサー、加速度センサー、回転速度センサー等の各種センサー装置に広く利用されている。これらの機器・装置は、特に最近の情報通信の高速化によるリファレンスクロックの高周波化や装置筐体の小型化に伴い、装置内部での発熱の影響が大きくなっている。そのため、装置内部に搭載される電子デバイスは、動作温度範囲の拡大や高精度化が要求され、例えば屋外に設置される無線基地局のように低温から高温まで温度変化の激しい環境下で長期に亘って安定した動作が必要となっている。

【0003】

一般にSAW共振子等のSAWデバイスにおいて、周波数温度特性の変化には、SAWのストップバンドや使用する水晶基板のカット角、基板上に形成されるIDT（interdigital transducer:すだれ状トランスデューサ）の形態等が大きい影響を及ぼす。例えば、SAWの1波長当たり3本の電極指で構成される単位区間を圧電基板上に繰り返し配列したIDTを有し、SAWのストップバンドの上端モード、下端モードのそれぞれを励起させる反射反転型SAW変換器が提案されている（例えば、特許文献1を参照）。この反射反転型SAW変換器によりSAWフィルタを構成すれば、通過帯域近傍の高域側阻止域において高減衰量が実現できるとされている。

【0004】

また、オイラー角（ $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ）=（ $0^\circ$ ,  $123^\circ$ ,  $0^\circ$ ）の所謂STカット水晶基板を用いた反射反転型SAW変換器が知られている（例えば、特許文献2を参照）。同特許文献には、ストップバンドの上端の共振を励振させることができ、ストップバンドの下端の共振を用いる場合よりも周波数温度特性が向上すると記載されている。更に、SAWにおけるストップバンドの上端モードの方が、ストップバンドの下端モードよりも周波数温度特性が良好であると報告されている（例えば、特許文献3～6を参照）。

【0005】

特に特許文献3、4には、レイリー波を利用したSAW装置において良好な周波数温度特性を得るために、水晶基板のカット角を調整すると共に、IDT電極の基準化膜厚（ $H/\lambda$ ）を0.1程度まで厚くすることが記載されている。特許文献3に記載のSAW共振子は、オイラー角（ $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ）=（ $\theta = 0^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $0^\circ < \phi < 90^\circ$ ）の水晶基板上に、SAWの1波長当たり2本の電極指で構成される単位区間を繰り返し配列したシングル型IDT電極を有する。これにより、レイリー波をストップバンドの上限モードで励振させ、それを利用してSAW共振子の高周波化と良好な周波数温度特性を実現することができる。

【0006】

特許文献4には、前記シングル型IDT電極を有するSAW装置において、水晶基板をオイラー角（ $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ）=（ $\theta = 0^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $|\phi| < 44^\circ$ ）に設定し、IDT電極の厚みH、IDT電極における電極指の幅d、IDT電極における電極指間のピッチP、及びSAWの波長 $\lambda$ により規定される基準化電極膜厚（ $H/\lambda$ ）と基準化電極幅（ $d/\lambda$ ）との関係を、

$$H/\lambda = 0.1796 \lambda^{-3} - 0.4303 \lambda^{-2} + 0.2071 \lambda^{-1} + 0.0682$$

10

20

30

40

50

に設定することが開示されている。これによって、レイリー波をストップバンドの上限モードで励振させ、良好な周波数温度特性を実現することができる。

#### 【0007】

特許文献5には、オイラー角 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 9^\circ < \theta < 46^\circ)$ 、好ましくは $(0^\circ, 95^\circ < \theta < 155^\circ, 33^\circ < \phi < 46^\circ)$ の水晶基板上にシングル型IDT電極を配置し、基準化電極膜厚 $(H/\lambda)$ を $0.045 \sim 0.085$ としたSAW素子が開示されている。これによって、レイリー波をストップバンドの上限モードで励振させ、良好な周波数温度特性を実現することができる。

#### 【0008】

特許文献6には、オイラー角 $(\theta, \phi) = (0.123^\circ, 43.2^\circ)$ の面内回転STカット水晶基板上に前記シングル型IDT電極を配置し、その基準化電極膜厚 $(H/\lambda)$ を $H/\lambda = 0.06$ 、所謂6%とすることによって、レイリー波をストップバンドの上限モードで励振させるSAW素子が開示されている。更にこのSAW素子は、IDT電極の電極指幅 $L_t$ と電極指ピッチ $P_t$ とにより規定される標準化電極幅 $(= L_t / P_t)$ を、 $0.5 \sim 0.7$ に設定することによって、常温 $(25^\circ\text{C})$ において最大830ppmの周波数偏差を実現することができる。

#### 【0009】

他方、IDTを構成する電極指間及び反射器を構成する導体ストリップ間の水晶基板表面にグループ即ち溝を形成したSAW共振器が知られている(例えば、特許文献7及び非特許文献1を参照)。特許文献7には、STカットX伝搬水晶基板にIDT及び反射器のアルミ電極で構成し、かつ水晶基板表面のIDTを構成する電極指間及び反射器を構成する導体ストリップ間に露出した領域に溝を形成することにより、Q値が高く容量比が低くなり、共振抵抗の低いSAW共振器を実現できることが開示されている。更に同特許文献には、IDTの溝と反射器の溝とを同じ深さにした構造、及び反射器の溝をIDTの溝より深くした構造が記載されている。

#### 【0010】

非特許文献1には、STカット水晶基板を用いたグループ型SAW共振器の特性が記載されている。その周波数温度特性は、SAW伝搬基板の電極で覆われていない水晶面に形成した溝の深さにより変化すること、及び、溝が深くなるに従って、上向き凸の2次曲線の頂点温度 $T_p$ が低くなっていくことが報告されている。

#### 【0011】

このように水晶等の圧電基板に溝を形成して実効膜厚を調整することによって周波数を調整する方法は、当業者によく知られている(例えば、特許文献8乃至11を参照)。特許文献8記載のSAWデバイスは、IDTを形成した圧電基板の表面を、該圧電基板のエッチングレートがIDTのエッチングレートより大きくなる条件でエッチングし、その周波数を下降させるように微調整する。特許文献9乃至11においても、同様に圧電基板の表面をその上に形成したIDTをマスクとしてドライエッチングすることにより、SAWデバイスの周波数を低域側へシフトさせている。

#### 【0012】

更に、トランスバーサル型SAWフィルタにおいて、IDT電極の電極指間の圧電基板表面をエッチング加工して溝を形成することにより見かけ上伝搬速度を小さくすることが知られている(例えば、特許文献12を参照)。これによって、SAWフィルタの基本設計を変更せずに、IDT電極の電極指ピッチを小さくでき、チップの小型化を実現することができる。

#### 【0013】

また、SSBW(Surface Skimming Bulk Wave)と呼ばれるすべり波を励振するSAW共振器において、回転Yカット、カットアングル $-43^\circ$ 乃至 $-52^\circ$ 、すべり波伝搬方向をZ'軸方向(オイラー角 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 38^\circ \sim 47^\circ, 90^\circ)$ )の水晶基板に、基準化電極膜厚 $(H/\lambda)$ が $2.0 \sim 4.0\%$ のIDT電極をアルミで形成することにより、三次曲線の周波数温度特性を実現し得ることが知られている(例

10

20

30

40

50

えば、特許文献 13 を参照)。すべり波 (SH 波) はその振動エネルギーを電極直下に閉じ込めて圧電基板の表面直下を伝搬するので、SAW が基板表面に沿って伝搬する ST カット水晶 SAW デバイスと比較して、反射器による SAW の反射効率が悪く、小型化及び高い Q 値を実現し難いという問題がある。

#### 【0014】

この問題を解決するために、オイラー角  $(\theta, \phi, \psi) = (0^\circ, -64^\circ < \psi < -49.3^\circ, 85^\circ \sim 95^\circ)$  の回転 Y カット水晶基板の表面に IDT とグレーティング反射器とを形成し、SH 波を励振する SAW デバイスが提案されている (例えば、特許文献 14 を参照)。この SAW デバイスは、SAW の波長  $\lambda$  で基準化される電極膜厚  $H/\lambda$  を  $0.04 < H/\lambda < 0.12$  に設定することによって、小型化、高い Q 値及び優れた周波数安定性を実現している。

10

#### 【0015】

更に、かかる SAW デバイスにおいて、電極膜厚が厚いことに起因して発生するストレスマイグレーションが原因となって Q 値や周波数安定性が劣化するという問題を解決するために、IDT の電極指間の水晶基板に溝を形成することが提案されている (例えば、特許文献 15 を参照)。この溝の深さを  $H_p$ 、IDT の金属膜の膜厚を  $H_m$  としたとき、SAW の波長  $\lambda$  で基準化した電極膜厚  $H/\lambda$  を  $0.04 < H/\lambda < 0.12$  (ただし、 $H = H_p + H_m$ ) の範囲と設定することにより、金属膜の見掛け上の膜厚を薄くできるので、通電時のストレスマイグレーションによる周波数変動を抑圧し、Q 値が高く、周波数安定性の優れた SAW デバイスを実現できる。

20

#### 【0016】

SAW デバイスの量産過程では、水晶基板の表面にエッチングで IDT の電極指を形成する際に、電極指の膜厚が厚いと、それに起因したサイドエッチングにより IDT のライン占有率 (ラインスペース比)  $\lambda/L$  にばらつきを生じ易い。その結果、SAW デバイスの温度変化による周波数の変動量にばらつきが生じると、製品の信頼性、品質が損なわれる。この問題を解消するために、オイラー角  $(\theta, \phi, \psi) = (0^\circ, 95^\circ \sim 155^\circ, 33^\circ \sim 46^\circ)$  の面内回転 ST カット水晶基板を採用し、SAW のストップバンドの上限モードを励振させ、IDT の電極指間の水晶基板表面に電極指間溝を形成した SAW デバイスが知られている (例えば、特許文献 16 を参照)。

30

#### 【0017】

また、SAW デバイスの周波数温度特性が動作温度範囲において二次曲線の場合、周波数変動幅の極小化や変曲点を実現することは困難である。そこで、三次曲線の周波数温度特性を得るために、LST カットの水晶基板に空隙層と誘電体膜とを介して IDT 電極を形成し、漏洩型 SAW を励振させるようにした SAW 装置が提案されている (例えば、特許文献 17 を参照)。同特許文献には、レイリー波を用いた SAW 装置において、三次曲線で示されるような周波数温度特性を実現するカット角の水晶基板は発見できなかったことが記載されている。

#### 【0018】

他方、ST カット水晶板を圧電基板に使用しかつ水晶の結晶軸の電気軸 (X 軸) 方向を SAW の伝搬方向とした高周波フィルター用の SAW 共振子は、周波数温度特性の 2 次温度係数が比較的大きく、動作温度範囲を広くすると周波数変化が大きくなる。そこで、周波数温度特性を劣化させることなく Q 値を高くするために、IDT と反射器とを SAW の位相速度の方向に対して傾斜させた方向に沿って配置した傾斜型 IDT 構造の SAW 共振子が提案されている (例えば、特許文献 18 を参照)。

40

#### 【0019】

この傾斜型 IDT 構造は、SAW の位相速度の方向と SAW エネルギーの伝搬方向とをカバーするように IDT と反射器とを配置することにより、SAW エネルギーの閉じ込め効果を高めている。更に特許文献 18 記載の SAW 共振子は、オイラー角表示で  $(0^\circ, 122^\circ \sim 127^\circ, 40^\circ \sim 44^\circ)$  の面内回転 ST カット水晶基板を使用することによって、周波数温度特性を大幅に改善している。

50

## 【 0 0 2 0 】

図 1 5 は、この傾斜型 I D T 構造の S A W 共振子の典型例を示している。同図の S A W 共振子 5 1 は、上述した面内回転 S T カット水晶基板からなる矩形の水晶基板 5 2 と、その主面にそれぞれ形成した I D T 5 3 と 1 対の反射器 5 4 , 5 4 とを有する。I D T 5 3 は、それぞれ複数の電極指 5 5 a、5 5 b からなりかつそれらの基端部をバスバーで接続した 1 対の櫛歯状電極 5 3 a , 5 3 b を有する。反射器 5 4 , 5 4 は、S A W の伝搬方向に沿って I D T 5 3 の両側に該 I D T を挟むように配置され、それぞれ一定のピッチで配列された複数の導体ストリップ 5 4 a , 5 4 a を有する。

## 【 0 0 2 1 】

電極指 5 5 a、5 5 b 及び導体ストリップ 5 4 a , 5 4 a は、その延長方向が S A W の位相の伝搬方向である水晶基板 5 2 の X' 軸 5 6 と直交する向きに形成されている。更に前記電極指及び導体ストリップは、X' 軸 5 6 から角度 傾斜させた方向 5 7 に沿って配置されている。この角度 は、S A W エネルギーの伝搬方向であるパワーフロー角 ( P F A ) と一致するように又は  $P F A \pm 1^\circ$  程度以内に設定される。これによって、I D T 5 3 から P F A の方向に沿って伝搬する S A W のエネルギーは、反射器 5 4 , 5 4 により反射されて効率良く閉じ込めることができ、高い Q 値が得られる。

## 【 0 0 2 2 】

特に、図 1 5 に示すように、導体ストリップ 5 4 a , 5 4 a の P F A に直交する方向の幅  $W_r$  を、電極指 5 5 a、5 5 b の P F A に直交する方向の幅  $W_t$  と同じにすることによって、前記反射器からの S A W エネルギーの漏れをより少なくすることができる。別の実施例では、前記導体ストリップの幅  $W_r$  を前記電極指の幅  $W_t$  より広げることによって、P F A の方向に沿って伝搬する S A W エネルギーのほとんどを前記反射器により反射し、閉じ込め効果を向上させることができる。

## 【 0 0 2 3 】

また、面内回転 S T カット水晶基板の P F A は、S A W の位相速度と水晶板の面内回転角とから算出されることが従来知られている。しかしながら、特許文献 1 8 記載の S A W 共振子は、発生した S A W の正確な位相速度が求められていないので、実際に I D T と反射器とを、S A W のエネルギーの伝搬方向である群速度の方向即ち波群 ( 波束 ) が伝搬する方向に沿って配置できるかが不明であった。そこで、本願出願人は、面内回転 S T カット水晶板の P F A が水晶の電気軸である X 軸周りの回転角 に依存していることを見出し、I D T と反射器とを S A W の群速度の方向に沿って確実に配置できるようにした傾斜型 I D T 構造の S A W 素子片を提案している ( 例えば、特許文献 1 9 を参照 ) 。

## 【 0 0 2 4 】

図 1 6 は、この S A W 素子片の典型例を示している。同図の S A W 素子片 6 1 は、オイラー角 (  $0^\circ$  ,  $113^\circ$  ,  $135^\circ$  ,  $40^\circ$  | |  $49^\circ$  ) の面内回転 S T カット水晶板からなる矩形の水晶基板 6 2 と、その主面にそれぞれ形成した I D T 6 3 と 1 対の反射器 6 4 , 6 4 とを有する。図 1 5 の S A W 共振子 5 1 と同様に、I D T 6 3 は、それぞれ複数の電極指 6 5 a、6 5 b からなり、かつそれらの基端部をバスバーで接続した 1 対の櫛歯状電極 6 3 a , 6 3 b を有する。反射器 6 4 , 6 4 は、S A W の伝搬方向に沿って I D T 6 3 の両側に該 I D T を挟むように配置され、それぞれ一定のピッチで配列された複数の導体ストリップ 6 4 a , 6 4 a を有する。

## 【 0 0 2 5 】

電極指 6 5 a、6 5 b 及び導体ストリップ 6 4 a , 6 4 a は、その延長方向が S A W の位相速度の方向 6 6 即ち X' 軸と直交する向きに形成されている。S A W の位相速度の方向 6 6 と S A W の群速度の方向 6 7 とがなすパワーフロー角 ( P F A ) は、オイラー角の 1 次関数であり、 $P F A = 0.374 ( \quad - 90^\circ ) - 10.0^\circ$  の関係式により求められる。前記電極指及び導体ストリップは、S A W の位相速度の方向 6 6 に対して  $P F A \pm 3^\circ$  傾斜させた方向に沿って配置される。このようにして I D T 6 3 及び反射器 6 4 , 6 4 を確実に S A W の群速度の方向に沿って配置することによって、S A W の波群を前記反射器で効率よく反射でき、Q 値を高めることができる。

10

20

30

40

50

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0026】

【特許文献1】特許第3266846号公報

【特許文献2】特開2002-100959号公報

【特許文献3】特開2006-148622号公報

【特許文献4】特開2007-208871号公報

【特許文献5】特開2007-267033号公報

【特許文献6】特開2007-300287号公報

【特許文献7】特公平2-7207号(特開昭57-5418号)公報

10

【特許文献8】特開平2-189011号公報

【特許文献9】特開平5-90865号公報

【特許文献10】特開平1-231412号公報

【特許文献11】特開昭61-92011号公報

【特許文献12】特開平10-270974号公報

【特許文献13】特公平1-34411号公報

【特許文献14】再公表WO2005/099089A1公報

【特許文献15】特開2006-203408号公報

【特許文献16】特開2009-225420号公報

【特許文献17】特許第3851336号公報

20

【特許文献18】特許第3216137号公報

【特許文献19】特開2005-204275号公報

## 【非特許文献】

## 【0027】

【非特許文献1】グループ形SAW共振器の製造条件と特性(電子通信学会技術研究報告MW82-59(1982))

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0028】

上述したように、SAWデバイスの周波数温度特性には多くの要素が関係しており、その改善を図るために様々な工夫が行われている。特に、レイリー波を用いたSAWデバイスは、IDTを構成する電極指の膜厚を厚くすることが周波数温度特性の向上に寄与すると考えられている。単にIDTの電極膜厚を厚くするだけでは、通電時のストレスマイグレーションや、IDT形成時のサイドエッチングに起因したライン占有率の変動による周波数安定性の劣化等の問題が生じる。その対応策としては、水晶基板表面のIDTの電極指間に溝を形成することにより、電極膜厚を薄くしながらその実効膜厚を大きくして周波数の変動を抑制することが有効である。

30

## 【0029】

しかしながら、上述したSAWデバイスは、漏洩型SAWを励振させる特許文献13のSAW装置を除いて、いずれも動作温度範囲における周波数温度特性が二次曲線で示されるので、周波数変動幅を十分に小さくしたり変曲点を実現し得るまでは至っていない。そのため、最近のSAWデバイスに対する動作温度範囲の拡大や高精度化、温度変化の激しい環境下における長期の動作安定性等の要求に十分に対応することができない。

40

## 【0030】

そこで本発明は、上述した従来の問題点に鑑みてなされたものであり、その目的は、動作温度範囲において周波数変動量が極めて小さい優れた周波数温度特性を発揮し、温度が大きく変動するような環境下でも安定して動作する優れた耐環境特性を有し、高いQ値を実現し得る、共振子、発振器等のSAWデバイスを提供することにある。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0031】

50

本願発明者は、上記目的を達成するために、面内回転ＳＴカット水晶基板を採用し、その表面にストップバンドの上端モードでＳＡＷを励振するＩＤＴを形成し、かつＩＤＴを構成する電極指間の水晶基板表面を凹設して溝を形成したＳＡＷ共振子において、ＳＡＷの波長、溝の深さＧ、ＩＤＴの電極膜厚Ｈ、その電極指のライン占有率等のパラメータと周波数温度特性との関係を検証した。その結果、動作温度範囲において、周波数変動幅の極小化及び変曲点を実現し得る新規なＳＡＷ共振子を案出した。

【００３２】

この新規な実施形態のＳＡＷ共振子（以下、本実施形態のＳＡＷ共振子という）は、その第１の態様において、オイラー角（ $-1.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $117^\circ$ 、 $142^\circ$ 、 $42.79^\circ$ 、 $49.57^\circ$ ）の水晶基板上に設けられ、ストップバンド上  
10  
端モードのＳＡＷを励振するＩＤＴと、該ＩＤＴを構成する電極指間に位置する水晶基板を窪ませた電極指間溝を有し、

ＳＡＷの波長を、電極指間溝の深さをＧとした場合に、 $0.01 \leq G$  の関係を満たし、

かつ、ＩＤＴのライン占有率をとした場合に、電極指間溝の深さＧとライン占有率とが

【数１】

$$-2.0000 \times G/\lambda + 0.7200 \leq \eta \leq -2.5000 \times G/\lambda + 0.7775 \quad \text{ただし } 0.0100\lambda \leq G \leq 0.0500\lambda$$

…（１）、及び

20

【数２】

$$-3.5898 \times G/\lambda + 0.7995 \leq \eta \leq -2.5000 \times G/\lambda + 0.7775 \quad \text{ただし } 0.0500\lambda < G \leq 0.0695\lambda$$

…（２）

の関係を満たすことを特徴とする。

【００３３】

本実施形態のＳＡＷ共振子は、第２の態様において、前記第１の態様に加えて、電極指間溝の深さＧが、 $0.01 \leq G \leq 0.0695\lambda$  の関係を満たすことを特徴とする。電極指間溝の深さＧをこの範囲に設定することによって、動作温度範囲内（例えば、 $-40 \sim +85^\circ\text{C}$ ）における周波数変動量を小さく抑制でき、かつ電極指間溝の深さに製造上のばらつきが生じてても、個々のＳＡＷ共振子間における共振周波数のシフト量を補正可能な範囲に抑えることができる。

30

【００３４】

更に本実施形態のＳＡＷ共振子は、第３の態様において、前記第１又は第２の態様に加えて、ＩＤＴの電極膜厚をＨとした場合に、 $0 < H \leq 0.035\lambda$  の関係を満たすことを特徴とする。これにより、動作温度範囲内で良好な周波数温度特性が実現され、電極膜厚を大きくしたときに生じ得る耐環境特性の劣化が予め防止される。

【００３５】

また、本実施形態のＳＡＷ共振子は、第４の態様において、前記第３の態様に加えて、ライン占有率が、

40

【数３】

$$\begin{aligned} \eta = & -1963.05 \times (G/\lambda)^3 + 196.28 \times (G/\lambda)^2 - 6.53 \times (G/\lambda) \\ & - 135.99 \times (H/\lambda)^2 + 5.817 \times (H/\lambda) + 0.732 \\ & - 99.99 \times (G/\lambda) \times (H/\lambda) \end{aligned}$$

…（３）

の関係を満たすことを特徴とする。これにより、周波数温度特性の二次温度係数を小さく抑制することができる。

【００３６】

50



更にまた、本実施形態のSAW共振子は、第5の態様において、前記第3又は第4の態様に加えて、電極指間溝の深さGと電極膜厚Hとの和が、 $0.0407 \leq G + H$ の関係を満たすことを特徴とする。これにより、電極指間に溝を設けずにストップバンドの下端モードの共振を用いた従来の場合よりも高いQ値が得られる。

【0037】

図1は、本実施形態のSAW共振子の典型例を示している。図1(A)に示すように、本実施形態のSAW共振子1は、矩形の水晶基板2と、該水晶基板の主面にそれぞれ形成されたIDT3と1対の反射器4、4とを有する。

【0038】

水晶基板2には、オイラー角 $(-1.5^\circ, 1.5^\circ, 117^\circ, 142^\circ, 42.79^\circ, 49.57^\circ)$ で表される面内回転STカット水晶基板を使用する。ここで、オイラー角について説明する。オイラー角 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ で表される基板は、Z軸に垂直な主面を有するZカット基板となる。ここで、オイラー角 $(\alpha, \beta, \gamma)$ の $\alpha$ はZカット基板の第1の回転に関するものであり、Z軸を回転軸とし、+X軸から+Y軸側へ回転する方向を正の回転角度とした第1回転角度である。オイラー角の $\beta$ はZカット基板の第1の回転後に行う第2の回転に関するものであり、第1の回転後のX軸を回転軸とし、第1の回転後の+Y軸から+Z軸へ回転する方向を正の回転角度とした第2の回転角度である。圧電基板のカット面は、第1回転角度 $\alpha$ と第2回転角度 $\beta$ とで決定される。オイラー角の $\gamma$ はZカット基板の第2の回転後に行う第3の回転に関するものであり、第2の回転後のZ軸を回転軸とし、第2の回転後の+X軸から第2の回転後の+Y軸側へ回転する方向を正の回転角度とした第3回転角度である。SAWの伝搬方向は、第2の回転後のX軸に対する第3回転角度 $\gamma$ で表される。

【0039】

面内回転STカット水晶基板は、図2に示すように、水晶の直交する3つの結晶軸、即ち電気軸、機械軸及び光学軸をそれぞれX軸、Y軸及びZ軸で表したとき、Y軸に垂直なXZ面5aを、X軸を回転軸として+Z軸から-Y軸方向に角度 $\theta$  ( $^\circ$ )回転させた、座標軸 $(X, Y', Z')$ の $Y'$ 軸に垂直なXZ'面を有するウエーハ5から切り出される。水晶基板2は、更に $Y'$ 軸を回転軸として+X軸から+Z'軸方向を正として角度 $\phi$  (又は $-\phi$ ) ( $^\circ$ )回転させた新たな座標軸 $(X', Y', Z'')$ に沿ってウエーハ5から切り出して個片化される。このとき、水晶基板2はその長辺 (又は短辺) を $X'$ 軸方向又は $Z''$ 軸方向のいずれに沿って配置してもよい。尚、角度 $\theta$ とオイラー角における $\alpha$ とは、 $\alpha = \theta - 90^\circ$ の関係にある。

【0040】

IDT3は、それぞれ複数の電極指6a、6bからなり、かつそれらの基端部をバスバー7a、7bで接続した1対の櫛歯状電極3a、3bを有する。各電極指6a、6bは、その延長方向が前記IDTにより励振されるSAWの伝搬方向 $X'$ と直交する向きに配置されている。一方の櫛歯状電極3aの電極指6aと他方の櫛歯状電極3bの電極指6bとは、交互にかつ所定の間隔を開けて一定のピッチで配列されている。図1(B)に示すように、電極指6a、6b間に露出する水晶基板2の表面には、該表面をエッチング等で削除することによって、それぞれ一定深さの電極指間溝8が凹設されている。

【0041】

1対の反射器4、4は、SAWの伝搬方向 $X'$ に沿ってIDT3の外側に該IDTを両側から挟むように配置されている。各反射器4は、それぞれSAWの伝搬方向 $X'$ に一定のピッチで配列された複数の導体ストリップ4a、4aを有する。前記各導体ストリップは、IDT3の前記各電極指と同様に、その延長方向がSAWの伝搬方向 $X'$ と直交する向きに配置されている。図1(B)に示すように、導体ストリップ4a、4a間に露出する水晶基板2の表面には、該表面をエッチング等で削除することによって、それぞれ一定深さの導体ストリップ間溝9が凹設されている。

【0042】

本実施形態において、電極指6a、6b及び導体ストリップ4a、4aは、例えばA1

や A 1 を主体とする合金を用いた金属膜で同じ膜厚 H に形成され、総称して電極指ということもできる。電極指間溝 8 と導体ストリップ間溝 9 とは、同じ深さ G に形成される。I D T 3 の最も外側の電極指 6 a ( 又は 6 b ) とそれに隣り合う反射器 4 , 4 の前記導体ストリップとの間も、同様に水晶基板表面を削除して、前記導体ストリップ間溝と同じ深さの溝が凹設されている。

#### 【 0 0 4 3 】

このように構成した S A W 共振子 1 は、水晶基板 2 の X ' 軸方向及び Y ' 軸方向の両方に振動変位成分を有する R a y l e i g h 型 ( レイリー型 ) の S A W を励起する。上述したオイラー角の水晶基板 2 は、S A W の伝播方向が水晶の結晶軸である X 軸からずれているので、ストップバンド上端モードの S A W を励起することが可能である。

10

#### 【 0 0 4 4 】

尚、上述した水晶基板 2 のオイラー角 ( , , ) は、次のようにして選択した。一般に S A W 共振子の周波数温度特性は、次式で表される。

$$f = \alpha \times (T - T_0) + \beta \times (T - T_0)^2$$

ここで、 $f$  は温度  $T$  と頂点温度  $T_0$  間の周波数変化量 ( p p m )、 $\alpha$  は 1 次温度係数 ( p p m / )、 $\beta$  は 2 次温度係数 ( p p m /  $^2$  )、 $T$  は温度、 $T_0$  は周波数が最大となる温度 ( 頂点温度 ) である。2 次温度係数  $\beta$  の絶対値を最小に、好ましくは 0 . 0 1 ( p p m /  $^2$  ) 以下に、より好ましくは略零になるように設定して、周波数温度特性が三次曲線を示すようにすれば、広い動作温度範囲でも周波数変動量を小さくして高い周波数安定性が得られる。

20

#### 【 0 0 4 5 】

先ず、水晶基板 2 のオイラー角を ( 0 ° , 1 2 3 ° , ) とし、 $\beta = \pm 0 . 0 1$  ( p p m /  $^2$  ) となるライン占有率  $\eta$  が得られるときのオイラー角  $\theta$  と電極指間溝の深さ  $G$  との関係シミュレーションした。ここで、オイラー角  $\theta$  は、二次温度係数  $\beta$  の絶対値が 0 . 0 1 ( p p m /  $^2$  ) となるように適宜選択した。その結果、上記条件下で二次温度係数  $\beta$  を - 0 . 0 1 + 0 . 0 1 にし得るオイラー角  $\theta$  の範囲を 4 3 ° <  $\theta$  < 4 5 ° と定めることができた。

#### 【 0 0 4 6 】

尚、I D T 3 のライン占有率  $\eta$  は、図 1 ( C ) に示すように、電極指幅  $L$  を電極指ピッチ  $P$  / 2 ( =  $L + S$  ) で除した値である。また、図 1 ( D ) は、I D T 3 の電極指 6 a 、6 b 及び電極指間溝 8 をフォトリソグラフィ技法とエッチング技法とにより製造したときに形成されるであろう台形状の断面において、I D T 3 のライン占有率  $\eta$  を特定する方法を説明するためのものである。この場合、ライン占有率  $\eta$  は、電極指間溝 8 の底部から該電極指間溝の深さ  $G$  と電極膜厚  $H$  との合計値 (  $G + H$  ) の 1 / 2 となる高さにおいて測定した電極指幅  $L$  と電極指間溝幅  $S$  とに基づいて算出する。

30

#### 【 0 0 4 7 】

次に、水晶基板 2 をカット角及び S A W 伝搬方向をオイラー角表示で ( 0 , , ) とし、電極指間溝の深さ  $G$  を 0 . 0 4 、電極指の膜厚  $H$  を 0 . 0 2 、ライン占有率  $\eta$  を上記 ( 3 ) 式に従って 0 . 6 3 8 3 として、オイラー角  $\theta$  に関する二次温度係数  $\beta$  の変化をシミュレーションした。ここで、オイラー角  $\theta$  は上述した 4 3 ° <  $\theta$  < 4 5 ° の範囲内で、角度  $\theta$  の設定角度に基づいて二次温度係数  $\beta$  の絶対値を最小とするように適宜選択した。その結果、オイラー角  $\theta$  が 1 1 7 ° ~ 1 4 2 ° の範囲内にあれば、電極指の膜厚  $H$ 、電極指間溝の深さ  $G$ 、及びライン占有率  $\eta$  を変化させても、二次温度係数  $\beta$  の絶対値が 0 . 0 1 ( p p m /  $^2$  ) の範囲内にあることを確認した。

40

#### 【 0 0 4 8 】

次に、水晶基板 2 をオイラー角表示で ( , 1 2 3 ° , 4 3 . 7 7 ° ) とし、電極指間溝の深さ  $G$  を 0 . 0 4 、電極指の膜厚  $H$  を 0 . 0 2 、ライン占有率  $\eta$  を 0 . 6 5 として、オイラー角  $\theta$  に関する二次温度係数  $\beta$  の変化をシミュレーションした。その結果、オイラー角  $\theta$  が - 1 . 5 ° ~ + 1 . 5 ° の範囲内にあれば、二次温度係数  $\beta$  の絶対値が 0 . 0 1 ( p p m /  $^2$  ) の範囲内にあることを確認した。

50

## 【 0 0 4 9 】

更に、動作温度範囲（ - 4 0 ~ + 8 5 ）における周波数変動量が最小となる非常に望ましいオイラー角 と の関係をシミュレーションにより求めた。この場合も、電極指間溝の深さ G 及び電極指の膜厚 H は、それぞれ  $G = 0.04$ 、 $H = 0.02$  とした。その結果、オイラー角 は、上述したオイラー角 の範囲でその増加と共に三次曲線を描くように増加した。この関係は、次式で近似することができる。

## 【 数 4 】

$$\psi = 1.19024 \times 10^{-3} \times \theta^3 - 4.48775 \times 10^{-1} \times \theta^2 + 5.64362 \times 10^1 \times \theta - 2.32327 \times 10^3 \pm 1.0$$

これにより、オイラー角 は、オイラー角 の下限値  $= 117^\circ$  において  $= 42.79^\circ$  となり、上限値  $= 142^\circ$  において  $= 49.57^\circ$  となる。従って、オイラー角 は、 $117^\circ$  ~  $142^\circ$  の範囲で、 $42.79^\circ$  ~  $49.57^\circ$  に設定することができる。

## 【 0 0 5 0 】

このように水晶基板 2 のオイラー角を設定することによって、本実施形態の S A W 共振子 1 は、2 次温度係数の絶対値が  $0.01$  ( p p m /  $^\circ$  ) 以下の優れた周波数温度特性を実現することができる。

## 【 0 0 5 1 】

本実施形態の S A W 共振子 1 について、以下の条件で周波数温度特性をシミュレーションした。

- 本実施形態の S A W 共振子 1 の基本データ

H :  $0.02$

G : 変化

I D T ライン占有率 :  $0.6$

反射器ライン占有率 r :  $0.8$

オイラー角 : (  $0^\circ$  ,  $123^\circ$  ,  $43.5^\circ$  )

I D T 対数 :  $120$

電極指交差幅 :  $40$  (  $= 10 \mu\text{m}$  )

反射器本数 ( 片側あたり ) :  $60$

電極指の傾斜角度 : なし

## 【 0 0 5 2 】

このシミュレーション結果を図 3 に示す。同図から分かるように、周波数温度特性は動作温度範囲（ - 4 0 ~ + 8 5 ）において略 3 次曲線を示しており、周波数変動幅を  $20$  p p m 以内という極めて小さな変動量に抑圧することできた。

## 【 0 0 5 3 】

図 3 の周波数温度特性を示す S A W 共振子 1 について、周波数、等価回路定数、及び静特性をまとめると、以下の表 1 になる。

【 表 1 】

	F(MHz)	Q	$\gamma$	CI( $\Omega$ )	M
AVG	318.25	13285	2476	21.8	5.4

ここで、F は周波数、Q は Q 値、 $\gamma$  は容量比、C I は C I ( クリスタルインピーダンス : Crystal Impedance ) 値、M は性能指数 ( フィギュアオブメリット : Figure of Merit ) である。

## 【 0 0 5 4 】

S A W 共振子 1 は、I D T 3 のストップバンド上端の周波数  $f_{t2}$  と、反射器 4 のストップバンド下端の周波数  $f_{r1}$  及びストップバンド上端の周波数  $f_{r2}$  とが、 $f_{r1} < f_{t2} < f_{r2}$  の関係を満たすように設定するのが好ましい。図 4 は、周波数に関する I D T 3 及び反射器 4 の S A W 反射特性を示している。同図のように、周波数  $f_{t2}$  を周波数  $f_{r1}$  と周波数  $f_{r2}$  との間に設定すると、周波数  $f_{t2}$  において反射器 4 の反射係数が I D T 3 の反射係数よ

りも大きくなる。その結果、I D T 3 から励振されたストップバンド上端モードの S A W は、反射器 4 から I D T 3 側により高い反射係数で反射されることになる。従って、S A W の振動エネルギーを効率良く閉じ込めることができ、低損失な S A W 共振子 1 を実現できる。

#### 【 0 0 5 5 】

また、S A W 共振子 1 の Q 値について、電極指 6 a、6 b の高さ即ち膜厚 H と電極指間溝 8 の深さ G とにより形成される段差の大きさ ( G + H ) との関係性をシミュレーションにより検証した。比較のため、電極指間に溝を設けずかつストップバンド上端モードの共振を用いる従来の S A W 共振子について、以下の条件で Q 値と電極指の高さ即ち膜厚との関係をシミュレーションした。

#### 【 0 0 5 6 】

- 従来の S A W 共振子の基本データ

H : 変化

G : ゼロ ( 無し )

I D T ライン占有率 : 0 . 4

反射器ライン占有率 r : 0 . 3

オイラー角 ( 0 ° , 1 2 3 ° , 4 3 . 5 ° )

I D T 対数 : 1 2 0

電極指交差幅 : 4 0 ( = 1 0 μ m )

反射器本数 ( 片側あたり ) : 6 0

電極指の傾斜角度 : なし

#### 【 0 0 5 7 】

このシミュレーション結果を図 5 に示す。同図において、太線は本実施形態の S A W 共振子 1 を、細線は従来の S A W 共振子を示している。同図から分かるように、本実施形態の S A W 共振子 1 は、段差 ( G + H ) が 0 . 0 4 0 7 ( 4 . 0 7 % ) 以上の領域において、従来の S A W 共振子よりも高い Q 値を得ることができる。

#### 【 0 0 5 8 】

更に、本実施形態の S A W 共振子においても、上述した傾斜型 I D T 構造を採用することによって、良好な周波数温度特性に加えて、Q 値、C I 値等の電気的特性を向上させ得ることが期待される。そこで、本願発明者は、本実施形態の S A W 共振子に傾斜型 I D T 構造を採用し、I D T 及び反射器を、電極指及び導体ストリップに直交する第 1 の方向第 1 の方向に対して、角度  $\theta$  をもって傾斜する第 2 の方向に配置した場合に、この傾斜角度  $\theta$  とオイラー角  $\phi$  との関係について更に検討を進めた。その結果、傾斜型 I D T 構造においても、広い動作温度範囲において優れた周波数温度特性と、良好な電気的特性即ち Q 値及び C I 値とを同時に実現し得ることを見出し、本発明を想到したものである。

#### 【 0 0 5 9 】

本発明の S A W デバイスは、オイラー角 ( - 1 . 5 ° , 1 . 5 ° , 1 1 7 . 1 4 2 ° , 4 2 . 7 9 ° , 4 9 . 5 7 ° ) の水晶基板と、

該水晶基板の主面に設けられた複数の電極指からなり、ストップバンド上端モードの弾性表面波を励振する I D T と、

弾性表面波の伝播方向に沿って I D T を挟むようにその両側に配置した、それぞれ複数の導体ストリップからなる一対の反射器と、

I D T の隣り合う電極指間の水晶基板の表面に凹設した電極指間溝と、

反射器の隣り合う導体ストリップ間の水晶基板の表面に凹設した導体ストリップ間溝とを有し、

弾性表面波の波長  $\lambda$  と電極指間溝の深さ G とが、 $0 < G \leq 0.01\lambda$  の関係を満足し、

I D T のライン占有率  $\eta$  と電極指間溝の深さ G とが、

#### 【 数 5 】

$$-2.0000 \times G / \lambda + 0.7200 \leq \eta \leq -2.5000 \times G / \lambda + 0.7775 \quad \text{ただし } 0.0100\lambda \leq G \leq 0.0500\lambda$$

10

20

30

40

50

及び、

【数 6】

$$-3.5898 \times G/\lambda + 0.7995 \leq \eta \leq -2.5000 \times G/\lambda + 0.7775 \quad \text{ただし } 0.0500\lambda < G \leq 0.0695\lambda$$

の関係を満足し、

電極指及び導体ストリップに直交する第 1 の方向と水晶基板の電機軸とのなす角度がオイラー角 であり、

I D T 及び反射器の少なくとも一部が、第 1 の方向と角度 をもって交差する第 2 の方向に配置され、かつこの角度 が  $1.0^\circ$   $2.75^\circ$  の範囲内にあることを特徴とする。

10

【0060】

このように I D T 及び反射器を配置することによって、S A W の振動エネルギーを効率良く閉じ込めることができる。その結果、後述するように広い動作温度範囲において、上述したオイラー角の面内回転 S T カット水晶板からなる水晶基板と電極指間溝とにより得られる良好な周波数温度特性を維持しつつ、それと同時に高い Q 値及び低 C I 値の良好な電気的特性を実現し、発振安定性に優れた S A W デバイスを得ることができる。

【0061】

或る実施例では、角度 とオイラー角 とが、  $= 1.06 + 43.69^\circ + 0.05^\circ$  の関係を満足することによって、広い動作温度範囲において高い Q 値及び低 C I 値と共に、周波数変動量が極めて小さい優れた周波数温度特性を有する S A W デバイスを実現することができる。

20

【0062】

別の実施例では、I D T のライン占有率 が、

【数 7】

$$\begin{aligned} \eta = & -1963.05 \times (G/\lambda)^3 + 196.28 \times (G/\lambda)^2 - 6.53 \times (G/\lambda) \\ & - 135.99 \times (H/\lambda)^2 + 5.817 \times (H/\lambda) + 0.732 \\ & - 99.99 \times (G/\lambda) \times (H/\lambda) \end{aligned}$$

を満足することにより、周波数温度特性の二次温度係数をより小さく抑制できるので、周波数変動量をより小さくしかつより優れた三次曲線の周波数温度特性が得られる。

30

【0063】

更に別の実施例では、電極指間溝の深さ G と電極指の膜厚 H との和が、  $0.0407$

G + H を満足することにより、ストップバンド上端モードの共振を用いた場合に、I D T の電極指間に溝を設けずにストップバンド下端モードの共振を用いる従来の S A W 共振子従来の場合よりも高い Q 値が得られる。

【0064】

また、別の実施例では、I D T を駆動するための発振回路を更に有することにより、広い動作温度範囲で周波数変動量が極めて小さく、C I 値が低く、かつ発振安定性に優れた S A W 発振器を得ることができる。

40

【0065】

本発明の別の側面によれば、上述した本発明の S A W デバイスを備え、それにより広い動作温度範囲で安定して良好な性能を発揮し得る電子機器、センサー装置が提供される。

【図面の簡単な説明】

【0066】

【図 1】(A) 図は本実施形態の S A W 共振子の構成を示す平面図、(B) 図はその部分拡大縦断面図、(C) 図は(B) 図の部分拡大図、(D) 図はフォトリソグラフィ及びエッチング技術により形成される(C) 図の溝部の断面形状を示す図。

【図 2】図 1 の S A W 共振子の水晶基板を模式的に示す説明図。

【図 3】図 1 の S A W 共振子の周波数温度特性を示す線図。

50

【図４】図１のＳＡＷ共振子のＩＤＴ及び反射器のＳＡＷ反射特性を示す線図。

【図５】図１のＳＡＷ共振子の電極指間の段差とＱ値との関係を示す線図。

【図６】（Ａ）図は本発明によるＳＡＷデバイスの第１実施例を示す平面図、（Ｂ）図はそのVI-VI線における部分拡大縦断面図。

【図７】実施例１の周波数温度特性を最適にするＩＤＴの傾斜角とオイラー角との関係を示す線図。

【図８】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 2^{\circ}$ の場合の周波数温度特性を示す線図。

【図９】比較例のＩＤＴの傾斜角 $= 2^{\circ}$ の場合の周波数温度特性を示す線図。

【図１０】実施例１のＩＤＴの傾斜角とＱ値との関係を示す線図。

【図１１-１】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 0^{\circ}$ の場合の動作温度範囲におけるＱ値の変化を示す線図。 10

【図１１-２】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 1.0^{\circ}$ の場合の動作温度範囲におけるＱ値の変化を示す線図。

【図１１-３】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 1.5^{\circ}$ の場合の動作温度範囲におけるＱ値の変化を示す線図。

【図１１-４】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 2.0^{\circ}$ の場合の動作温度範囲におけるＱ値の変化を示す線図。

【図１１-５】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 2.5^{\circ}$ の場合の動作温度範囲におけるＱ値の変化を示す線図。

【図１１-６】実施例２のＩＤＴの傾斜角 $= 3.0^{\circ}$ の場合の動作温度範囲におけるＱ値の変化を示す線図。 20

【図１２】実施例２のＩＤＴの傾斜角とＱ値との関係を示す線図。

【図１３】実施例１のＩＤＴの傾斜角とＣＩ値との関係を示す線図。

【図１４】（Ａ）図は本発明による第２実施例のＳＡＷ発振器を示す平面図、（Ｂ）図はそのXIV-XIV線における縦断面図。

【図１５】傾斜型ＩＤＴ構造の従来例を示す平面図。

【図１６】傾斜型ＩＤＴ構造の別の従来例を示す平面図。

【発明を実施するための形態】

【００６７】

以下に、添付図面を参照しつつ、本発明の好適な実施例を詳細に説明する。尚、添付図面において、同一又は類似の構成要素には同一又は類似の参照符号を付して示す。 30

【００６８】

図６（Ａ）（Ｂ）は、本発明によるＳＡＷデバイスの第１実施例であるＳＡＷ共振子の構成を示している。本実施例のＳＡＷ共振子１１は、矩形の水晶基板１２と、該水晶基板の主面にそれぞれ形成されたＩＤＴ１３と１対の反射器１４、１４とを有する。水晶基板１２は、図１に関連して上述したＳＡＷ共振子１の水晶基板２と同じオイラー角（ $-1.5^{\circ}$ 、 $1.5^{\circ}$ 、 $117^{\circ}$ 、 $142^{\circ}$ 、 $42.79^{\circ}$ 、 $49.57^{\circ}$ ）の面内回転ＳＴカット水晶板を使用する。

【００６９】

ＩＤＴ１３は、それぞれ複数の電極指１５ａ、１５ｂからなり、かつそれらの基端部をバスバー１６ａ、１６ｂで接続した１対の櫛歯状電極１３ａ、１３ｂを有する。電極指１５ａ、１５ｂ間に露出する水晶基板１２の表面には、図６（Ｂ）に示すように、該表面をエッチング等で削除することによって、それぞれ一定深さの電極指間溝１７が凹設されている。一方の櫛歯状電極１３ａの電極指１５ａと他方の櫛歯状電極１３ｂの電極指１５ｂとは、それらの延長方向と直交する向きに沿って交互にかつ所定の間隔を開けて一定のピッチＰｔで配列されている。 40

【００７０】

１対の反射器１４、１４は、ＳＡＷの伝搬方向に沿ってＩＤＴ１３の両側に該ＩＤＴを挟むように配置されている。各反射器１４は、それぞれ複数の導体ストリップ１４ａ、１４ａを有する。導体ストリップ（電極指）１４ａ、１４ａ間に露出する水晶基板１２の表 50

面には、図 6 ( B ) に示すように、該表面をエッチング等で削除することによって、それぞれ一定深さの導体ストリップ間溝 1 8 が凹設されている。前記各導体ストリップは、I D T 1 3 の前記各電極指と同様に、それらの延長方向と直交する向きに沿って一定のピッチ  $P_r$  で配列されている。

#### 【 0 0 7 1 】

前記電極指及び導体ストリップは、例えば A 1 や A 1 を主体とする合金を用いた金属膜で同じ膜厚 H に形成される。電極指間溝 1 7 と導体ストリップ間溝 1 8 とは、同じ深さ G に形成される。各反射器 1 4 , 1 4 の最も内側の前記導体ストリップとそれに隣り合う I D T 1 3 の最も外側の電極指 1 5 a ( 又は 1 5 b ) との間も、同様に水晶基板表面を削除して、前記導体ストリップ間溝と同じ深さの溝が凹設されている。

10

#### 【 0 0 7 2 】

上述したオイラー角の面内回転 S T カット水晶板からなる水晶基板 1 2 は、水晶の結晶異方性のため、I D T 1 3 により S A W を励振させたとき、水晶基板 1 2 の X ' 軸の方向である S A W の位相速度の方向 1 9 と、S A W エネルギーの伝搬方向である群速度の方向 2 0 とが異なる。S A W の位相速度の方向 1 9 ( X ' 軸 ) と水晶の電気軸 ( X 軸 ) とのなす角度がオイラー角 である。群速度の方向 2 0 は、位相速度の方向 1 9 に対して傾斜角をもって交差している。

#### 【 0 0 7 3 】

電極指 1 5 a 、 1 5 b 及び導体ストリップ 1 4 a , 1 4 a は、その延長方向が水晶基板 1 2 の X ' 軸即ち S A W の位相速度の方向 1 9 と直交するように形成されている。更に前記電極指及び導体ストリップは、群速度の方向 2 0 に沿って位相速度の方向 1 9 から角度 傾斜させた向きに配置されている。このとき、導体ストリップ 1 4 a , 1 4 a の群速度の方向 2 0 に直交する幅  $W_r$  を、電極指 1 5 a 、 1 5 b の群速度の方向 2 0 に直交する方向の幅  $W_t$  と同じに設定することによって、S A W エネルギーは反射器 1 4 , 1 4 からの漏れを少なくし、効率良く閉じ込めることができる。

20

#### 【 0 0 7 4 】

別の実施例では、少なくとも I D T 1 3 の電極指及び反射器 1 4 , 1 4 の導体ストリップの一部が、群速度の方向 2 0 に沿って配置されていれば、S A W エネルギーの反射器 1 4 , 1 4 からの漏れを少なくすることができる。また、別の実施例では、前記導体ストリップの幅  $W_r$  を前記電極指の幅  $W_t$  より広く設定する。これによって、群速度の方向 2 0 に沿って伝搬する S A W エネルギーのほとんどを反射器 1 4 , 1 4 により反射し、閉じ込め効果を向上させることができる。

30

#### 【 0 0 7 5 】

本実施例の傾斜型 I D T 構造では、群速度の方向 2 0 と位相速度の方向 1 9 とのなす角度 が、 $1 . 0 ^{\circ}$  ~  $2 . 7 5 ^{\circ}$  の範囲内にるように設定する。これにより、上述したオイラー角の面内回転 S T カット水晶板からなる水晶基板 1 2 及び電極指間溝 1 7 によって得られる良好な周波数温度特性を維持しつつ、高い Q 値及び低インピーダンス化 ( 低 C I 値 ) を達成することができる。

#### 【 0 0 7 6 】

更に本実施例では、角度 と水晶基板 1 2 のオイラー角 とが、 $= 1 . 0 6 ^{\circ} + 4 3 . 6 9 ^{\circ} \pm 0 . 0 5 ^{\circ}$  の関係を満足するように設定する。これにより、広い動作温度範囲において、高い Q 値及び低 C I 値と共に、周波数変動量が極めて小さい優れた周波数温度特性を発揮する S A W 共振子を実現することができる。

40

#### 【 0 0 7 7 】

このように構成することによって、S A W 共振子 1 1 は、水晶基板 1 2 の X ' 軸方向から角度 傾斜した群速度の方向 2 0 及び Y ' 軸方向の両方に振動変位成分を有する R a y l e i g h 型 ( レイリー型 ) の S A W を励起する。上述したオイラー角の水晶基板 1 2 を用いることによって、S A W の伝播方向が水晶の結晶軸である X 軸からずれているので、ストップバンド上端モードの S A W を励起することができる。

#### 【 0 0 7 8 】

50

図 6 ( B ) に示すように、 I D T 1 3 のライン占有率 は、電極指 1 5 a、1 5 b の線幅を  $L_t$ 、電極指間溝 1 7 の幅を  $S_t$  として、 $\gamma = L_t / (L_t + S_t)$  で表される。反射器 1 4 のライン占有率  $\gamma_r$  は、導体ストリップ 1 4 a の線幅を  $L_r$ 、導体ストリップ間溝 1 8 の幅を  $S_r$  として、 $\gamma_r = L_r / (L_r + S_r)$  で表される。

【 0 0 7 9 】

ここで、I D T 1 3 の電極指のピッチ  $P_t$  及び反射器 1 4 の導体ストリップのピッチ  $P_r$  について説明する。交差する 1 対の櫛歯状電極 1 3 a、1 3 b の各電極指ピッチ  $P_t$  と、電極指の線幅  $L_t$  及び b 電極指間の幅 ( 即ち、電極指間溝の S A W 伝搬方向の幅 )  $S_t$  との関係は、 $L_t + S_t = d_t$  としたとき、 $P_t = 2 \times d_t = 2 \times (L_t + S_t)$  となる。即ち、S A W 伝搬方向に見て、隣り合う電極指 1 3 a と電極指 1 3 b との中心間距離  $d_t$  ( 所謂、ラインアンドスペース ) は、 $d_t = L_t + S_t$  となる。従って、電極指ピッチ  $P_t = 2 \times d_t =$  となる。

10

【 0 0 8 0 】

反射器 1 4 は、S A W 伝搬方向に見て、隣り合う導体ストリップ 1 4 a の中心間距離  $d_r$  が、 $d_r = L_r + S_r$  となる。この中心間距離  $d_r$  は、反射器 1 4 を伝搬する S A W の波長の  $1 / 2$ 、即ち  $d_r = \lambda / 2$  にする。従って、導体ストリップ 1 4 a のピッチ  $P_r$  は、 $P_r = 2 \times d_r = 2 \times (L_r + S_r)$  となる。

【 0 0 8 1 】

( 実施例 1 )

S A W 共振子 1 1 の仕様を次のように設定した。

20

水晶基板寸法 :  $5.0 \times 1.5$  ( mm )

オイラー角 : (  $0^\circ$  ,  $123^\circ$  ,  $45.8^\circ$  )

I D T 対数 : 1 8 0

反射器本数 ( 片側あたり ) : 7 8

【 0 0 8 2 】

I D T 1 3 は次のように設計した。

S A W 波長 :  $7.9$  (  $\mu\text{m}$  )、

電極材料 : A 1

電極指膜厚  $H$  :  $0.02$  (  $2\%$  ) =  $0.1580$  (  $\mu\text{m}$  )

電極指ピッチ  $P_t$  :  $\lambda / 2 = 3.95$  (  $\mu\text{m}$  )、

30

電極指線幅  $L_t$  :  $0.625 P_t = 2.4688$  (  $\mu\text{m}$  )

( ライン占有率 :  $0.625$  )

【 0 0 8 3 】

反射器 1 4 は次のように設計した。

電極材料 : A 1

導体ストリップ膜厚  $H$  :  $2\%$  (  $0.02$  ) =  $0.1580$  (  $\mu\text{m}$  )

導体ストリップピッチ  $P_r$  :  $\lambda / 2 = 3.95$  (  $\mu\text{m}$  )、

導体ストリップ線幅 :  $0.625 P_r = 2.4688$  (  $\mu\text{m}$  )

( ライン占有率 :  $0.625$  )

【 0 0 8 4 】

40

電極指間溝 1 7 は次のように設計した。

深さ :  $0.045$  (  $4.5\%$  ) =  $0.3555$  (  $\mu\text{m}$  )

電極指実効膜厚 :  $0.065$  (  $6.5\%$  ) =  $0.5135$  (  $\mu\text{m}$  )

【 0 0 8 5 】

このように設計した S A W 共振子 1 1 について、傾斜角 が  $1.0$  ~  $3.0$  の範囲で周波数温度特性の 2 次温度係数 が最適となる傾斜角 とオイラー角 との関係をシミュレーションした。この結果を図 7 に示す。同図において、プロットした黒丸点を結ぶ実線は  $\gamma = 0$  となる場合を示している。また同図において、プロットした黒丸点を結ぶ破線は、 $|\gamma| = 0.01$  となる場合の上限値を、プロットした三角形黒点を結ぶ破線はその下限値を示している。

50



## 【0086】

同図から、前記上限値を示す破線と下限値を示す破線との間に、実施例1のSAW共振子11について2次温度係数 $| \quad | \quad 0.01$ の良好な周波数温度特性を発揮し得る傾斜角 $\theta$ 及びオイラー角 $\phi$ の範囲が存在することを確認できた。同図において、 $\phi = 0$ となる傾斜角 $\theta$ とオイラー角 $\phi$ との関係を検証したところ、それらは次の条件式、

$$\theta = 1.06 + 43.69^\circ \dots (4)$$

を満足することが判明した。更に、 $| \quad | \quad 0.01$ となる傾斜角 $\theta$ とオイラー角 $\phi$ との関係を検証したところ、それらは次の条件式、

$$\theta = 1.06 + 43.69^\circ \pm 0.05^\circ \dots (5)$$

を満足することが判明した。

10

## 【0087】

次に、実施例1のSAW共振子11について、傾斜角 $\theta = 2^\circ$ として周波数温度特性をシミュレーションした。このとき、水晶基板12のオイラー角 $\phi = 45.8^\circ$ は、傾斜角 $\theta = 2^\circ$ において上記条件式(4)を満足している。この結果を図8に示す。同図に示すように、 $-40 \sim +85$ の広い動作温度範囲において、周波数変動量が3次曲線で表される良好な周波数温度特性を有することが確認された。

## 【0088】

比較例として、水晶基板12のオイラー角 $\phi$ をIDTの傾斜角 $\theta$ と同じ角度 $2^\circ$ だけ回転させた $\phi = 45.69^\circ$ の場合について、周波数温度特性をシミュレーションした。この結果を図9に示す。同図に示すように、 $-40 \sim +85$ の広い動作温度範囲において、周波数温度特性は、傾斜角 $\theta$ が $0^\circ$ の場合、即ちIDT13が水晶基板のX'軸に対して傾斜していない従来のIDT構造よりも劣化している。このように本発明によれば、水晶基板12のオイラー角 $\phi$ を上記条件式(4)、(5)のように設定することによって、良好な周波数温度特性が得られる。

20

## 【0089】

更に、実施例1のSAW共振子11について、傾斜角 $\theta$ と $-40 \sim +85$ の広い動作温度範囲において最低値となるQ値との関係をシミュレーションした。その結果を図10に示す。同図において、傾斜角 $\theta$ が $0^\circ$ の場合、即ちIDT13が水晶基板のX'軸に対して傾斜していない従来のIDT構造では、Q値が1500未満である。これに対し、傾斜角 $\theta$ が $1.0 \sim 2.75$ の範囲では、Q値が1800を超えており、従来構造よりも大幅に改善されていることを確認できた。

30

## 【0090】

(実施例2)

上記実施例1において、反射器14の導体ストリップ線幅を $0.725 \text{ Pr}(=2.8638 \mu\text{m})$ 、ライン占有率を $r = 0.725$ に変更した。実施例2について、IDTの傾斜角 $\theta = 0^\circ, 1.0^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ, 2.5^\circ, 3.0^\circ$ とした場合に、 $-40 \sim +85$ の広い動作温度範囲におけるQ値の変化をシミュレーションした。その結果を図11-1乃至図11-6に示す。

## 【0091】

図11-2乃至図11-5から、傾斜角 $\theta = 1.0^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ, 2.5^\circ$ の場合、Q値が動作温度範囲全体に亘って比較的安定して高い値を示すことが分かる。これに対し、傾斜角 $\theta = 0^\circ$ の場合、図11-1に示すように、低温側でQ値が低下している。傾斜角 $\theta = 3.0^\circ$ の場合、図11-6に示すように、低温側でQ値が著しく劣化している。実施例2の結果から、Q値の温度特性の観点から、 $1.0 \sim 2.5$ が傾斜角 $\theta$ の最適範囲であることが判明した。

40

## 【0092】

次に、実施例2について、傾斜角 $\theta$ と $-40 \sim +85$ の広い動作温度範囲において最低値となるQ値との関係をシミュレーションした。この結果を図12に示す。同図に示すように、傾斜角 $\theta$ が $0^\circ$ である従来のIDT構造の場合、Q値が10000未満である。これに対し、傾斜角 $\theta$ が $1.0 \sim 2.75$ の範囲では、Q値が12800を超えてお

50

り、従来構造よりも大幅に改善されていることを確認できた。また、傾斜角 が 3 . 0 の範囲では、Q 値が 1 0 0 0 0 未満に低下している。このように本発明の S A W 共振子は、広い動作温度範囲で発振器として利用することができる。

#### 【0093】

更に、傾斜角 と - 4 0 ~ + 8 5 の広い動作温度範囲において最大となる C I 値との関係をシミュレーションした。この結果を図 1 3 に示す。図 1 3 は、傾斜角 が 0 ° である従来の I D T 構造の場合、C I 値が 2 5 を超えているが、傾斜角 が 1 . 0 2 . 5 の範囲では、低い C I 値が得られることを示している。一般に C I 値は、Q 値に反比例することが知られているが、このシミュレーション結果は、本発明によって高 Q 値化と同時に低 C I 値化を実現できることを示している。

10

#### 【0094】

更に本願発明者は、傾斜角 = 2 . 0 ° の場合に、電極指膜厚 H、電極指間溝の深さ G、及びオイラー角 をパラメーターとして、周波数変動量が少ない 3 次曲線の優れた周波数温度特性と高い Q 値とを実現し得る I D T ライン占有率、反射器ライン占有率  $r$ 、2 次温度係数と、その場合に得られる Q 値とを算出した。その結果を以下の表 2 に示す。

【表 2】

H/ $\lambda$	G/ $\lambda$	$\theta$	$\eta$	$\eta r$	傾斜角: $\alpha$	二次温度係数: $\beta$	Q
%	%	°			°	ppm/°C <sup>2</sup>	
2	4	117	0.625	0.725	2.0	-0.01	14910
		123	0.625	0.725	2.0	0.00	15030
		142	0.625	0.725	2.0	-0.01	14690

20

#### 【0095】

一般に Q 値は、S A W エネルギーの閉じ込め効果によって略決定され、言い換えれば反射器の反射効率即ち反射器の構造（反射器本数、実効膜厚、電極線幅、密度等）によって決定される。従って、水晶基板のカット角、例えばオイラー角 を多少変化させても、Q 値にはほとんど影響しないはずである。表 2 から分かるように、オイラー角 を優れた周波数温度特性が得られる角度範囲内で 1 1 7 °、1 2 3 °、1 4 2 ° に変化させたが、 $r$  において全ての場合に、2 次温度係数は - 0 . 0 1 ~ + 0 . 0 1 ppm / °C<sup>2</sup> の良好な周波数温度特性が、Q 値は概ね 1 5 0 0 0 の高い値が得られる。

30

#### 【0096】

従って、本発明によれば、オイラー角 = 1 1 7 ° ~ 1 4 2 ° の範囲で良好な周波数温度特性と高い Q 値とを同時に実現できることが分かる。また、Q 値は、傾斜角 を上述した最適範囲に設定することによって、電極指膜厚 H、電極指間溝の深さ G、オイラー角 及びライン占有率に影響されることなく、改善できることが裏付けられた。

#### 【0097】

本発明は、上述した本発明の S A W 共振子と発振回路とを組み合わせる構成される発振器にも適用することができる。図 1 4 ( A )、( B ) は、そのような本発明による S A W デバイスの第 2 実施例である S A W 発振器の典型例の構成を示している。本実施例の S A W 発振器 3 1 は、本発明による S A W 共振子 3 2 と、該 S A W 共振子を駆動制御する発振回路として I C ( integrated circuit ) 3 3 と、これらを収容するパッケージ 3 4 とを備える。S A W 共振子 3 2 及び I C 3 3 は、パッケージ 3 4 の底板 3 4 a 上に表面実装されている。

40

#### 【0098】

S A W 共振子 3 2 は、第 1 実施例の S A W 共振子 1 1 と同様の構成を有し、第 1 実施例と同じオイラー角で表示される水晶基板 3 5 と、その表面に形成された 1 対の櫛歯状電極 3 6 a、3 6 b からなる I D T と 1 対の反射器 3 7、3 7 とを有する。I C 3 3 の上面には、電極パッド 3 8 a ~ 3 8 f が設けられている。パッケージ 3 4 の底板 3 4 a 上には、電極パターン 3 9 a ~ 3 9 g が形成されている。S A W 共振子 3 2 の櫛歯状電極 3 6 a、3 6 b 及び I C 3 3 の電極パッド 3 8 a ~ 3 8 f は、それぞれボンディングワイヤ 4 0、

50

41により対応する電極パターン39a～39gと電氣的に接続されている。このようにSAW共振子32及びIC33を搭載したパッケージ34は、その上部に接合されたリッド42により気密に封止されている。

#### 【0099】

本実施例のSAW発振器31は、本発明のSAW共振子を備えることによって、広い動作温度範囲で周波数変動量が極めて小さい優れた周波数温度特性を有すると共に、高いQ値を有するので、安定した発振動作が可能であり、更に低インピーダンス化による消費電力の低減を実現することができる。その結果、近年の情報通信の高速化に基づく高周波化及び高精度化の要求に対応し、低温から高温まで温度が大きく変動するような環境下でも長期に安定して動作する優れた耐環境特性を備えたSAW発振器が得られる。

10

#### 【0100】

本発明は、上記実施例に限定されるものでなく、その技術的範囲内で様々な変形又は変更を加えて実施することができる。例えば、IDTの電極構造は、上記実施例以外に、公知の様々な構成を採用することができる。また、本発明は、上述したSAW共振子、SAW発振器以外の様々なSAWデバイスに同様に適用することができる。更に本発明のSAWデバイスは、例えば携帯電話、ハードディスク、パーソナルコンピューター、BS及びCS放送用の受信チューナー、同軸ケーブルや光ケーブル中を伝搬する高周波信号や光信号用の各種処理装置、広い温度範囲で高周波・高精度クロック（低ジッタ、低位相雑音）を必要とするサーバー・ネットワーク機器、無線通信用機器等の様々な電子機器、各種モジュール装置や、圧力センサー、加速度センサー、回転速度センサー等の各種センサー装置にも広く適用することができる。

20

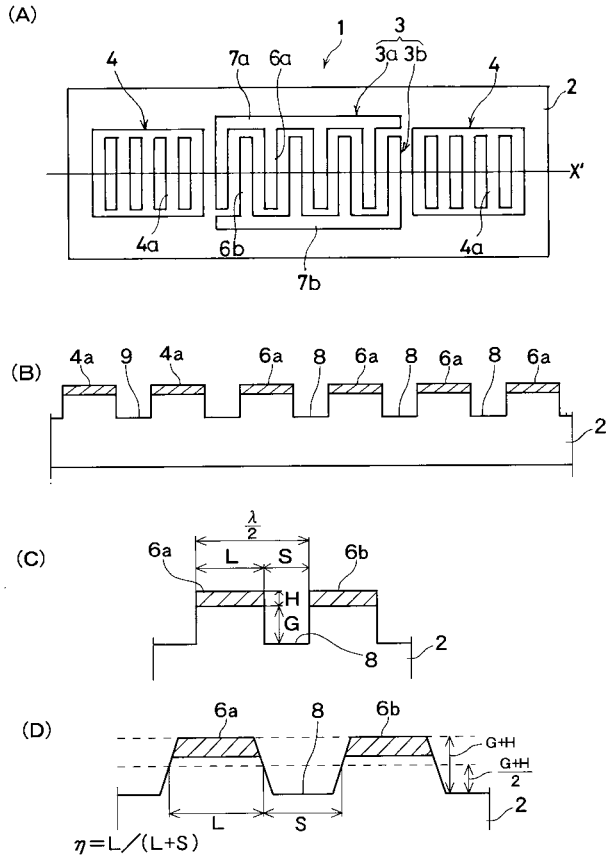
#### 【符号の説明】

#### 【0101】

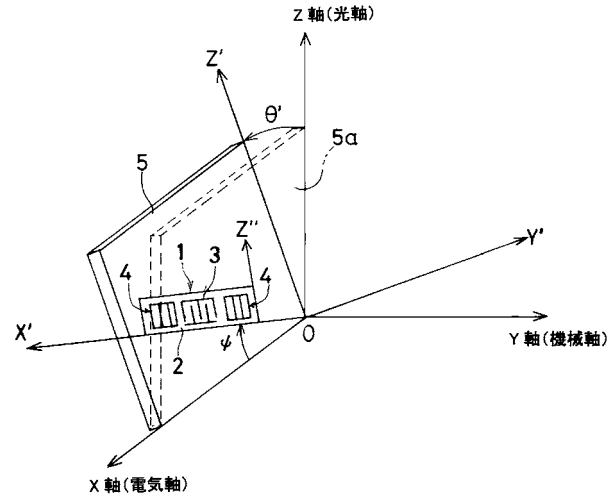
1, 11, 32, 51... SAW共振子、2, 12, 35, 52, 62... 水晶基板、3, 13, 53, 63... IDT、3a, 3b, 13a, 13b, 36a, 36b, 53a, 53b, 63a, 63b... 櫛歯状電極、4, 14, 37, 54, 64... 反射器、4a, 14a, 54a, 64a... 導体ストリップ、5... ウエーハ、5a... 面、6a, 6b, 15a, 15b, 55a, 55b, 65a, 65b... 電極指、7a, 7b, 16a, 16b... バスパワー、8, 17... 電極指間溝、9, 18... 導体ストリップ間溝、31... SAW発振器、33... IC、34... パッケージ、34a... 底板、38a～38f... 電極パッド、39a～39g... 電極パターン、40, 41... ボンディングワイヤ、42... リッド。

30

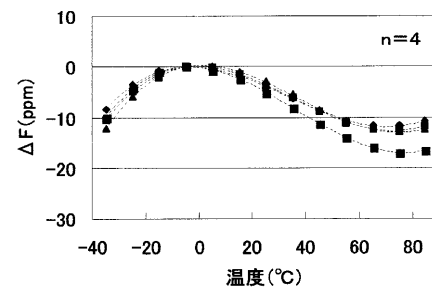
【図 1】



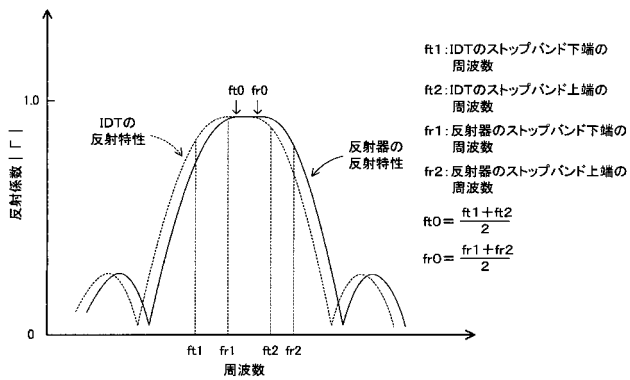
【図 2】



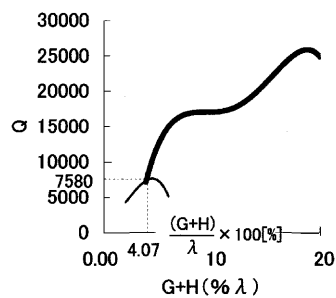
【図 3】



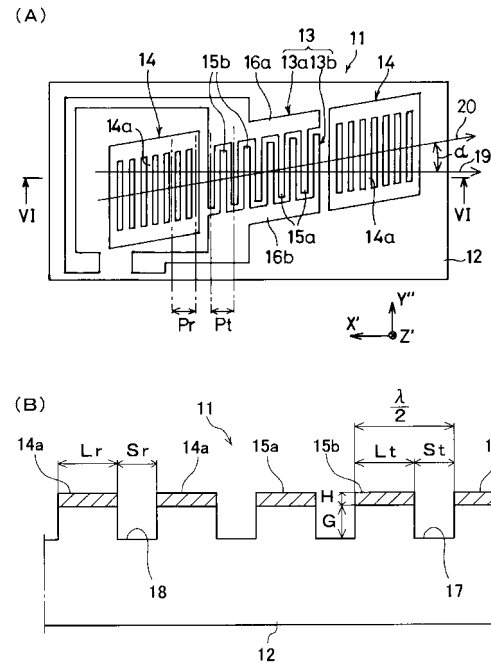
【図 4】



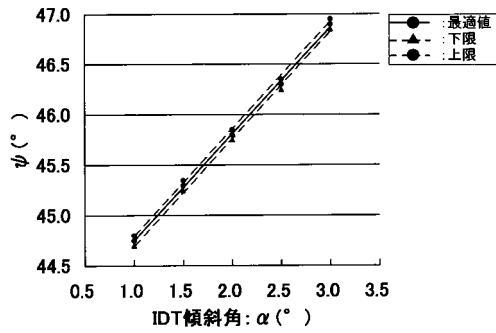
【図 5】



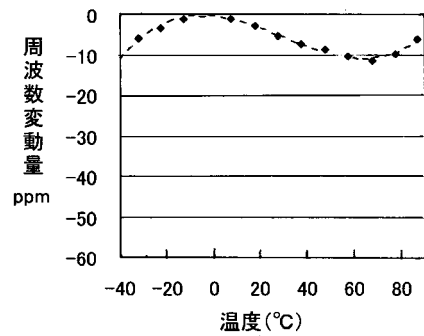
【図 6】



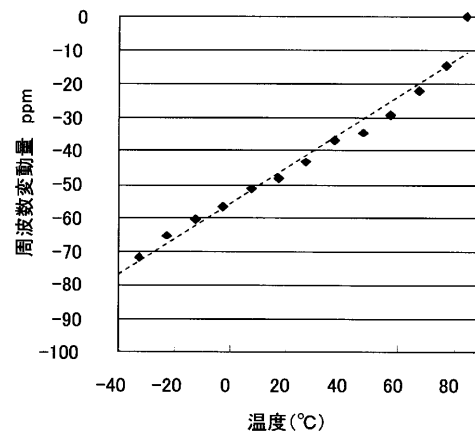
【図 7】



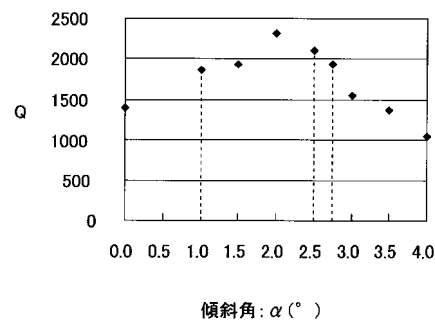
【図 8】



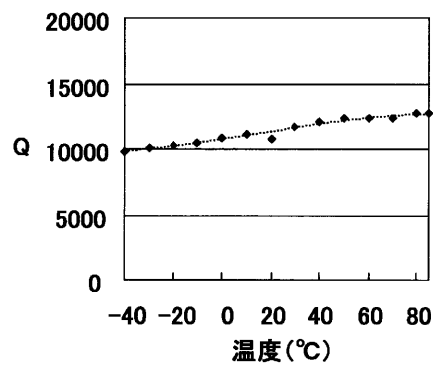
【図 9】



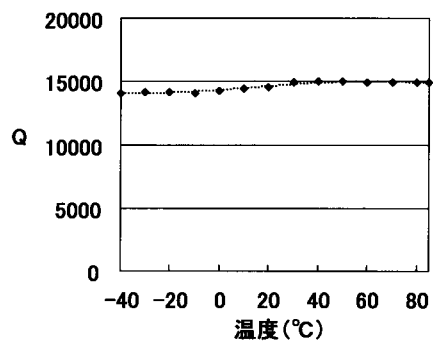
【図 10】



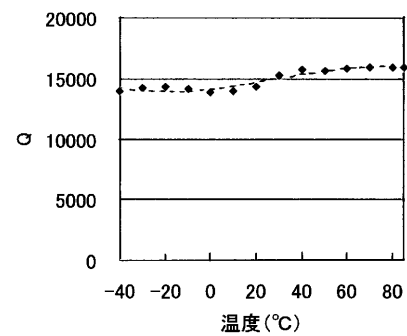
【図 11 - 1】



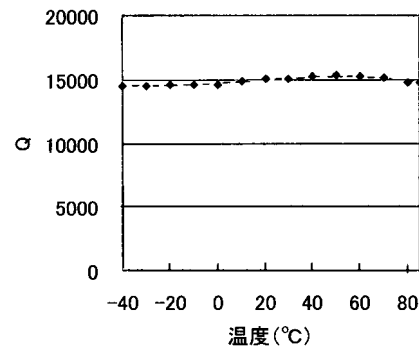
【図 11 - 2】



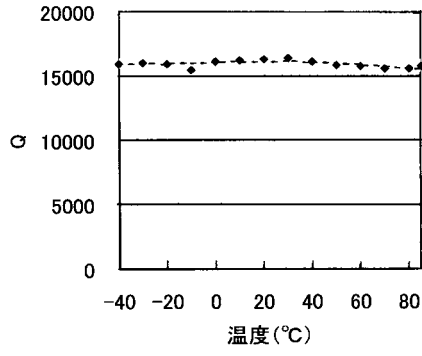
【図 11 - 3】



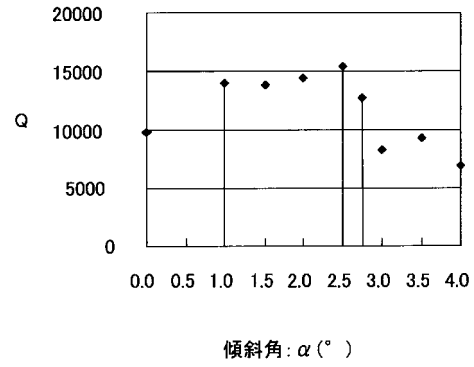
【図 11 - 4】



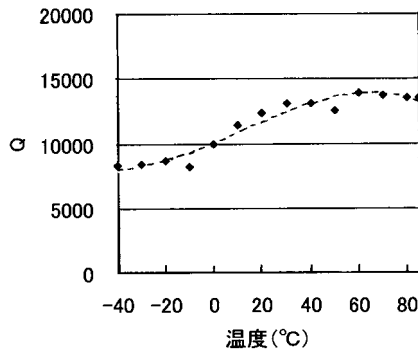
【図 1 1 - 5】



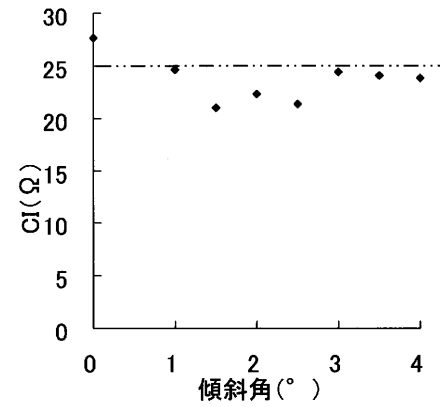
【図 1 2】



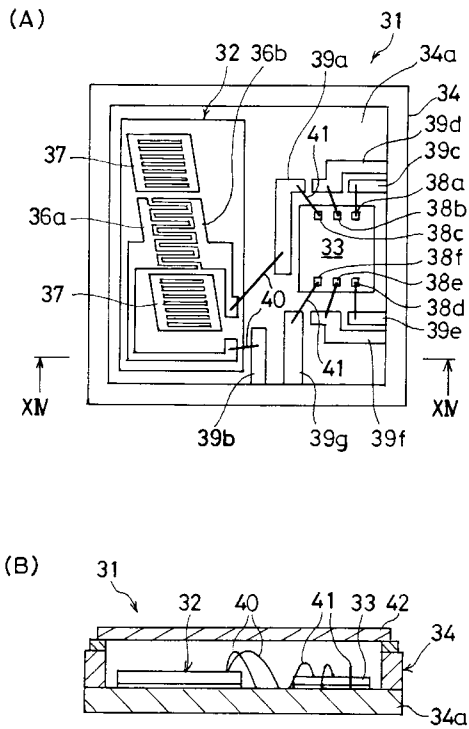
【図 1 1 - 6】



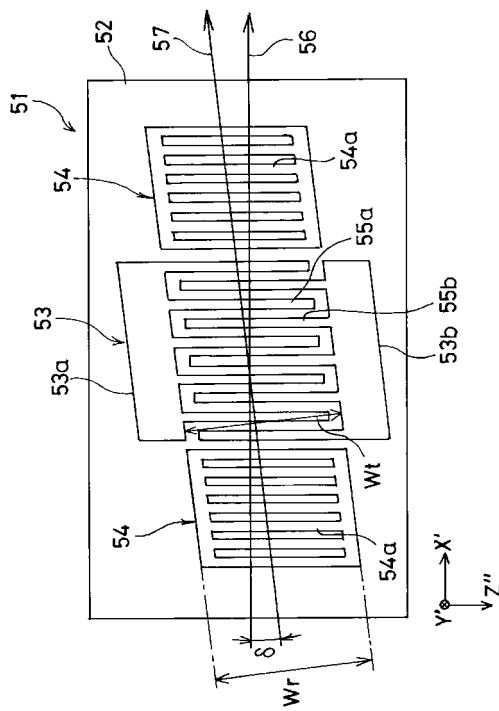
【図 1 3】



【図 1 4】



【図 1 5】



【図 16】

