

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5168930号
(P5168930)

(45) 発行日 平成25年3月27日 (2013. 3. 27)

(24) 登録日 平成25年1月11日 (2013. 1. 11)

(51) Int. Cl.

F I

H03H 9/02 (2006.01)

H03H 9/02 N

H03H 9/19 (2006.01)

H03H 9/19 J

H03H 9/215 (2006.01)

H03H 9/215

H03B 5/32 (2006.01)

H03B 5/32 A

請求項の数 4 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2007-34393 (P2007-34393)
 (22) 出願日 平成19年2月15日 (2007. 2. 15)
 (65) 公開番号 特開2008-199440 (P2008-199440A)
 (43) 公開日 平成20年8月28日 (2008. 8. 28)
 審査請求日 平成22年1月28日 (2010. 1. 28)

(73) 特許権者 000002369
 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 100095728
 弁理士 上柳 雅誉
 (74) 代理人 100127661
 弁理士 宮坂 一彦
 (72) 発明者 古畑 誠
 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコ
 ーエプソン株式会社内

審査官 橋本 和志

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 圧電振動子、発振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基部と、

前記基部から伸長し、励振電極が形成された振動腕と、を有し、

前記基部と前記振動腕との接続部付近の厚みと、前記振動腕の前記励振電極が形成され
 た電極形成部付近の厚みとが、前記振動腕の前記励振電極が形成されていない先端部付近
 の厚みと、前記基部の前記接続部付近以外の厚みよりも薄く、

前記振動腕の振動方向の幅は、前記先端部から前記接続部まで一定であることを特徴と
 する圧電振動子。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の圧電振動子において、

前記振動腕には、前記振動腕の振動方向に沿って、前記励振電極と隣り合うように圧電
 体層が形成され、

前記励振電極と、前記圧電体層とは、電氣的に接続されていることを特徴とする圧電振
 動子。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の圧電振動子において、

前記励振電極上には、バランス質量部が形成され、

前記励振電極の質量と前記バランス質量部の質量との和が、前記圧電体層の質量と等し
 いことを特徴とする圧電振動子。

【請求項 4】

請求項 1 ないし 3 のいずれか一項に記載の圧電振動子と、前記圧電振動子に接続される増幅回路と、を備えた発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、振動腕の先端部に設けられる付加質量部と、この付加質量部よりも厚さが薄いアーム部を有する小型の圧電振動子に関する。

【背景技術】

【0002】

一般に、電子機器等に搭載される時間標準や角速度センサ等のデバイスとして低周波の圧電振動子及び圧電共振子が用いられている。電子機器の小型化に対応してこれらの圧電振動子や圧電共振子の小型化が要求されている。

圧電振動子を単純に小型化していくと C I 値が上昇し Q 値が低下する。C I 値を上昇させない構造としては、圧電振動子の先端に付加質量部を設ける構造や振動片に圧電体膜を形成し、この圧電体膜を駆動する方法がある。

【0003】

圧電振動子や角速度センサの小型化手段としては、恒弾性材料またはシリコンからなる音叉型の振動子において、基部から平行に延出される振動腕が、連結部に近い幅広アーム部と、幅広アーム部から連続する幅狭アーム部と、幅狭アーム部の先端部に幅方向に広い質量部（付加質量部）を備え、連結部に駆動用圧電素子を設ける構造が知られている（例えば、特許文献 1 参照）。

【0004】

【特許文献 1】特開平 9 - 105634 号公報（第 3 頁、第 1 図）

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

このような特許文献 1 では、振動腕の先端部に質量部を付加し、同じ周波数ではアーム部（幅広アーム部と幅狭アーム部）を短くすることができる。しかしながら、圧電振動子を水晶のような単結晶圧電素子にする場合、単純に小型化していくと C I 値が上昇し Q 値が低下することによって発振抵抗が増大してしまい、その結果として小型化が困難であるという課題を有している。

【0006】

また、質量部が、アーム部の幅方向に広い方形をしているので、質量部を含むアーム部の振動範囲を考慮すれば、平面方向サイズの小型化に限界がある。

【0007】

また、駆動用圧電素子としては、一般に ZnO やチタン酸ジルコン酸塩等の圧電性材料を採用する。これらの圧電性材料は周波数温度変化量が大きい。従って、周波数温度変化量が小さい高精度な圧電振動子や角速度センサを実現することは困難である。

【0008】

本発明の目的は、消費電力が小さく周波数温度変化量が小さい小型で高精度な圧電振動子を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の圧電振動子は、基部と、該基部から平行に延在される少なくとも一対の振動腕と、を有する圧電振動片と、前記一対の振動腕それぞれが、先端部に設けられる付加質量部と該付加質量部よりも厚さが薄いアーム部と、励振電極と、を備えていることを特徴とする。また、ある実施形態では、基部と、前記基部から伸長し、励振電極が形成された振動腕と、を有し、前記基部と前記振動腕との接続部付近の厚みと、前記振動腕の前記励振電極が形成された電極形成部付近の厚みとが、前記振動腕の先端部付近の厚みよりも薄い

10

20

30

40

50

ことを特徴とする。また、前記振動腕の振動方向の幅は、前記先端部から前記接続部まで一定であることを特徴とする。また、前記励振電極と並列に圧電体層が形成されていることを特徴とする。また、前記電振動子と、前記圧電振動子に接続される増幅回路と、を備えた発振器であることを特徴とする。

【 0 0 1 0 】

この発明によれば、振動腕の先端部に付加質量部を備えることにより、同じ周波数帯域であれば、振動腕の長さを短くすることができる。また、付加質量部は、アーム部に対し厚さを厚くすることで付加質量とし、アーム部から幅方向に突出する部位がないため、平面形状においても小型化することができる。また、前記圧電振動子を用いれば、小型で且つ低消費電力の発振器を構成することができる。

10

【 0 0 1 1 】

また、前記アーム部が、前記一对の振動腕それぞれの表面または裏面のどちらか一方に穿設される凹部の底部によって形成されていることが好ましい。

【 0 0 1 2 】

このようにすれば、振動腕の表裏面のうちのどちらかに凹部を設けることにより厚さが薄いアーム部を形成するため、アーム部の厚さが一方向側からの加工（具体的には、ウエットエッチング法、ドライエッチング法、レーザ加工、機械加工等）により可能なので、高精度な厚さを得られるため、所望の周波数をつくり込むことができる。また、従来の振動腕の表面から周囲に側壁を残して掘り込む構造に比べて、側壁に影響される領域（加工上において影となる領域）がないので、励振電極や圧電体といった膜構造体を作成することが容易になる。

20

【 0 0 1 3 】

また、前記アーム部が、前記一对の振動腕それぞれの表裏両面に穿設される凹部の底部によって形成されていることが好ましい。

【 0 0 1 4 】

この発明のアーム部は、振動腕の表裏両面に凹部をウエットエッチング法、ドライエッチング法等の加工手段により形成する。つまり、アーム部は、付加質量部の厚さの中央部に形成される。従って、アーム部に対して付加質量部の厚さ方向の質量バランスがとれることから、振動腕に擦れ振動等の不要振動が発生しないという効果がある。

30

【 0 0 1 5 】

また、前記凹部が、前記振動腕の振動の節部を含む領域に形成されていることが望ましい。

【 0 0 1 6 】

前述したように、アーム部は、凹部により形成されるため、アーム部と基部との接続部の厚さに差が生じる。このような場合には、接続部に応力集中が発生し、振動腕の振動に悪影響を与えたり、耐衝撃性が劣化することが予測される。従って、凹部に振動腕の振動の節部（一对の振動腕の振動の結合部）の領域を含むことにより応力集中に関わる不具合を低減することができる。

【 0 0 1 7 】

また、前記圧電振動片が水晶からなることが好ましい。

40

水晶からなる圧電振動片は、他の圧電材料からなる圧電振動片よりも周波数温度特性が優れている。従って、水晶が本来有する優れた周波数温度特性を活用することができる。

【 0 0 1 8 】

また、前記アーム部が、前記励振電極と、表面または裏面または側面の少なくとも一つの面に設けられる圧電体薄膜と該圧電体薄膜の表面に形成される圧電体励振電極とを含む圧電体薄膜素子を有し、前記圧電振動片と前記圧電体薄膜素子とが直列接続されていることが好ましい。

【 0 0 1 9 】

このようにすれば、圧電振動片と圧電体薄膜からなる圧電体薄膜素子とを直列に接続し

50

、圧電振動片と圧電体薄膜素子とを同一励振信号で励振することから、圧電振動片と圧電体薄膜素子とが相互に振動を補完し合うことによってC I 値の低下を除去し、低周波領域において圧電振動子の小型化を実現できる。

【0020】

また、圧電振動片と圧電体薄膜素子とを直列に接続していることから、圧電振動片と圧電体薄膜素子との総合コンデンサ容量を小さくすることができ、このことから消費電力を増加させずに、圧電振動子の小型化を図ることができる。

【0021】

また、前記圧電体薄膜の表面に、前記圧電体薄膜の一次温度係数とは逆の一次温度係数を有する温度補償膜と、をさらに設けていることが好ましい。

10

【0022】

圧電体薄膜を形成する圧電体材料は周波数温度変化量が大きい。そのため、圧電振動子に圧電体薄膜を設けることで、圧電振動子の周波数温度変化量が大きくなってしまう。そこで、アーム部に設けられる圧電体薄膜の表面に、圧電体薄膜とは逆の一次温度係数を有する温度補償膜を設けることにより、圧電体薄膜の一次温度係数を打ち消しているので、圧電体薄膜を設けることによる圧電振動子の一次の周波数温度変化量への影響を低減することができ、圧電振動片を水晶にすれば、水晶が本来有する優れた周波数温度特性を活かすことができる。

【0023】

さらに、前記一對の振動腕それぞれが、前記圧電体薄膜素子に対するバランス質量を有することが好ましい。

20

【0024】

振動腕に圧電体薄膜、または圧電体薄膜と温度補償膜とを設けることで、振動腕それぞれの内部において、あるいは一對の振動腕間の振動のバランスが僅かではあるがくずれることが予測される。そこで、圧電体薄膜及び温度補償膜の質量に対応したバランス質量を付加することにより、振動腕の振動バランスをとり、高精度な振動特性を維持することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0025】

以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。

30

図1～図6は本発明の実施形態1に係る圧電振動子を示し、図7、8は実施形態2、図9、10は実施形態3、図11は実施形態4、図12～図15は実施形態5、図16、17は実施形態6、図18、19は実施形態7を示している。

なお、以下の説明で参照する図は、図示の便宜上、部材ないし部分の縦横の縮尺は実際のものとは異なる模式図である。

(実施形態1)

【0026】

図1は、本発明の実施形態1に係る圧電振動子の構造を示す斜視図、図2は、図1のA-A切断面を示す断面図及び各電極の接続説明図である。なお、本発明の圧電振動子の材質としては、圧電性を有するものであれば特に限定されずに適合できるが、以下の実施形態では、圧電振動子として周波数温度特性に優れる水晶振動子を例示して説明する。図1、図2において、水晶振動子10は、水晶振動片20の表面に複数の電極51～54、56～59と、圧電体薄膜素子100、101と、を有して構成されている。

40

【0027】

水晶振動片20は、基部21の一辺から、Y軸方向に平行に延在された一對の振動腕30、40を有した音叉型振動子である。振動腕30、40は、中心線C₀に対して対称形である。また、水晶振動片20は、結晶軸方向をX軸方向にして切り出されたZ板である。なお、本実施形態は、水晶振動片20を、厚さ方向がX軸のX板としても適合できる。

【0028】

振動腕30、40それぞれは、最上面22、23、24から凹部25、26を形成する

50

ことによって、アーム部 3 5 , 4 5 と付加質量部 3 6 , 4 6 とが形成される。図 1 では、付加質量部 3 6 , 4 6 の最上面 2 2 , 2 3 と基部 2 1 の最上面 2 4 とは同一平面である。

【 0 0 2 9 】

アーム部 3 5 , 4 5 は、凹部 2 5 , 2 6 の底部であって、付加質量部 3 6 , 4 6 よりも薄い振動部である。そして、アーム部 3 5 , 4 5 それぞれの裏面 3 2 , 4 2 は、付加質量部 3 6 , 4 6 及び基部 2 1 の裏面と同一平面内にある。

【 0 0 3 0 】

つまり、アーム部 3 5 , 4 5 は、水晶基板の上面側から凹部 2 5 , 2 6 を穿設することによって形成される。凹部 2 5 , 2 6 は、基部 2 1 とアーム部 3 5 , 4 5 との接続部から基部 2 1 の内側までの領域にわたって形成されている。これは、振動腕 3 0 , 4 0 の振動の節部の領域が接続部の基部 2 1 の内側に存在するため、この節部領域をアーム部 3 5 , 4 5 と同じ厚さの範囲として、接続部における応力集中を減じている。

【 0 0 3 1 】

なお、凹部 2 5 , 2 6 の形成方法としては、水晶振動片 2 0 が Z 板の場合には、ウエットエッチング法を採用し、X 板の際には、ドライエッチング法、レーザ加工、機械加工等を採用する。

【 0 0 3 2 】

アーム部 3 5 には、表面 3 1 を 2 分して、アーム部 3 5 の中心線 C_1 に対して結晶軸方向（振動腕の内側方向）に圧電体薄膜 7 1、外側方向に電極 5 1 が形成され、表面 3 1 に対向する裏面 3 2 に電極 5 3 が形成されている。なお、電極 5 3 は、圧電体薄膜 7 1 及び電極 5 1 にそれぞれ対向するように 2 分割する構成としてもよく、省略することもできる。

【 0 0 3 3 】

また、アーム部 3 5 の外側側面 3 3 には電極 5 2 が、内側側面 3 4 には電極 5 4 が形成されている。さらに、圧電体薄膜 7 1 の表面には圧電体励振電極 5 5（以降、単に電極 5 5 と表す）が形成されている。

【 0 0 3 4 】

アーム部 4 5 には、表面 4 1 を 2 分して、アーム部 4 5 の中心線 C_2 に対して結晶軸方向（振動腕の外側方向）に圧電体薄膜 7 2、内側方向に電極 5 6 が形成され、裏面 4 2 に電極 5 8 が形成されている。なお、電極 5 8 は、圧電体薄膜 7 2 及び電極 5 6 に対向するように 2 分割する構成としてもよく、省略してもよい。

【 0 0 3 5 】

また、アーム部 4 5 の外側側面 4 3 には電極 5 9 が、内側側面 4 4 には電極 5 7 が形成されている。さらに、圧電体薄膜 7 2 の表面には圧電体励振電極 6 0（以降、単に電極 6 0 と表す）が形成されている。

【 0 0 3 6 】

圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の材質としては、ZnO、AlN、GaN、PZT（登録商標）、KN、LN、LT 等から選択することができ、本実施形態では、水晶よりも誘電率が大きく、しかもその差が大きい材料、ヤング率が大きい材料、電気機械結合係数 K^2 が大きい材料を選択する。

【 0 0 3 7 】

電極 5 5 , 5 1 , 5 3 , 5 7 , 5 9 及び接続端子 9 3 は、接続電極 9 1 によって接続される。また、これらの電極とは互いに異極となる電極 5 2 , 5 4 , 5 8 , 6 0 , 5 6 及び接続端子 9 4 は、接続電極 9 2 によって接続されている。そして、接続端子 9 3 , 9 4 にそれぞれ互いに逆相の交流電圧を印加することで、振動腕 3 0 , 4 0 が X 軸方向に屈曲振動する。従って、電極 5 1 ~ 6 0 は、水晶振動片 2 0 の励振電極である。

【 0 0 3 8 】

図 3 は、水晶振動子を特定の振動モードで励振する発振回路に接続した状態を示す等価回路図である。図 3 において、発振器 8 0 は、増幅回路 8 1 と帰還回路 8 2 とを含んでいる。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 9 】

増幅回路 8 1 は、増幅器 8 3 と帰還抵抗 8 4 とを含んで構成されている。帰還回路 8 2 は、ドレイン抵抗 8 5 とコンデンサ 8 6 , 8 7 と水晶振動子 1 0 を含んで構成されている。水晶振動子 1 0 は、水晶振動片 2 0 と圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 とが直列に接続されている(図 2 も参照する)。

【 0 0 4 0 】

ここで、増幅器 8 3 は C M O S インバータを用いることができる。このような構成により、水晶振動片 2 0 と圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 とが同一振動モードで振動する発振器 8 0 を形成することができる。

【 0 0 4 1 】

続いて、本実施形態に係る水晶振動子の駆動について図面を参照して説明する。

図 4 は、水晶振動子の駆動について模式的に示す説明図である。なお、図 4 (a) は、図 1 の A - A 切断面に相当する形状を表している。

図 4 (a) を参照して第 1 の状態を説明する。電極 5 1 , 5 3 , 5 5 , 5 7 , 5 9 にはマイナス (-) 電位を印加し、電極 5 2 , 5 4 , 5 6 , 5 8 , 6 0 にはプラス (+) 電位を印加する。ここで、振動腕 3 0 , 4 0 の水晶の結晶軸方向を矢印 D で表し、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の分極方向を矢印 P_0 で表している。

【 0 0 4 2 】

まず、アーム部 3 5 について説明すると、圧電体薄膜 7 1 は、電極 5 5 と電極 5 4 によって挟まれた(水晶を一部介在する)圧電体薄膜素子 1 0 0 が形成された状態であり、電極 5 5 にマイナス電位、電極 5 4 にプラス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に縮み、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に伸びる。

【 0 0 4 3 】

従って、圧電体薄膜素子 1 0 0 は、水晶の結晶軸方向の偏った位置に設けられているために、アーム部 3 5 を矢印 F_1 方向に変位しようとする。アーム部 3 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると矢印 E 方向に電界が発生し、やはり矢印 F_1 方向に変位しようとするため、振動腕 3 0 は圧電体薄膜素子 1 0 0 と共に、矢印 F_1 方向に変位する。

【 0 0 4 4 】

次に、アーム部 4 5 について説明する。圧電体薄膜 7 2 は、電極 6 0 と電極 5 9 によって挟まれた(水晶を一部介在する)圧電体薄膜素子 1 0 1 が形成された状態であり、電極 6 0 にプラス電位、電極 5 9 にマイナス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に伸び、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に縮む。

【 0 0 4 5 】

従って、圧電体薄膜素子 1 0 1 は、水晶の結晶軸方向の偏った位置に設けられているために、アーム部 4 5 を矢印 F_2 方向に変位しようとする。アーム部 4 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると矢印 E 方向に電界が発生し、やはり矢印 F_2 方向に変位しようとするため、振動腕 4 0 は圧電体薄膜素子 1 0 1 と共に、矢印 F_2 方向に変位する。

このようにして、振動腕 3 0 , 4 0 (アーム部 3 5 , 4 5) は共に、図 4 (b) に示すように外側方向 (矢印 F_1 , F_2 方向) に変位する。

【 0 0 4 6 】

次に、図 5 (a) , (b) を参照して第 2 の状態を説明する。第 2 の状態は、上述した第 1 の状態に対して、各電極に逆相の電圧を印加した状態を示している。つまり、電極 5 1 , 5 3 , 5 5 , 5 7 , 5 9 にはプラス (+) 電位を印加し、電極 5 2 , 5 4 , 5 6 , 5 8 , 6 0 にはマイナス (-) 電位を印加する。

【 0 0 4 7 】

まず、アーム部 3 5 について説明する。電極 5 5 にプラス電位、電極 5 4 にマイナス電位を印加すると、圧電体薄膜 7 1 は厚さ (Z 軸) 方向に伸び、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に縮む。

【 0 0 4 8 】

なお、アーム部 3 5 , 4 5 は、水晶振動片 2 0 の最上面 2 2 ~ 2 4 側に設ける構造とし

10

20

30

40

50

てもよく、この場合、裏面側から凹部を穿設する。

【 0 0 4 9 】

従って、圧電体薄膜素子 1 0 0 は、アーム部 3 5 を矢印 F_3 方向に変位しようとする。アーム部 3 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると第 1 の状態（図 4（a）、参照）とは逆方向に電界が発生し、やはり矢印 F_3 方向に変位しようとするため、振動腕 3 0 は圧電体薄膜素子 1 0 0 と共に、矢印 F_3 方向に変位する。

【 0 0 5 0 】

次に、アーム部 4 5 について説明する。電極 6 0 にマイナス電位、電極 5 9 にプラス電位を印加すると、圧電体薄膜 7 2 は厚さ（Z 軸）方向に縮み、幅（X 軸）方向及び長さ（Y 軸）方向に伸びる。従って、圧電体薄膜素子 1 0 1 は、矢印 F_4 方向に変位しようとする。アーム部 4 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると第 1 の状態（図 4（a）、参照）とは逆方向に電界が発生し、やはり矢印 F_4 方向に変位しようとするため、振動腕 4 0 は圧電体薄膜素子 1 0 1 と共に、矢印 F_4 方向に変位する。

【 0 0 5 1 】

上述した第 1 の状態と第 2 の状態を繰り返す（つまり、交流電圧を印加する）と振動腕 3 0 , 4 0 は、X 軸方向に屈曲振動を繰り返す。

【 0 0 5 2 】

なお、上述した実施形態 1 では、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 をアーム部 3 5 , 4 5 のそれぞれの表面 3 1 , 4 1 に設ける構造を例示したが、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 を、裏面 3 2 , 4 2 それぞれに形成する構造としてもよい。この際、電極 5 1 と電極 5 3 、電極 5 6 と電極 5 8 とを入れ替える構成とする。

【 0 0 5 3 】

ここで、発振回路における消費電力に影響を与える水晶振動子 1 0 のコンデンサ容量について考察する。水晶振動子 1 0 の総コンデンサ容量 C は、誘電体の面積 S 、厚さ（電極間距離） d 、誘電率 ϵ とすれば、 $C = \epsilon \cdot S / d$ で表される。圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の誘電率 ϵ_z 、水晶の誘電率 ϵ_q の関係は、それぞれの材料を ϵ_z , ϵ_q 、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の厚さ d_z と水晶振動片 2 0 の厚さ d_q の関係を、 $d_q = d_z$ となるように設定している。従って、水晶振動片 2 0 のコンデンサ容量 C_q と圧電体薄膜 7 1 , 7 2 のコンデンサ容量 C_z の関係は、 $C_z = C_q$ となる。

【 0 0 5 4 】

本実施形態では、発振器 8 0 の等価回路において、水晶振動片 2 0 と圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 とを直列に接続している。従って、水晶振動子 1 0 の総コンデンサ容量 C は、 $1 / C = 1 / C_q + 1 / C_z$ で表される。ここで、 $C_z = C_q$ としているため、 $C = C_q$ と考えることができる。このことから、水晶振動子 1 0 の総コンデンサ容量 C を小さくすることができ、消費電力を増加させずに、水晶振動子の小型化を実現できる。

【 0 0 5 5 】

続いて、振動腕 3 0 , 4 0 の先端部に付加質量を設けることの意味について説明する。

図 6 は、水晶振動片の形状及びサイズについて模式的に表す平面図である。図 6 において、（a）は、従来の標準的な低周波（32 KHz）の水晶振動片 2 0 を例示している。振動腕 3 0 , 4 0 の長さ L_1 は 2 2 8 0 μm 、振動腕 3 0 , 4 0 の幅 D_1 は 2 1 7 μm 、厚さは 1 0 0 μm である。また、振動腕 3 0 , 4 0 には、ZnO からなる圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 が設けられている。圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 を構成する圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の厚さは 1 μm である。

【 0 0 5 6 】

この水晶振動片 2 0 の振動のしやすさを表す性能指数 Ma は、 $Ma = K^2 \cdot Q$ で表される。なお、 Q は Q 値であって、ここでは $Q = 7 5 0 0 0$ であり、性能指数 $Ma = 4 0$ が導き出される。

【 0 0 5 7 】

（b）に、（a）に示す標準的な水晶振動片 2 0 を周波数を同じにして単純に小型化した例を示している。（b）における振動腕 3 0 , 4 0 の長さ L_2 は 8 0 0 μm 、幅 D_2 は

10

20

30

40

50

27 μm 、厚さ100 μm とし、ZnOからなる圧電体薄膜素子100, 101が設けられている。なお、 $Q = 30000$ とすると、(b)に示す水晶振動片20の性能指数Mbは、 $Mb = 13$ で表される。

【0058】

(a)と(b)で表される水晶振動子の性能指数を比較すると、 $Ma > Mb$ となり、単純に小型化すると性能指数は約1/3となるため、実使用には向かないことを示している。

【0059】

次に、(b)で表されるサイズで、薄いアーム部35, 45と付加質量部36, 46とが設けられる本実施形態による水晶振動子について説明する。

図6(c)は、本実施形態による水晶振動子を示している。アーム部35, 45の長さ L_2 を800 μm 、幅 D_2 を27 μm 、厚さを100 μm とし、ZnOからなる圧電体薄膜素子100, 101が設けられている。圧電体薄膜素子100, 101の厚さは1 μm である。 $Q = 30000$ とすると、(c)に示す水晶振動片20の性能指数Mcは、 $Mc = 64$ で表される。

【0060】

図6(a)、図6(b)、図6(c)に示す各水晶振動子の性能指数を比較すると $Mc > Ma > Mb$ となり、水晶振動子を小型化しても性能指数Mcが従来の標準サイズ(図6(a)に示す)の性能指数Maよりも大きくなり、振動しやすいことを示している。

【0061】

従って、前述した実施形態1によれば、振動腕30, 40(つまり、アーム部35, 45)の先端部に付加質量部36, 46を備え、アーム部35, 45を薄くすることにより、同じ周波数帯域であれば、振動腕30, 40の長さを短くすることができる。また、付加質量部36, 46は、アーム部35, 45に対し厚さを厚くすることで付加質量としており、アーム部35, 45から幅方向に突出する部位がないため、平面形状においても小型化することができる。

【0062】

また、アーム部35, 45が、振動腕30, 40それぞれの表面31, 41または裏面32, 42のどちらか一方に設けられる凹部25, 26の底部によって形成している。従って、アーム部35, 45の厚さが一方向側からの加工(具体的には、ウェットエッチング法、ドライエッチング法、レーザ加工、機械加工等)により精度よく加工できるので、高精度な周波数のつくり込みができる。

【0063】

また、アーム部35, 45は、凹部25, 26により形成するため、アーム部35, 45と基部21との接続部の厚さに差が生じるが、凹部25, 26が振動の節部を含む領域の範囲にわたっていることにより応力集中による振動への影響や、耐衝撃性の劣化を低減することができる。

【0064】

また、本実施形態では、圧電振動片として水晶振動子を採用している。水晶振動子は、他の圧電性材料からなる圧電振動子よりも周波数温度特性に優れているという特長を有している。

【0065】

また、圧電体薄膜素子100, 101と水晶振動片20とを直列に接続し、水晶振動片20と圧電体薄膜素子100, 101とを同一励振信号で励振することから、水晶振動片20と圧電体薄膜素子100, 101とが相互に振動を補完し合うことによって、低周波領域において水晶振動子の小型化を実現できる。

【0066】

また、水晶振動片20と圧電体薄膜素子100, 101とを直列に接続していることから、水晶振動子10のコンデンサ容量を小さくすることができ、このことから消費電力を増加させずに、水晶振動子の小型化を図ることができる。

【 0 0 6 7 】

さらに、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 の電気機械結合係数 K^2 を、水晶振動片 2 0 の電気機械結合係数よりも大きく設定している。従って、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 の電気機械結合係数を水晶よりも大きくすることで、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 の性能指数 M が高く、振動しやすくなるので、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 により水晶振動片 2 0 の振動を高効率化することができる。

(実施形態 2)

【 0 0 6 8 】

続いて、本発明に係る実施形態 2 について図面を参照して説明する。実施形態 2 は、アーム部の表裏両面それぞれに圧電体薄膜素子を形成しているところに特徴を有している。

図 7 は、実施形態 2 に係る水晶振動子の構成を示す断面図及び各電極の接続説明図である。図 7 において、アーム部 3 5 の裏面 3 2 には、圧電体薄膜素子 1 0 0 に対向して圧電体薄膜素子 1 0 2 が形成されている。

【 0 0 6 9 】

圧電体薄膜素子 1 0 2 の構成は、圧電体薄膜素子 1 0 0 と同じであり、アーム部 3 5 の裏面 3 2 から圧電体薄膜 7 3、圧電体励振電極 6 1 (以降、単に電極 6 1 と表す) の順に積層形成され、電極 5 1 に対向して電極 5 3 が形成されている。従って、圧電体薄膜 7 3 は、電極 6 1 , 5 4 によって挟まれた圧電体薄膜素子 1 0 2 を構成する。

【 0 0 7 0 】

一方、アーム部 4 5 の裏面 4 2 には、圧電体薄膜素子 1 0 1 に対向して圧電体薄膜素子 1 0 3 が形成され、電極 5 6 に対向して電極 5 8 が形成されている。従って、圧電体薄膜 7 4 は、圧電体励振電極 6 2 (以降、単に電極 6 2 と表す)、電極 5 9 によって挟まれた圧電体薄膜素子 1 0 3 を構成する。

なお、圧電体薄膜 7 1 ~ 7 4 は実施形態 1 と同様な材料であり、厚さ、平面形状も同じとする。

【 0 0 7 1 】

次に、水晶振動子 1 0 の駆動について説明する。

図 8 は、水晶振動子の駆動について模式的に示す説明図である。なお、図 8 (a) は、図 1 の A - A 切断面に相当する位置を表している。図 8 において、電極 5 1 , 5 3 , 5 5 , 5 7 , 5 9 , 6 1 にはマイナス (-) 電位を印加し、電極 5 2 , 5 4 , 5 8 , 6 2 , 6 0 , 5 6 にはプラス (+) 電位を印加する。

【 0 0 7 2 】

まず、アーム部 3 5 について説明する。圧電体薄膜 7 1 , 7 3 は、電極 5 5 , 6 1 にマイナス電位、電極 5 4 にプラス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に縮み、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に伸びる。

【 0 0 7 3 】

従って、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 は、アーム部 3 5 の水晶の結晶軸方向に偏った位置に設けられていることから、それぞれ同じようにアーム部 3 5 を矢印 F_1 方向に変位しようとする。アーム部 3 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると矢印 E 方向に電界が発生し、やはり矢印 F_1 方向に変位しようとするため、振動腕 3 0 は圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 と共に、矢印 F_1 方向に変位する。

【 0 0 7 4 】

次に、アーム部 4 5 について説明する。圧電体薄膜 7 2 は、電極 6 0 にプラス電位、電極 5 9 にマイナス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に伸び、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に縮む。

【 0 0 7 5 】

また、圧電体薄膜 7 4 は、電極 5 9 にマイナス電位、電極 6 2 にプラス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に伸び、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に縮む。

【 0 0 7 6 】

従って、圧電体薄膜素子 101, 103 は、アーム部 45 の水晶の結晶軸方向に偏った位置に設けられていることから、それぞれ同じようにアーム部 45 を矢印 F_2 方向に変位しようとする。アーム部 45 は、電極それぞれに電圧を印加すると矢印 E 方向に電界が発生し、やはり矢印 F_2 方向に変位しようとするため、振動腕 40 は圧電体薄膜素子 101, 103 と共に、矢印 F_2 方向に変位する。

このようにして、振動腕 30, 40 は、図 8 (b) に示すように外側方向 (矢印 F_1 , F_2 方向) に変位する。

【0077】

次に、図 7, 8 で示した状態に対して各電極に逆相の電位を印加した場合について説明する。図示は省略するが、電極 52, 54, 58, 62, 60, 56 にはマイナス電位、電極 51, 53, 61, 55, 57, 59 にはプラス電位の電圧を印加する。こうすることで、圧電体薄膜 71 ~ 74 の伸縮方向が図 8 に表す状態とは逆方向となり、アーム部 35, 45 は図 8 (a) にて表す矢印 F_3 , F_4 方向に変位する。

従って、接続端子 93, 94 に交流電圧を印加することで、振動腕 30, 40 は図 8 (b) に表すように X 軸方向に屈曲振動を継続する。

【0078】

従って、上述したように、アーム部 35, 45 それぞれの表裏両面に圧電体薄膜 71, 73、及び圧電体薄膜 72, 74 を設けることにより、水晶振動片 20 と圧電体薄膜素子 100 ~ 103 とが、より一層強く相互に振動を補完し合うことができる。また、表面、裏面のどちらか一方に圧電体薄膜を形成する実施形態 1 の場合よりも振動バランスをとることができる。 (実施形態 3)

【0079】

次に、本発明の実施形態 3 について図面を参照して説明する。実施形態 3 は、前述した実施形態 2 に対して、アーム部の側面にも圧電体薄膜素子を設けていることに特徴を有している。従って、実施形態 2 との相違部分を中心に説明し、共通部位には実施形態 2 と同じ符号を附している。

図 9 は、実施形態 3 に係る水晶振動子の構成を示す断面図及び各電極の接続説明図である。図 9 において、アーム部 35 の外側側面 33 には、圧電体薄膜素子 104 が形成されている。

【0080】

圧電体薄膜素子 104 の構成は、圧電体薄膜素子 100 ~ 103 と同じであり、アーム部 35 の外側側面 33 から圧電体薄膜 75、圧電体励振電極 63 (以降、単に電極 63 と表す) の順に積層形成されている。従って、圧電体薄膜 75 は、電極 63 と電極 51, 53 によって挟まれた圧電体薄膜素子 104 を構成する。

【0081】

一方、アーム部 45 の内側側面 44 には、圧電体薄膜素子 105 が形成されている。圧電体薄膜素子 105 の構成は、圧電体薄膜素子 104 と同じであり、アーム部 45 の内側側面 44 から圧電体薄膜 76、圧電体励振電極 64 (以降、単に電極 64 と表す) の順に積層形成されている。従って、圧電体薄膜 76 は、電極 64 と電極 56, 58 によって挟まれた圧電体薄膜素子 105 を構成する。

なお、圧電体薄膜 71 ~ 76 は実施形態 1、実施形態 2 と同様な材料とし、厚さ、平面形状も同じとする。

【0082】

次に、水晶振動片 20 の駆動について説明する。

図 10 は、水晶振動子の駆動について模式的に示す説明図である。図 10 (a) において、電極 51, 53, 55, 61, 59, 64 にはマイナス (-) 電位を印加し、電極 54, 63, 58, 62, 60, 56 にはプラス (+) 電位を印加する。

【0083】

まず、アーム部 35 について説明すると、圧電体薄膜 71, 73 の伸縮は、前述した実

10

20

30

40

50

施形態 3 と同じであり、厚さ (Z 軸) 方向に縮み、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に伸びる。

【 0 0 8 4 】

また、圧電体薄膜 7 5 は、電極 5 1 , 5 3 にマイナス電位、電極 6 3 にプラス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に縮み、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に伸びる。

【 0 0 8 5 】

従って、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 , 1 0 4 は、アーム部 3 5 を矢印 F_1 方向に変位しようとする。アーム部 3 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると矢印 E 方向に電界が発生し、やはり矢印 F_1 方向に変位しようとするため、振動腕 3 0 は圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 , 1 0 4 と共に、矢印 F_1 方向に変位する。

10

【 0 0 8 6 】

次に、アーム部 4 5 について説明する。圧電体薄膜 7 2 , 7 4 の伸縮は、前述した実施形態 3 と同じであり、厚さ (Z 軸) 方向に伸び、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に縮む。

【 0 0 8 7 】

また、圧電体薄膜 7 6 は、電極 6 4 にマイナス電位、電極 5 6 , 5 8 にプラス電位を印加すると厚さ (Z 軸) 方向に伸び、幅 (X 軸) 方向及び長さ (Y 軸) 方向に縮む。

【 0 0 8 8 】

従って、圧電体薄膜素子 1 0 1 , 1 0 3 , 1 0 5 は、アーム部 4 5 を矢印 F_2 方向に変位しようとする。アーム部 4 5 は、電極それぞれに電圧を印加すると矢印 E 方向に電界が発生し、やはり矢印 F_2 方向に変位しようとするため、振動腕 4 0 は圧電体薄膜素子 1 0 1 , 1 0 3 , 1 0 5 と共に、矢印 F_2 方向に変位する。

20

このようにして、振動腕 3 0 , 4 0 は、図 1 0 (b) に示すように外側方向 (矢印 F_1 , F_2 方向) に変位する。

【 0 0 8 9 】

次に、図 1 0 (a) で示した状態に対して各電極に逆相の電位を印加する。図示は省略するが、電極 5 1 , 5 3 , 6 1 , 5 5 , 5 9 , 6 4 にはプラス電位、電極 5 4 , 6 3 , 5 6 , 5 8 , 6 2 , 6 0 にはマイナス電位の電圧を印加する。こうすることで、圧電体薄膜 7 1 ~ 7 6 の伸縮方向が図 1 0 (a) に表す方向とは逆方向となり、アーム部 3 5 , 4 5 は矢印 F_3 , F_4 方向に変位する。

30

従って、接続端子 9 3 , 9 4 に交流電圧を印加することで、振動腕 3 0 , 4 0 は図 1 0 (b) に示すように X 軸方向に屈曲振動を継続する。

【 0 0 9 0 】

従って、上述した実施形態 3 によれば、水晶の厚さ方向 (Z 軸方向、アーム部 3 5 , 4 5 の側面) にも圧電体薄膜 7 5 , 7 6 を設けることにより、さらに強く相互に振動を補完し合うことができ、水晶振動子 1 0 の振動効率を高めることができる。

(実施形態 4)

【 0 0 9 1 】

続いて、本発明の実施形態 4 について図面を参照して説明する。前述した実施形態 1 , では圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 、実施形態 2 では圧電体薄膜素子 1 0 0 ~ 1 0 3 、実施形態 3 では圧電体薄膜素子 1 0 0 ~ 1 0 5 をそれぞれ備えている。

40

【 0 0 9 2 】

しかしながら、圧電体薄膜素子を設けることにより、水晶振動片 2 0 の中心線 C_0 に対して振動腕 3 0 と振動腕 4 0 との質量バランス、あるいは、振動腕 3 0 , 4 0 それぞれの中心線 C_1 , C_2 に対する質量バランスがくずれることがある。そのことによって僅かであるが振動バランスがくずれることが考えられる。実施形態 4 では、そのような課題を解決するためにバランス質量を付加することを特徴としている。なお、実施形態 1 ~ 実施形態 3 と同じ部位には同じ符号を附している。また、バランス質量としては、圧電体薄膜と同材質のものを採用する。

【 0 0 9 3 】

50

図 1 1 (a) ~ (c) は、実施形態 4 に係る水晶振動子を示す断面図である。

図 1 1 (a) は、前述した実施形態 1 (図 2、参照) にて説明した構造に対してバランス質量を付加した例を示している。図 1 1 (a) において、アーム部 3 5 には、中心線 C_1 に対して圧電体薄膜素子 1 0 0 と対称となるバランス質量 7 7 a が設けられている。つまり、バランス質量 7 7 a は、電極 5 5 と圧電体薄膜 7 1 の質量総和が、バランス質量 7 7 a と電極 5 1 の質量総和と等しい。従って、振動腕 3 0 内において中心線 C_1 に対して質量バランスがとれる。

【 0 0 9 4 】

アーム部 4 5 においても同様に、バランス質量 7 7 b を設けることにより、付加されたバランス質量 7 7 b と電極 5 6 との積層体の質量総和は、圧電体薄膜 7 2 と電極 6 0 の積層体の質量総和と等しく中心線 C_2 に対して対称となり、振動腕 4 0 内において質量バランスがとれている。

【 0 0 9 5 】

このように、バランス質量 7 7 a , 7 7 b を設けることにより、振動腕 3 0 , 4 0 が、中心線 C_0 に対しても質量バランスがとれ、振動バランスをとることができる。

【 0 0 9 6 】

図 1 1 (b) は、前述した実施形態 2 (図 7、参照) に対してバランス質量を付加した例を示している。実施形態 2 は、振動腕 3 0 , 4 0 の表裏両面それぞれに、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2、圧電体薄膜素子 1 0 1 , 1 0 3 が設けられている構造である。図 1 1 (b) では、アーム部 3 5 には中心線 C_1 に対して圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 に対称なバランス質量 7 7 a , 7 8 a を設け、アーム部 4 5 には中心線 C_2 に対して圧電体薄膜素子 1 0 1 , 1 0 3 に対称となるバランス質量 7 7 b , 7 8 b を設けている。

【 0 0 9 7 】

このようにバランス質量 7 7 a , 7 7 b 及びバランス質量 7 8 a , 7 8 b を設けることにより、アーム部 3 5 及びアーム部 4 5 内において中心線 C_1 , C_2 に対して質量バランスがとれると共に、中心線 C_0 に対して振動腕 3 0 と振動腕 4 0 との質量バランスがとれ、そのことにより振動バランスがとれる。

【 0 0 9 8 】

図 1 1 (c) は、前述した実施形態 3 (図 9、参照) に対してバランス質量を付加した例を示している。実施形態 3 は、振動腕 3 0 の表裏両面と側面それぞれに圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 , 1 0 4 が設けられている構造である。図 1 1 (c) では、アーム部 3 5 には中心線 C_1 に対して圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 2 , 1 0 4 それぞれに対称なバランス質量 7 7 a , 7 8 a , 7 9 a を設ける。

【 0 0 9 9 】

また、アーム部 4 5 の表裏両面と側面それぞれには、圧電体薄膜素子 1 0 1 , 1 0 3 , 1 0 5 が設けられている構造であるので、中心線 C_2 に対して圧電体薄膜素子 1 0 1 , 1 0 3 , 1 0 5 それぞれに対称なバランス質量 7 7 b , 7 8 b , 7 9 b を設けている。

【 0 1 0 0 】

このようにバランス質量 7 7 a , 7 7 b 及びバランス質量 7 8 a , 7 8 b 及びバランス質量 7 9 a , 7 9 b を設けることにより、アーム部 3 5 及びアーム部 4 5 内において中心線 C_1 , C_2 に対する質量バランスがとれると共に、中心線 C_0 に対して振動腕 3 0 と振動腕 4 0 との質量バランスがとれ、そのことにより振動バランスがとれる。

【 0 1 0 1 】

従って、上述した実施形態 4 によれば、圧電体薄膜素子 1 0 0 ~ 1 0 5 それぞれに対応したバランス質量 7 7 a , 7 7 b , 7 8 a , 7 8 b , 7 9 a , 7 9 b を付加することにより、振動腕 3 0 , 4 0 の振動バランスをとり、高精度な振動特性を得ることができる。

また、バランス質量を圧電体薄膜と同材質で形成すれば、圧電体薄膜と同じ装置でバランス質量を構成することができるので、高精度のバランス質量を付加することができる。

(実施形態 5)

【 0 1 0 2 】

10

20

30

40

50

続いて、本発明に係る実施形態 5 について図面を参照して説明する。実施形態 5 は、前述した実施形態 1 ~ 実施形態 4 に設けられる圧電体薄膜の上面に温度補償膜を設けていることに特徴を有している。温度補償膜の構成と機能を中心に説明する。実施形態 1 にて説明した水晶振動子を基本とする構造を例示して説明する。

図 1 2 は、実施形態 5 に係る水晶振動子の構造及び駆動について模式的に示す説明図である。なお、図 1 2 は、図 1 の A - A 切断面に相当する形状を表している。

【 0 1 0 3 】

図 1 2 (a) において、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の上面それぞれには、電極 5 5 , 6 0 が設けられ、電極 5 5 , 6 0 の上面それぞれには、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 が設けられている。従って、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 は、電気的にはフローティングの状態であり、圧電体薄膜素子 1 0 0 , 1 0 1 の構成は、前述した実施形態 1 (図 2、参照) と同じである。

10

【 0 1 0 4 】

また、図 1 2 (a) は、各電極 5 1 ~ 6 0 それぞれに図に示すような電位の電圧を因果した第 1 の状態を示しており、アーム部 3 5 , 4 5 それぞれは、実施形態 1 (図 4、参照) と同じ方向 (矢印 F_1 , F_2 方向) に変位する。

【 0 1 0 5 】

また、図 1 2 (a) に示す第 1 の状態とは逆相の電圧を印加した第 2 の状態の場合は、振動腕 3 0 , 4 0 それぞれは、実施形態 1 (図 5、参照) と同様な方向 (矢印 F_3 , F_4 方向) に変位する。

20

従って、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 を設ける本実施形態の構造であっても、図 1 2 (b) に示すように X 軸方向に屈曲振動を継続する。

【 0 1 0 6 】

続いて、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 について説明する。

図 1 3 は、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 の温度と一次の周波数温度変化量との関係、つまり、一次温度係数を模式的に表すグラフである。ここで、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の一次温度係数は負の傾き (具体的には -40 ppm / deg) を有している。従って、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 の一次温度係数を正の傾き (具体的には $+40 \text{ ppm / deg}$) にすれば、圧電体薄膜の温度に対する一次の周波数温度変化量 f_d / f_{00} にすることが可能となる。

30

【 0 1 0 7 】

次に、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の一次温度係数が水晶振動子に与える影響について説明する。

図 1 4 は、水晶振動子の温度変化に対する周波数変化量 (周波数温度特性) を模式的に表すグラフである。図 1 4 において、水晶振動子 1 0 の周波数温度特性 (図中、実線で表す) は、頂点温度 T_0 とする二次曲線で表される。ここで、水晶振動子 1 0 に圧電体薄膜 7 1 , 7 2 を付加したときに、周波数温度特性は、頂点温度 T_0 がマイナス方向に移動して頂点温度 T_1 を有する二次曲線 (図中、破線で表す) で表される。従って、本来の水晶振動子周波数温度特性 (頂点温度 T_0 の二次曲線) に補償する必要が生じ、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 を設ける。なお、温度補償膜の一次温度係数は、材質とその膜厚さによって変化する。

40

【 0 1 0 8 】

図 1 5 は、水晶振動片 2 0 に温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 を設けたときの温度補償膜の膜厚さ h と一次の周波数温度変化量 df / f の関係を表すグラフである。ここでは、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 の材質を酸化シリコン (SiO_2) とする。図 1 5 において、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 の膜厚さ h が増加するに従い一次の周波数温度変化量 df / f が増加する。従って、一次の周波数温度変化量が “ 0 ” となる膜厚さ h (具体的には 550 nm 近傍) とすれば、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の一次温度係数の影響を排除することができ、図 1 4 に示す頂点温度 T_0 の周波数温度特性を得ることができる。

【 0 1 0 9 】

50

本実施形態では、圧電振動片として水晶振動子を採用し、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の表面に、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 とは逆の一次温度係数を有する温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 を設けることによって、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の一次温度係数を打ち消すため、水晶振動片 2 0 の振動を補完するために設ける圧電体薄膜 7 1 , 7 2 を有する構造であっても、水晶振動子 1 0 が本来有する優れた周波数温度特性を活用することができる。

(実施形態 6)

【 0 1 1 0 】

続いて、本発明の実施形態 6 に係る水晶振動子について図面を参照して説明する。実施形態 6 は、前述した実施形態 5 に対して、温度補償膜を圧電体薄膜と電極との間に設けることを特徴としている。従って、相違部分を中心に説明し、実施形態 1 と同じ符号を附して説明する。

10

図 1 6 は、実施形態 6 に係る水晶振動子の断面図（図 1 の A - A 切断面に相当する）及び各電極の接続説明図である。図 1 6 において、アーム部 3 5 の表面 3 1 には圧電体薄膜 7 1、圧電体薄膜 7 1 の表面に温度補償膜 1 1 0、温度補償膜 1 1 0 の上面に電極 5 5 が設けられている。

【 0 1 1 1 】

従って、圧電体薄膜 7 1 と温度補償膜 1 1 0 とは積層された状態でアーム部 3 5 の一部を介在して電極 5 5 と電極 5 4 との間に挟まれた圧電体薄膜素子 1 0 0 を構成している。

【 0 1 1 2 】

また、アーム部 4 5 の表面 4 1 には圧電体薄膜 7 2、圧電体薄膜 7 2 の表面に温度補償膜 1 1 1、温度補償膜 1 1 1 の上面に電極 6 0 が設けられている。

20

【 0 1 1 3 】

従って、圧電体薄膜 7 2 と温度補償膜 1 1 1 とは積層された状態でアーム部 4 5 の一部を介在して電極 6 0 と電極 5 9 との間に挟まれた圧電体薄膜素子 1 0 1 を構成している。

【 0 1 1 4 】

なお、電極 5 1 ~ 6 0 及び接続端子 9 3 , 9 4 の接続は、前述した実施形態 1 と同様に行われており、接続端子 9 3 , 9 4 に交流電圧を印加することで、振動腕 3 0 , 4 0 が屈曲振動する。

【 0 1 1 5 】

次に、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 それぞれが電極 5 5 , 6 0 と圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の間に設けられる実施形態 6 の構成による温度補償について説明する。このような構成においても温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 の一次温度係数は、材質とその膜厚さによって変化する。

30

【 0 1 1 6 】

図 1 7 は、水晶振動片 2 0 に温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 を設けたときの温度補償膜の膜厚さ h と一次の周波数温度変化量 df/f の関係を表すグラフである。ここでは、温度補償膜 1 1 0 の材質を酸化シリコン (SiO_2) とする。なお、実施形態 5 の構成との比較を表している。図 1 7 において、温度補償膜 1 1 0 , 1 1 1 の膜厚さ h が増加するに従い一次の周波数温度変化量が増加する。

【 0 1 1 7 】

ここで、実施形態 6 の構成（上層から電極 - 温度補償膜 - 圧電体薄膜の構成）では、実施形態 5 の構成（上層から温度補償膜 - 電極 - 圧電体薄膜の構成）よりも、膜厚さ h に対して一次の周波数温度変化量 df/f が敏感に変化する。そして、一次の周波数温度変化量が “ 0 ” となる膜厚さ h （具体的には 5 0 nm 近傍）とすれば、圧電体薄膜 7 1 , 7 2 の一次温度係数の影響を排除することができることを示している。

40

【 0 1 1 8 】

図 1 7 を参照して実施形態 5 と実施形態 6 の構成による特性の相違を比較する。実施形態 5 によれば、膜厚さ h に対して一次の周波数温度変化量 df/f が鈍感であり、膜厚さ h が変化しても一次の周波数温度変化量 df/f が小さいので、量産安定性に優れるという特長がある。

50

【0119】

また、実施形態6によれば、膜厚さ h に対して一次の周波数温度変化量 df/f が敏感であり、膜厚さ h も50nmと薄くてよい。従って、成膜時間が短縮できる他、成膜による膜応力も小さくて済むため、圧電振動片の反り等の変形が発生しにくいという効果がある。

【0120】

また、実施形態5及び実施形態6による構造では共に温度補償膜110、111の膜厚さ h を増減することで、図17に示すように、一次の周波数温度変化量 df/f （つまり、一次温度係数）を調整することができる。

【0121】

なお、実施形態5及び実施形態6は、前述した実施形態1にて説明した水晶振動子を基本とする構造を例示して説明したが、実施形態2及び実施形態3による水晶振動子の基本構造にも温度補償膜を設ける構造が適合できる。また、実施形態4に示したようなバランス質量を付加する構造にも適合できる。

【0122】

続いて、本発明の水晶振動子の製造方法について説明する。図1、2を参照する。まず、大判の圧電基板としての水晶基板（水晶ウエハと称することがある）に、フォトリソグラフィ技術によって複数の水晶振動片20を形成する。この際、水晶振動片20の基部21の一部を水晶基板に接続しておく。次に、凹部25、26を穿設してアーム部35、45を形成する。

【0123】

続いて、圧電体薄膜71、72を形成する。アーム部35、45それぞれの表面31、41の所定位置に第1圧電体薄膜を形成する。第1圧電体薄膜の形成方法は、RFスパッタリング法等のPVD（Physical Vapor Deposition）法であってもよいし、CVD（Chemical Vapor Deposition）法であってもよい。また、第1圧電体薄膜の厚さは、5nm～100nmが好ましい。

【0124】

続いて、第1圧電体薄膜の熱処理を行い、熱処理後の第1圧電体薄膜を形成する。熱処理は、ランプ加熱、レーザ光加熱であってもよいが、400℃以下での熱処理は、温度管理ができ温度を低温から上昇できる熱処理方法が好ましい。具体的には、より安定した温度管理ができる熱処理炉、ホットプレート、真空チャンバ中での熱処理が好ましい。熱処理後の第1圧電体薄膜は結晶化が進んだ状態である。

【0125】

続いて、熱処理後の第1圧電体薄膜上に第2圧電体薄膜を形成する。第2圧電体薄膜は、結晶化が進んだ熱処理後の第1圧電体薄膜上において結晶生長する材料であればどのような圧電体薄膜でもよいが、本実施形態では、第1圧電体薄膜と同じ材料を採用している。

【0126】

第2圧電体薄膜も、PVD法、CVD法等で形成することが可能で、その厚さは数 μm である。この第2圧電体薄膜は、熱処理後の第1圧電体薄膜を含めて圧電体薄膜71、72となる。

【0127】

このようにして圧電体薄膜71、72を形成した後、電極51～60を形成する。圧電体薄膜71、72それぞれの上面に形成する電極55、60も他の電極と同時形成してもよいし、別工程で形成してもよい。

【0128】

電極51～60を形成した後、水晶基板をダイシング等で切断して、水晶振動子10を切り離し個片化して、水晶振動子を形成する。

【0129】

なお、圧電体薄膜71、72の形成方法としては、アーム部35、45それぞれの表面

10

20

30

40

50

31, 41に金属薄膜を形成した後、圧電体薄膜を形成する方法がある。金属薄膜としては、PtまたはTiを単層で、あるいは、PtとTiを積層したうえで、圧電体薄膜71, 72を形成する。金属薄膜を設けることにより、圧電体薄膜が良好な結晶性を有する。

【0130】

また、実施形態5の水晶振動子は、上述した圧電体薄膜71, 72の上面の電極51, 60を形成した後に、温度補償膜110, 111を形成する工程を追加する。

【0131】

また、実施形態6の水晶振動子は、圧電体薄膜71, 72の上面に温度補償膜110, 111を形成した後、その上面に電極51, 60を形成する工程とすればよい。

【0132】

なお、実施形態5及び実施形態6の温度補償膜110, 111は、チャンバ内でPVD法またはCVD法等の成膜法で形成する。この成膜工程の際、チャンバ内に周波数計測モニタを備え、一次温度係数をモニタしながら、一次の周波数温度変化量が“0”になる膜厚さhに調整する。

【0133】

または、予め膜厚さhを所定の厚さよりも厚く形成しておき、温度補償膜の表面をエッチング等により研削して一次の周波数温度変化量 df/f が“0”になる膜厚さhを得る方法としてもよい。

【0134】

圧電体薄膜71, 72の振動特性は、圧電体薄膜の結晶性が良好なほどよい。第1圧電体薄膜を形成し、この第1圧電体薄膜を熱処理した後、熱処理された第1圧電体薄膜の表面に、第1圧電体薄膜と同一材料の第2圧電体薄膜を形成して結晶性を改善している。その結果、優れた振動性能を得ることができる。

【0135】

また、水晶基板の表面にPtまたはTiの少なくとも一方の金属薄膜を形成し、この金属薄膜の表面に圧電体薄膜71, 72を形成することで、圧電体薄膜71, 72の結晶性を高めることができる他、圧電体薄膜71, 72と水晶振動片20との密着性を高めることができるという効果がある。

【0136】

また、温度補償膜110, 111の成膜工程の際、チャンバ内に周波数計測モニタを備え、チャンバ内にて一次温度係数をモニタしながら、一次の周波数温度変化量 df/f が“0”になる膜厚さhを得る方法により、生産性が高い水晶振動子を実現できる。

(実施形態7)

【0137】

続いて、本発明の実施形態7に係る水晶振動子について図面を参照して説明する。実施形態7は、アーム部を水晶振動片の厚さ方向の中央部に設けたことを特徴としている。圧電体薄膜71, 72と電極51~60の構成は、実施形態1(図1, 2、参照)を基本構造としているため、相違点を中心に説明する。実施形態1と同じ部位には同じ符号を附している。

図18は、実施形態7に係る水晶振動子の斜視図、図19は、図18のB-B切断面を示す断面図である。図18, 19において、水晶振動子10は、水晶振動片20の最上面及び最下面両方から凹部を穿設して、水晶振動片20の厚さ方向の中央部に凹部の底部からなるアーム部35, 45が形成される。

【0138】

そして、アーム部35, 45それぞれの表面31, 41に圧電体薄膜71, 72が設けられるとともに、表面31, 41、裏面32, 42、内側側面34, 44、外側側面33, 43、圧電体薄膜71, 72の上面それぞれに電極51~60が設けられている。つまり、アーム部35, 45の厚さ方向の形状以外の構成は、実施形態1と同じ構成である。

【0139】

なお、本実施形態は、前述した実施形態2~実施形態6にて説明した圧電体薄膜の構成

10

20

30

40

50

、温度補償膜の構成、質量バランスの構成それぞれに適合させることができる。また、各電極の接続構造も同じであるため、実施形態 1 ~ 実施形態 6 と同様な屈曲振動を行う。

また、アーム部 35, 45 の厚さは、実施形態 1 ~ 実施形態 6 と同じ厚さとしている。

【0140】

従って、実施形態 7 によれば、基部 21 及び付加質量部 36, 46 の厚さの中央に形成される。このことから、アーム部 35, 45 に対して付加質量部 36, 46 の厚さ方向の質量バランスがとれることから、振動腕に擦れ振動等の不要振動が発生しない。また、実施形態 5 (図 11、参照) のようにバランス質量を付加することで平面方向においても質量バランス (つまり、振動バランス) がとれるので、安定した振動を継続することができる。

10

【0141】

なお、本発明は前述の実施の形態に限定されるものではなく、本発明の目的を達成できる範囲での変形、改良等は本発明に含まれるものである。

前述した実施形態 1 では、圧電体薄膜 71, 72 をアーム部 35, 45 のそれぞれの表面 31, 41 に形成する構造、及び圧電体薄膜 71, 72 を裏面 32, 42 に形成する構造を説明したが、アーム部 35, 45 の表面 31 に圧電体薄膜 71 を形成し、振動腕 40 の裏面 42 に圧電体薄膜 72 を形成してもよく、その逆にしてもよい。

【0142】

また、付加するバランス質量は圧電体薄膜と同材質を用いているが、バランス質量は、中心線 C_0 , C_1 , C_2 に対して質量バランス (つまり振動バランス) がとれれば、同材質でなくてもよく、圧電体でなくてもよい。

20

【0143】

また、温度補償膜は、各圧電体薄膜に対応して設ける構造を例示して説明したが、温度補償膜は、配設される圧電体薄膜の一部に設ける構造としてもよい。

【0144】

また、実施形態 1 ~ 実施形態 7 では、付加質量部 36, 46 と基部 21 を同じ厚さにしているが、例えば、付加質量部 36, 46 をアーム部 35, 45 よりも厚く、基部よりも薄い範囲で、所望の振動特性が得られる厚さを選択することができる。さらに、アーム部の厚さを基部全体の厚さとしてもよい。

また、実施形態 7 では、アーム部 35, 45 を付加質量部 36, 46 (または、基部 21) の厚さ方向の中央部に設けているが、アーム部 35, 45 は、表面側または裏面側の偏った位置に配設しても、本発明の目的を達することができる。

30

【0145】

また、振動片に励振電極を設けずに、前述した圧電体薄膜素子の表裏に圧電体励振電極を形成し、圧電体薄膜素子にて振動片を駆動する構造も採用できる。このような場合、コンデンサ容量が増加し消費電流が増加することが考えられるが、入力電圧を高くすることで駆動することができる。

【0146】

従って、前述した実施形態 1 ~ 実施形態 7 によれば、水晶振動片にアーム部と、その先端にアーム部よりも厚い付加質量を設け、アーム部に圧電体薄膜素子を設けることにより水晶振動子の小型化と低消費電力化を実現し、さらに温度補償膜を設けることにより、周波数温度変化量が小さい高精度の水晶振動子を提供できる。

40

【図面の簡単な説明】

【0147】

【図 1】本発明の実施形態 1 に係る圧電振動子の構造を示す斜視図。

【図 2】図 1 の A - A 切断面を示す断面図及び各電極の接続説明図。

【図 3】本発明の実施形態 1 に係る水晶振動子を特定の振動モードで励振する発振回路に接続した状態を示す等価回路図。

【図 4】本発明の実施形態 1 に係る水晶振動子の駆動 (第 1 の状態) について模式的に示す説明図。

50

【図 5】本発明の実施形態 1 に係る水晶振動子の駆動（第 2 の状態）について模式的に示す説明図。

【図 6】本発明の実施形態 1 に係る水晶振動片の形状及びサイズについて模式的に表す平面図。

【図 7】本発明の実施形態 2 に係る水晶振動子の構成を示す断面図及び各電極の接続説明図。

【図 8】本発明の実施形態 2 に係る水晶振動子の駆動について模式的に示す説明図。

【図 9】本発明の実施形態 3 に係る水晶振動子の構成を示す断面図及び各電極の接続説明図。

【図 10】本発明の実施形態 3 に係る水晶振動子の駆動について模式的に示す説明図。

10

【図 11】本発明の実施形態 4 に係る水晶振動子を示す断面図。

【図 12】本発明の実施形態 5 に係る水晶振動子の構造及び駆動について模式的に示す説明図。

【図 13】本発明の実施形態 5 に係る温度補償膜の温度と一次の周波数温度変化量との関係を模式的に表すグラフ。

【図 14】本発明の実施形態 5 に係る水晶振動子の温度変化に対する周波数変化量（周波数温度特性）を模式的に表すグラフ。

【図 15】本発明の実施形態 5 に係る水晶振動片に温度補償膜を設けたときの温度補償膜の膜厚さと一次の周波数温度変化量の関係を表すグラフ。

【図 16】本発明の実施形態 6 に係る水晶振動子の断面図及び各電極の接続説明図。

20

【図 17】本発明の実施形態 6 に係る水晶振動片に温度補償膜を設けたときの温度補償膜の膜厚さと一次の周波数温度変化量の関係を表すグラフ。

【図 18】本発明の実施形態 7 に係る水晶振動子を示す斜視図。

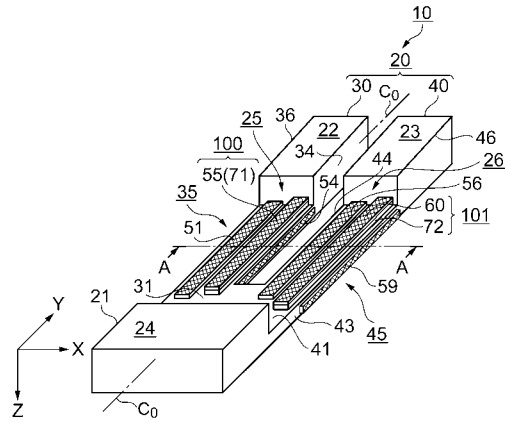
【図 19】本発明の実施形態 7 に係る水晶振動子を示す断面図。

【符号の説明】

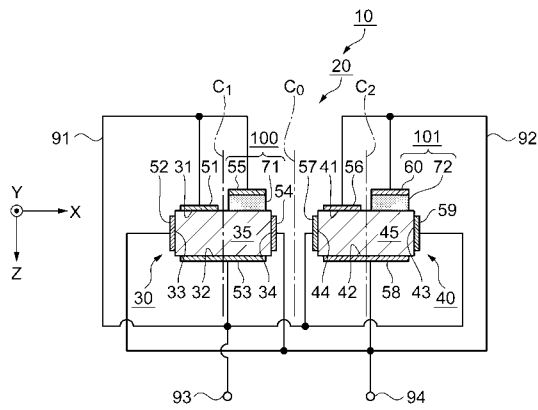
【0148】

10 ... 水晶振動子、20 ... 水晶振動片、21 ... 基部、30, 40 ... 振動腕、31, 41 ... アーム部の表面、35, 45 ... アーム部、36, 46 ... 付加質量部、51 ~ 60 ... 電極、71, 72 ... 圧電体薄膜、100, 101 ... 圧電体薄膜素子。

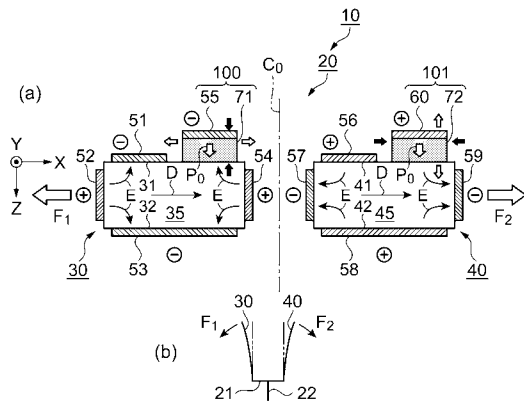
【図 1】



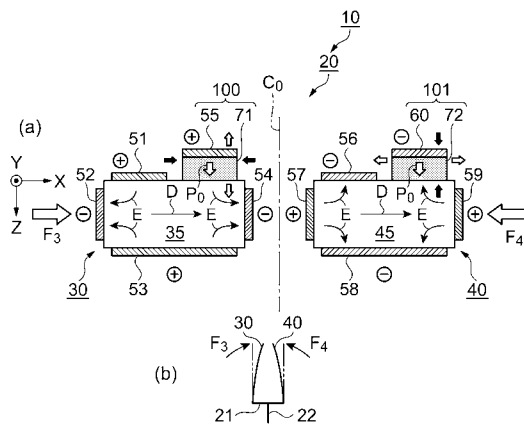
【図 2】



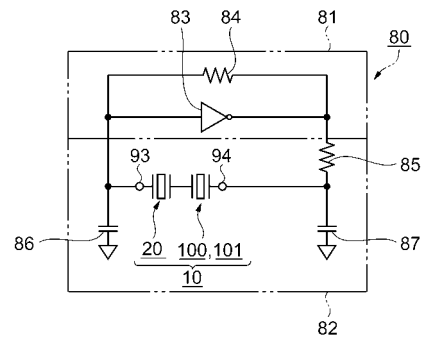
【図 4】



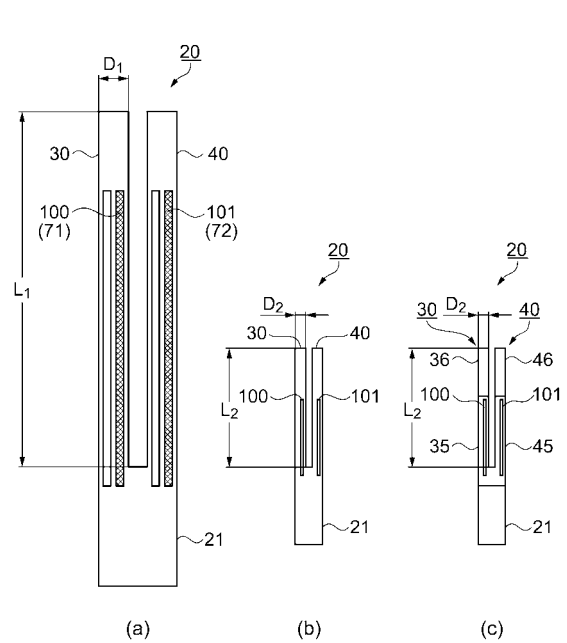
【図 5】



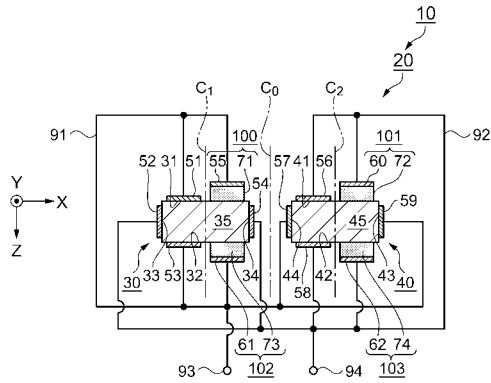
【図 3】



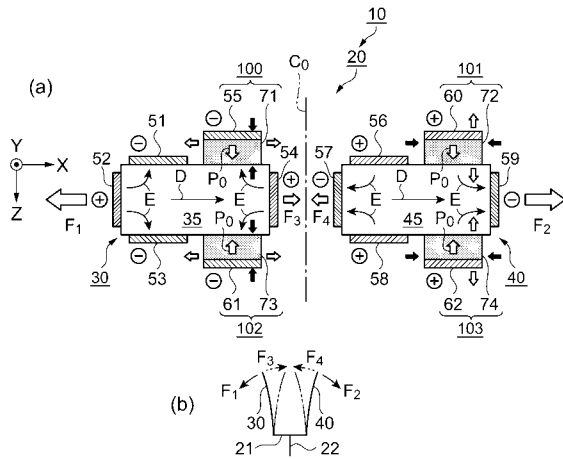
【図 6】



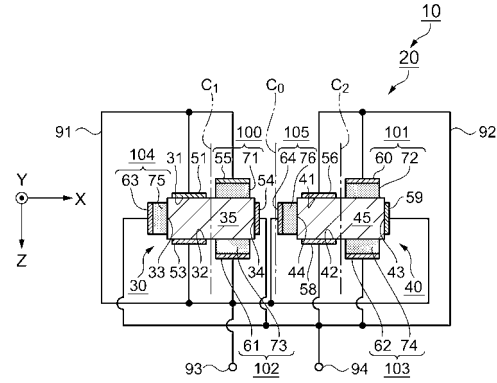
【図 7】



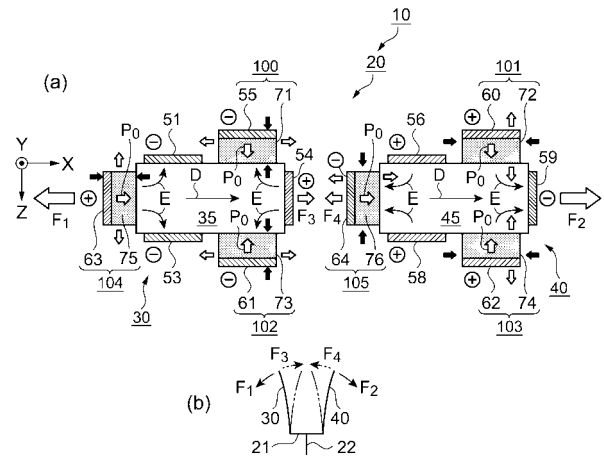
【図 8】



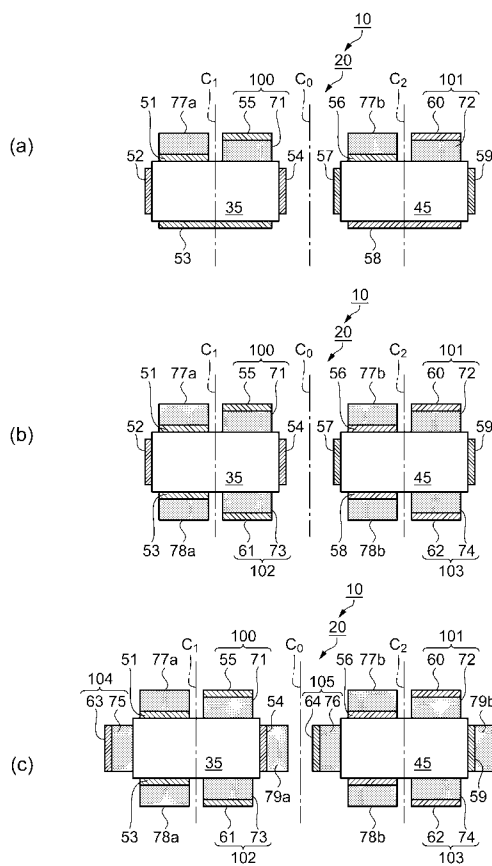
【図 9】



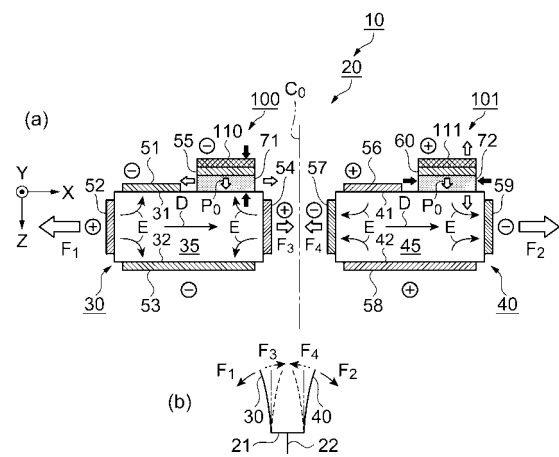
【図 10】



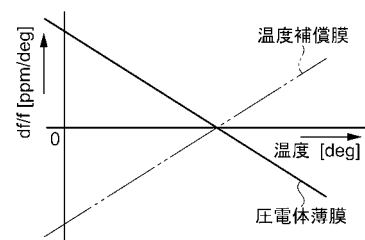
【図 11】



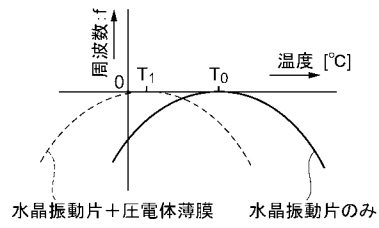
【図 12】



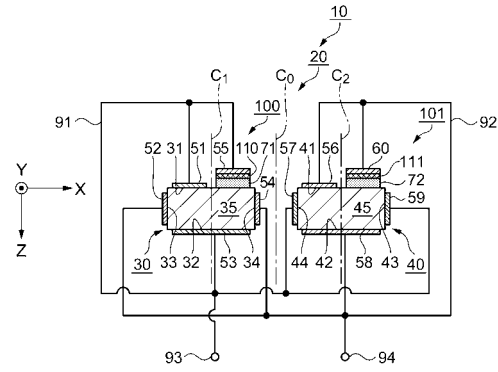
【図 13】



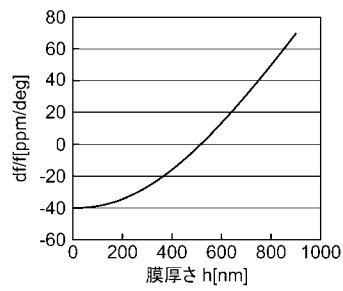
【図 14】



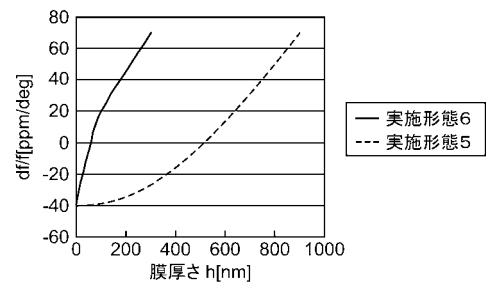
【図 16】



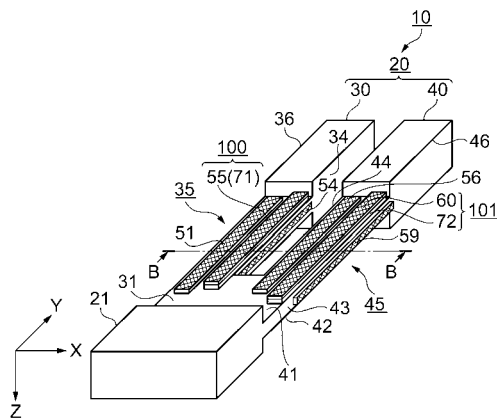
【図 15】



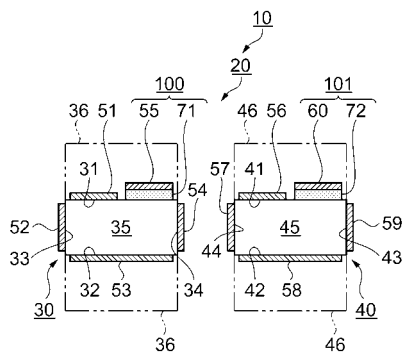
【図 17】



【図 18】



【図 19】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2005-150992(JP,A)
特開昭58-053215(JP,A)
特開2003-347885(JP,A)
実開昭54-078477(JP,U)
特開昭55-049020(JP,A)
実開昭56-099929(JP,U)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H03H3/007-H03H3/10
H03H9/00-9/76
H03B5/32