

(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2015-97368

(P2015-97368A)

(43) 公開日 平成27年5月21日(2015.5.21)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H03H 9/10 (2006.01)	H03H 9/10	5J079
H03H 9/02 (2006.01)	H03H 9/02	K 5J108
H03B 5/32 (2006.01)	H03B 5/32	H
H03H 9/19 (2006.01)	H03H 9/19	J
H03H 9/215 (2006.01)	H03H 9/215	

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 34 頁)

(21) 出願番号 特願2013-237480 (P2013-237480)
 (22) 出願日 平成25年11月16日 (2013.11.16)

(71) 出願人 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 100091292
 弁理士 増田 達哉
 (74) 代理人 100091627
 弁理士 朝比 一夫
 (72) 発明者 山田 明法
 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
 (72) 発明者 山崎 隆
 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
 Fターム(参考) 5J079 AA02 AA04 BA39 FA01 HA03
 HA07 HA09 HA22 JA01 JA02
 最終頁に続く

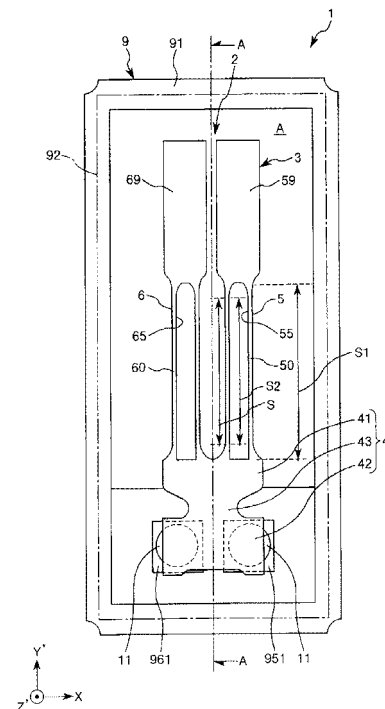
(54) 【発明の名称】 振動子、発振器、電子機器および移動体

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 振動素子に加わる空気抵抗に起因したQ値の劣化を低減することができ、優れた振動特性を発揮することができる振動子、及びこの振動子を備える発振器、電子機器および移動体を提供する。

【解決手段】 振動子1は、パッケージ9と、パッケージ9内に收容され、屈曲振動モードで振動する振動素子2と、を含み、パッケージ9内の気圧は、100Pa以下である。また、振動素子2は、基部4と、基部4と一体的に設けられ、基部から延出している一対の振動腕5、6と、を含み、振動腕5、6は、錘部59、69と、錘部59、69と基部4との間に設けられている腕部50、60と、を含む。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

パッケージと、
前記パッケージ内に收容され、屈曲振動モードで振動する振動素子と、
を含み、
前記パッケージ内の気圧は、 100 Pa 以下であることを特徴とする振動子。

【請求項 2】

前記パッケージ内の気圧は、 10 Pa 以下である請求項 1 に記載の振動子。

【請求項 3】

前記パッケージ内の気圧は、 7×10^{-4} 以上である請求項 1 または 2 に記載の振動子 10

【請求項 4】

前記振動素子は、
基部と、
前記基部から延出されている一对の振動腕と、
を含む請求項 1 ないし 3 のうちのいずれか 1 項に記載の振動子。

【請求項 5】

前記振動腕は、
錘部と、
前記錘部と前記基部との間に設けられている腕部と、を含む請求項 1 ないし 4 のうちの 20
いずれか 1 項に記載の振動子。

【請求項 6】

前記振動腕は、前記振動腕の前記第 1 方向に沿った長さを L 、
前記錘部の前記第 1 方向に沿った長さを H としたとき、
 $0.183 \leq H/L \leq 0.597$
なる関係を満足している請求項 1 ないし 5 のうちのいずれか 1 項に記載の振動子。

【請求項 7】

前記振動腕は、前記振動腕の前記第 1 の方向に沿った長さを L 、
前記錘部の前記第 1 の方向に沿った長さを H としたとき、
 $0.012 < H/L < 0.30$ 30
なる関係を満足している請求項 1 ないし 5 のうちのいずれか 1 項に記載の振動子。

【請求項 8】

請求項 1 ないし 7 のいずれか 1 項に記載の振動子と、
回路と、
を備えていることを特徴とする発振器。

【請求項 9】

請求項 1 ないし 7 のいずれか 1 項に記載の振動子を備えていることを特徴とする電子機
器。

【請求項 10】

請求項 1 ないし 7 のいずれか 1 項に記載の振動子を備えていることを特徴とする移動体 40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、振動子、発振器、電子機器および移動体に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来から、パッケージ内に振動素子を收容してなる振動子が知られており、圧電発振器、電子機器等の多方面で使用されている。このような振動子としては、例えば、音叉型の振動素子とパッケージとを有し、振動素子が導電性接着剤を介してパッケージに取り付け 50

られてなる振動子が知られている（例えば、特許文献 1 ～ 3 参照）。

また、例えば、特許文献 1 ～ 3 には、容器内に配置したゲッター材によって、酸素を吸収することにより真空度を改善することが記載されている。

しかしながら、このような従来の振動子では、パッケージ内の真空度を改善する手法が記載されているものの、どの程度の真空度にすればよいか開示されておらず、パッケージ内に収容された振動素子に加わる空気抵抗により、Q 値の高い振動素子を得ることができなかった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】WO2010/023729 号公報

【特許文献 2】WO2010/023728 号公報

【特許文献 3】WO2009/101733 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本発明の目的は、振動素子に加わる空気抵抗に起因した Q 値の劣化を低減することができ、優れた振動特性を発揮することができる振動子を提供すること、また、この振動子を備える発振器、電子機器および移動体を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明は、上述の課題の少なくとも一部を解決するためになされたものであり、以下の適用例として実現することが可能である。

[適用例 1]

本発明の振動子は、パッケージと、
前記パッケージ内に収容され、屈曲振動モードで振動する振動素子と、
を含み、

前記パッケージ内の気圧は、100Pa 以下であることを特徴とする。

これにより、振動素子に加わる空気抵抗に起因した Q 値の劣化を低減することができ、Q 値を向上させることができる。その結果、優れた振動特性を発揮することができる振動子を提供することができる。

【0006】

[適用例 2]

本発明の振動子では、前記パッケージ内の気圧は、10Pa 以下であることが好ましい。

これにより、振動素子に加わる空気抵抗に起因した Q 値の劣化を、より低減することができ、より優れた振動特性を発揮することができる振動子を提供することができる。

【0007】

[適用例 3]

本発明の振動子では、前記パッケージ内の気圧は、 7×10^{-4} 以上であることが好ましい。

これにより、パッケージ内とパッケージ外との気圧の違いにより生じるパッケージの不本意な反りや撓み、およびこれらに起因するクラック発生等を抑制することもできる。

[適用例 4]

本発明の振動子では、前記振動素子は、
基部と、
前記基部から延出されている一对の振動腕と、を含むことが好ましい。

【0008】

[適用例 5]

本発明の振動子では、前記振動腕は、

10

20

30

40

50

錘部と、

前記錘部と前記基部との間に設けられている腕部と、を含むことが好ましい。

錘部を設けることで、振動腕の全長を抑えつつ、振動腕の先端側の質量を高めることができる。振動腕の全長を抑える、すなわち振動腕の長さを短くすることができることにより、振動腕が屈曲変形したときの、先端部の変位量を小さくすることができ、よって、錘部を設けていない場合と、錘部を設けた状態とで同一の振動周波数、同一の励振パワーで振動している場合には、振動速度を遅くすることができる。これにより、振動素子に加わる空気抵抗をより小さくすることができ、Q値が特に高い振動子を得ることができる。

【0009】

[適用例6]

本発明の振動子では、前記振動腕は、前記振動腕の前記第1方向に沿った長さをL、前記錘部の前記第1方向に沿った長さをHとしたとき、

$$0.183 \leq H/L \leq 0.597$$

なる関係を満足していることが好ましい。

これにより、振動素子に加わる空気抵抗をより小さくすることができ、Q値が特に高い振動子を得ることができる。

【0010】

[適用例7]

本発明の振動子では、前記振動腕は、前記振動腕の前記第1の方向に沿った長さをL、前記錘部の前記第1の方向に沿った長さをHとしたとき、

$$0.012 < H/L < 0.30$$

なる関係を満足していることが好ましい。

これにより、振動素子に加わる空気抵抗をより小さくすることができるとともに、CI値の上昇をより低減することができ、よって、Q値が特に高い振動子を得ることができる。

【0011】

[適用例8]

本発明の発振器は、本発明の振動子と、回路と、を備えていることを特徴とする。

これにより、高い信頼性を有する発振器が得られる。

[適用例9]

本発明の電子機器は、本発明の振動子を備えていることを特徴とする。

これにより、高い信頼性を有する電子機器が得られる。

[適用例10]

本発明の移動体は、本発明の振動子を備えていることを特徴とする。

これにより、高い信頼性を有する移動体 that 得られる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の第1実施形態にかかる振動子の平面図である。

【図2】図1中のA-A線断面図である。

【図3】図1に示す振動子が有する振動素子の平面図である。

【図4】(a)は、図3中のB-B線断面図、(b)は、図3中のC-C線断面図である。

【図5】図3に示す振動素子の基部を説明するための部分拡大平面図である。

【図6】(a)は、図3に示す振動素子を模式的に示す平面図(縮幅部を考慮した図)、(b)は、(a)に示す振動素子の簡略化モデルを示す平面図である。

【図7】図6に示す振動素子の振動漏れ抑制の原理を説明する平面図であって、(a)~(d)は、基部の各部(第1~4連結部)の作用を説明する図である。

【図8】屈曲振動時の熱伝導について説明する振動腕の断面図である。

【図9】Q値と f/f_m の関係を示すグラフである。

10

20

30

40

50

- 【図 10】ウェットエッチングにより形成された振動腕を示す断面図である。
- 【図 11】 W と Q_{TEDa} の関係を示すグラフである。
- 【図 12】 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。
- 【図 13】 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。
- 【図 14】 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。
- 【図 15】 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。
- 【図 16】 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。
- 【図 17】 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。
- 【図 18】 H/L と規格化値の関係を示すグラフである。
- 【図 19】シミュレーションに用いた振動腕の形状および大きさを示す斜視図である。 10
- 【図 20】 H/L と高性能化指数 1 との関係を示すグラフである。
- 【図 21】実効幅 a を説明する斜視図である。
- 【図 22】ハンマーヘッド占有率と低 R_1 化指数の関係を示すグラフである。
- 【図 23】 Qv^{-1} と気圧との関係を検討に用いた振動素子の形状および大きさを示す平面図である。
- 【図 24】 Qv^{-1} と気圧との関係を示すグラフである。
- 【図 25】 CI 値 (R_1) と気圧との関係を示すグラフである。
- 【図 26】本発明の発振器の好適な実施形態を示す断面図である。
- 【図 27】本発明の振動子を備える電子機器を適用したモバイル型（またはノート型）のパーソナルコンピュータの構成を示す斜視図である。 20
- 【図 28】本発明の振動子を備える電子機器を適用した携帯電話機（ PHS も含む）の構成を示す斜視図である。
- 【図 29】本発明の振動子を備える電子機器を適用したデジタルスチルカメラの構成を示す斜視図である。
- 【図 30】本発明の移動体の一例としての自動車を概略的に示す斜視図である。
- 【発明を実施するための形態】
- 【0013】

以下、本発明の振動子、発振器、電子機器および移動体を図面に示す好適な実施形態に基づいて詳細に説明する。

1. 振動子

まず、本発明の振動子について説明する。

図 1 は、本発明の第 1 実施形態にかかる振動子の平面図である。図 2 は、図 1 中の A - A 線断面図である。図 3 は、図 1 に示す振動子が有する振動素子の平面図である。図 4 は (a) は、図 3 中の B - B 線断面図、図 4 (b) は、図 3 中の C - C 線断面図である。図 5 は、図 3 に示す振動素子の基部を説明するための部分拡大平面図である。

【0014】

図 1 ~ 図 5 には、互いに直交する 3 つの軸として、 X 軸、 Y' 軸および Z' 軸が図示されており、これら図示した各矢印の先端側を「+ (プラス)」、基端側を「- (マイナス)」とする。また、 X 軸に平行な方向 (第 2 の方向) を「 X 軸方向」、 Y' 軸に平行な方向 (第 1 の方向) を「 Y' 軸方向」、 Z' 軸に平行な方向 (第 3 の方向) を「 Z' 軸方向」という。また、+ Z' 側 (図 2、図 4 中の上側) を「上」、- Z' 側 (図 2、図 4 の下側) を「下」ともいう。

図 1 および図 2 に示すように、振動子 1 は、振動素子 2 と、振動素子 2 を収納するパッケージ 9 とを有している。以下、振動素子 2 およびパッケージ 9 ついて、順次詳細に説明する。

【0015】

《振動素子》

図 3 および図 4 に示すように、振動素子 2 は、水晶基板 3 と、水晶基板 3 上に形成された第 1 駆動用電極 8 4 および第 2 駆動用電極 8 5 とを有している。なお、図 3 では、説明の便宜上、第 1 駆動用電極 8 4 および第 2 駆動用電極 8 5 の図示を一部省略している。

30

40

50

水晶基板 3 は、水晶で構成されており、水晶の結晶軸である、電気軸としての X 軸、機械軸としての Y 軸、および光学軸としての Z 軸のうち、X 軸を回転軸として、Z 軸を Y 軸の - Y 方向へ + Z 側が回転するように所定の角度（例えば、15°未満）傾けた軸を Z' 軸、Y 軸を Z 軸の + Z 方向へ + Y 側が回転するように所定の角度（例えば、15°未満）傾けた軸を Y' 軸とし、X 軸および Y' 軸を含む面を主面とし、Z' 軸に沿った方向を厚さとする、所謂 Z カット水晶板である。このような構成の水晶基板 3 では、水晶基板 3 の長手方向を Y' 軸、短手方向を X 軸、さらに厚さ方向を Z' 軸と定めることができる。また、本実施形態では、基部 4 の上面は、水晶の + Z' 面であり、基部 4 の下面は、水晶の - Z' 面である。

【0016】

なお、Y' 軸および Z' 軸は、それぞれ、Y 軸および Z 軸に一致していてもよい（すなわち前記所定角度が 0°であってもよい）。

また、本発明に用いられる水晶基板は、Z カット水晶板に限定されるものではなく、A T カット、B T カット、S T カット、C T カット、D T カット、G T カットおよび S C カット等の水晶板を広く適用できることは言うまでもない。

【0017】

なお、水晶基板 3 の厚さ T（基部 4、および振動腕 5、6 の厚さ）としては、特に限定されないが、70 μm 未満であるのが好ましい。このような数値範囲とすることにより、例えば、ウェットエッチングによって水晶基板 3 を形成（パターニング）する場合、振動腕 5 と基部 4 の境界部や後述する腕部 50 とハンマーヘッド 59 の境界部等に不要部（本来なら除去されるべき部分）が残存してしまうのを効果的に防止することができる。そのため、振動漏れを効果的に低減することのできる振動素子 2 とすることができる。違う観点から、厚さ T は、70 μm 以上、300 μm 以下程度であるのが好ましく、100 μm 以上、150 μm 以下程度であるのがより好ましい。このような数値範囲とすることにより、第 1、第 2 駆動用電極 84、85 を水晶基板 3 の側面に広く形成することができるため、小型化と共に C I 値を低くすることができる。

【0018】

図 1 に示すように、水晶基板 3 は、基部 4 と、1 対（2 つ）の振動腕 5、6 とを有しており、所謂「音叉型」をなしている。なお、これら基部 4、および振動腕 5、6 は、一体に形成されている。このような構成の水晶基板 3 を備える振動素子 2 は、一対の振動腕 5、6 が互いに接近、離間を繰り返すように面内方向（X Y' 平面方向）に所定の共振周波数で屈曲振動する。

【0019】

共振周波数としては、例えば 31.768 kHz 以上 33.768 kHz 以下である。

基部 4 は、X 軸および Y' 軸に平行な平面である X Y' 平面に広がり、Z' 軸方向を厚さ方向とする板状をなしている。

基部 4 は、Z 軸方向から見た平面視（以下、単に「平面視」という）で、基部 4 の Y' 軸方向の途中の部分がくびれた形状をなしている。すなわち、図 3 に示すように、基部 4 は、振動腕 5、6 が延出している第 1 基部 4 1 と、第 1 基部 4 1 に対して振動腕 5、6 とは反対側に設けられた第 2 基部 4 2 と、第 1 基部 4 1 と第 2 基部 4 2 とを連結する連結部 4 3 と、を含んでいる。なお、図 5 において、第 1 基部 4 1 と連結部 4 3 との境界部、および、第 2 基部 4 2 と連結部 4 3 との境界部をそれぞれ破線で示している。

【0020】

ここで、連結部 4 3 の X 軸方向の外縁は、第 1 基部 4 1 よりも X 軸方向に沿った幅が徐々に小さくなるように括れ状の切り欠き部 B になっている。言い換えると、連結部 4 3 は、第 1 基部 4 1 側の端部に X 軸方向に沿った幅が第 2 基部 4 2 側に向かうに従って連続的に小さくなる縮幅部 4 1 1 を有する。これにより、1 対の振動腕 5、6 の互いに同一面内で接近または離間する屈曲振動に伴う第 1 基部 4 1 の変形を効果的に低減することができる。その結果、第 1 基部 4 1 の Y 軸方向に沿った長さを短くしても、1 対の振動腕 5、6 の、略面内において互いに接近と離間を交互に繰り返す屈曲振動に伴う第 1 基部 4 1 の変

10

20

30

40

50

形を低減し、基部 4 から外部への振動漏れを低減することができる。

【0021】

連結部 43 の X 軸方向の外縁のうち、楕円で囲まれている領域 AA の外縁、すなわち、切り欠き部 B の前記第 1 基部 41 の前記一端側、且つ前記連結部 43 の中央寄りの外縁は、角部を含まない連続的な線で構成されている。したがって、曲線と直線との接続部が曲率の不連続となる角部を有していないため、応力が集中しやすい部分がなくなり、耐衝撃性を十分に高めることができる。

【0022】

以下、図 6 および図 7 に基づいて、縮幅部 411 の作用について詳述する。

図 6 (a) は、図 3 に示す振動素子を模式的に示す平面図 (縮幅部を考慮した図)、図 6 (b) は、(a) に示す振動素子の簡略化モデルを示す平面図である。図 7 は、図 6 に示す振動素子の振動漏れ抑制の原理を説明する平面図であって、(a) ~ (d) は、基部の各部 (第 1 ~ 4 連結部) の作用を説明する図である。

10

【0023】

連結部 43 の X 軸方向の外縁のうち、第 1 基部 41 側の縮幅部 411 の外縁は、振動腕の屈曲振動により第 1 基部 41 と連結部 43 の第 1 基部 41 側の領域とに生じる変形を低減する効果を有している。

縮幅部 411 を振動腕 5、6 の先端方向と反対側に形成した場合を図 6 (a) に示す。図 6 (b) に示したように回転軸 155 を回転の中心とし、所定の半径 R を有する擬似的な剛体の回転体 154 に弾性棒 151 が接続されたものと、回転軸 157 を回転の中心とし、半径 R を有する擬似的な剛体の回転体 156 に弾性棒 152 が接続されたものとが、簡略化された基部 168 によって接続されているものと見做すことができる。

20

【0024】

また、簡略化された基部 168 の代表的な連結部として、回転軸 155、157 よりも弾性棒 151、152 側に設けられた第 1 の連結部 158 と、回転軸 155、157 との間に設けられた第 2 の連結部 159 と、回転軸 155、157 よりも弾性棒の在る方向とは反対側に設けられた第 3 の連結部 160 と、第 3 の連結部 160 よりも弾性棒の先端方向とは反対側に設けられた第 4 の連結部 169 と、を考える。

【0025】

2 本の振動腕 5、6 が互いに離間するように屈曲変形した場合、弾性棒 151、152 が互いに離間するように屈曲変形したと見做すが、この場合、振動腕 5、6 の根元周辺から振動腕の先端方向とは反対側の方向の所定の場所に、変位ベクトルの渦が形成される。この渦の中心は、基部 4 を含む振動腕 5、6 の根元付近である場合が多いが、振動腕 5、6 や基部 4 の領域には属さない、仮想的な空間上に形成される場合もある。

30

【0026】

ここでは説明の都合上、この渦の中心は基部 4 の領域に属するとし、且つ、弾性棒 151、152 からの距離は等しいとするとともに、この渦の中心を図 6 (b) における回転軸 155、157 とした。なお、この回転軸 155、157 を回転の中心とし、半径 R を有する擬似的な剛体の回転体 154、156 の外周の接線方向における変位は、弾性棒 151、152 の先端方向の側で最も大きく、弾性棒 151、152 の先端方向とは反対側の方向で最も小さい。

40

【0027】

図 7 (a) において、簡略化された基部 168 の代表的な第 1 の連結部 158 は、擬似的な剛体の回転体 154、156 の回転運動によって強く伸ばされながら弾性棒 151、152 の先端側の方向に小さく移動する。

図 7 (b) において、簡略化された基部 168 の代表的な第 2 の連結部 159 も同様に、擬似的な剛体の回転体 154、156 の回転運動によって伸ばされながら弾性棒 151、152 の先端側の方向に移動する。

【0028】

図 7 (c) において、簡略化された基部 168 の代表的な第 3 の連結部 160 は、擬似

50

的な剛体の回転体 154、156 の回転運動によって圧縮されながら弾性棒 151、152 の先端側の方向に移動するが、このとき、第 3 の連結部 160 の長さ方向の中央周辺は、弾性棒 151、152 の先端側の方向、或は弾性棒 151、152 の先端方向とは反対側の方向のどちらかに変形する潜在力を有している。

図 7 (d) において、簡略化された基部 168 の代表的な第 4 の連結部 169 の場合は、擬似的な剛体の回転体 154、156 の回転運動によって圧縮されるが、アーチ形状をしているために変形し難く、更に変形する場合には、第 4 の連結部 169 の長さ方向の中央周辺が弾性棒 151、152 の先端方向とは反対側の方向に変位するように変形する。

【0029】

従って、弾性棒 151、152 の離間運動によって、簡略化された基部 168 の代表的な第 1 乃至 4 の連結部 158、159、160、169 において、回転軸 155 と 157 を結ぶ方向へは圧縮や伸張の変形を発生させながら振動変位を相殺させる作用が働く。そして、第 1 乃至 3 の連結部 158、159、160 が弾性棒 151、152 の先端側の方向に変位するのを、第 4 の連結部 169 の変形し難さが妨げるとともに、第 4 の連結部 169 の長さ方向の中央付近が弾性棒 151、152 の先端方向とは反対側の方向に変位するように変形することで相殺することができる。

結果として、簡略化された基部 168 に固定部材を形成した場合、即ち、基部 167 に固定部材を形成した場合、固定部材を介して外部へ漏洩するエネルギーが減少するので、振動漏れを低減させ、Q 値の減少を低減することができる。

【0030】

図 3 に示すように、振動腕 5、6 は、X 軸方向に並び、かつ、互いに平行となるように基部 4 の先端から +Y' 軸方向に延出している。また、振動腕 5、6 は、それぞれ、長手形状をなしており、その基端が固定端となり、先端が自由端となっている。

また、振動腕 5、6 は、腕部 50、60 と、腕部 50、60 の先端に設けられた錘部としてのハンマーヘッド（腕部 50、60 よりも X 軸方向に沿った長さが長い広幅な錘部）59、69 とを有している。振動腕 5、6 は、互いに同様の構成（形状、大きさ）をなしている。

【0031】

図 4 に示すように、振動腕 5 は、XY' 平面で構成された互いに表裏の関係にある一対の主面 51、52 と、Y'Z' 平面で構成され、一対の主面 51、52 を接続する一対の側面 53、54 とを有している。また、振動腕 5 は、主面 51 に開口する有底の溝 55（溝部）と、主面 52 に開口する有底の溝 56（溝部）とを有している。溝 55、56 は、それぞれ、Y' 軸方向に延在している。このような振動腕 5 は、溝 55、56 が形成されている部分では、略 H 型の横断面形状をなしている。

【0032】

振動腕 5 と同様に、振動腕 6 は、XY' 平面で構成された互いに表裏の関係にある一対の主面 61、62 と、Y'Z' 平面で構成され、一対の主面 61、62 を接続する一対の側面 63、64 とを有している。また、振動腕 6 は、主面 61 に開口する有底の溝 65（溝部）と、主面 62 に開口する有底の溝 66（溝部）とを有している。溝 65、66 は、それぞれ、Y' 軸方向に延在している。このような振動腕 6 は、溝 65、66 が形成されている部分では、略 H 型の横断面形状をなしている。

【0033】

このような溝 55、56 は、図 4 に示すように、横断面において、振動腕 5 の厚さ方向の長さを二等分する線分に対して対称的（上下対称）に形成されているのが好ましい。同様に、溝 65、66 は、横断面において、振動腕 6 の厚みを二等分する線分に対して対称的（上下対称）に形成されているのが好ましい。これにより、振動腕 5、6 の不要な振動を低減でき、振動腕 5、6 を効率的に水晶基板 3 の面内方向（XY' 平面方向）に振動させることができる。

なお、前述したように、本実施形態では、腕部 50 は、一対の主面 51、52 の双方に溝 55、56 が設けられていたが、溝は、一対の主面 51、52 のうちの少なくとも一方

10

20

30

40

50

の主面に設けられていてもよい。また、本発明において、溝は、必要に応じて設けられていなくてもよい。なお、腕部 60 についても同様である。

【0034】

このような振動腕 5 には、図 4 に示すように、一对の第 1 駆動用電極 84 と一对の第 2 駆動用電極 85 とが形成されている。具体的には、一方の第 1 駆動用電極 84 は、溝 55 の内面に形成されており、他方の第 1 駆動用電極 84 は、溝 56 の内面に形成されている。また、一方の第 2 駆動用電極 85 は、側面 53 に形成されており、他方の第 2 駆動用電極 85 は、側面 54 に形成されている。

【0035】

同様に、振動腕 6 にも、一对の第 1 駆動用電極 84 と一对の第 2 駆動用電極 85 とが形成されている。具体的には、一方の第 1 駆動用電極 84 は、側面 63 に形成されており、他方の第 1 駆動用電極 84 は、側面 64 に形成されている。また、一方の第 2 駆動用電極 85 は、溝 65 の内面に形成されており、他方の第 2 駆動用電極 85 は、溝 66 の内面に形成されている。

このような第 1 駆動用電極 84 と第 2 駆動用電極 85 との間に交番電圧を印加すると、振動腕 5、6 が互いに接近、離間を繰り返すように面内方向（XY' 平面方向）に所定の周波数で振動する。

【0036】

第 1 駆動用電極 84 および第 2 駆動用電極 85 の構成材料としては、それぞれ、特に限定されないが、例えば、金（Au）、金合金、白金（Pt）、アルミニウム（Al）、アルミニウム合金、銀（Ag）、銀合金、クロム（Cr）、クロム合金、ニッケル（Ni）、銅（Cu）、モリブデン（Mo）、ニオブ（Nb）、タングステン（W）、鉄（Fe）、チタン（Ti）、コバルト（Co）、亜鉛（Zn）、ジルコニウム（Zr）等の金属材料、酸化インジウムスズ（ITO）等の導電材料により形成することができる。

【0037】

また、図 4 に示すように、溝 55 は、第 1 駆動用電極 84（励振電極）が設けられている部分である電極形成領域 551 と、電極形成領域 551 に対して基部 4 とは反対側に位置し、駆動用電極が設けられていない部分である電極未形成領域 552 と、を有している。同様に、溝 56 は、電極形成領域 561 および電極未形成領域 562 を有し、溝 65 は、電極形成領域 651 および電極未形成領域 652 を有し、溝 66 は、電極形成領域 661 および電極未形成領域 662 を有する。このような電極未形成領域 552、562、652、662 を形成することにより、高次モードの振動（高調波）の発生を低減しつつ、等価直列容量 C1 を小さくしたメインモードの振動（基本波）を発生させることができる。こうすることによって、高次モードの等価直列抵抗値をメインモードの等価直列抵抗値よりも大きくすることができるので、振動素子 2 を搭載した発振回路において、高次モードの共振周波数で発振してしまう虞を低減すると共に、負荷容量の変化に対する発振周波数の変化が増大するのを低減することができる。

また、振動素子 2 では、振動腕 5、6 に溝 55、56、65、66 を形成することによって、熱弾性損失の低減を図っている。以下、このことについて、振動腕 5 を例にして具体的に説明する。

【0038】

振動腕 5 は、前述したように、第 1、第 2 駆動用電極 84、85 間に交番電圧を印加することにより面内方向に屈曲振動する。図 8 に示すように、この屈曲振動の際、腕部 50 の側面 53 が収縮すると側面 54 が伸張し、反対に、側面 53 が伸張すると側面 54 が収縮する。振動腕 5 が Gough-Joule 効果を発生しない（エネルギー弾性がエントロピー弾性に対して支配的な）場合、側面 53、54 のうち、収縮する面側の温度は上昇し、伸張する面側の温度は下降するため、側面 53 と側面 54 との間、つまり腕部 50 の内部に温度差が発生する。このような温度差から生じる熱伝導によって振動エネルギーの損失が発生し、これにより振動素子 2 の Q 値が低下する。このような Q 値の低下を熱弾性効果とも言い、熱弾性効果によるエネルギーの損失を熱弾性損失とも言う。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 9 】

振動素子 2 のような構成の屈曲振動モードで振動する振動素子において、振動腕 5 の屈曲振動周波数（機械的屈曲振動周波数） f が変化したとき、振動腕 5 の屈曲振動周波数が熱緩和周波数 f_m と一致するときに Q 値が最小となる。この熱緩和周波数 f_m は、 $f_m = 1 / (2 \quad)$ で求めることができる（ただし、式中 \quad は円周率であり、 e をネイピア数とすれば、 \quad は温度差が熱伝導により e^{-1} 倍になるのに要する緩和時間である）。

【 0 0 4 0 】

また、平板構造（断面形状が矩形の構造）の熱緩和周波数を f_{m0} とすれば、 f_{m0} は下式で求めることができる。

$$f_{m0} = \quad k / (2 \quad C_p a^2) \quad (1)$$

10

なお、 \quad は円周率、 k は振動腕 5 の振動方向の熱伝導率、 \quad は振動腕 5 の質量密度、 C_p は振動腕 5 の熱容量、 a は振動腕 5 の振動方向の幅である。式（1）の熱伝導率 k 、質量密度 \quad 、熱容量 C_p に振動腕 5 の材料そのもの（すなわち水晶）の定数を入力した場合、求まる熱緩和周波数 f_{m0} は、振動腕 5 に溝 5 5、5 6 を設けていない場合の値となる。

【 0 0 4 1 】

振動腕 5 では、側面 5 3、5 4 の間に位置するように溝 5 5、5 6 が形成されている。そのため、振動腕 5 の屈曲振動時に生じる側面 5 3、5 4 の温度差を熱伝導により温度平衡させるための熱移動経路が溝 5 5、5 6 を迂回するように形成され、熱移動経路が側面 5 3、5 4 間の直線距離（最短距離）よりも長くなる。そのため、振動腕 5 に溝 5 5、5 6 を設けていない場合と比較して緩和時間が長くなり、熱緩和周波数 f_m が低くなる。

20

【 0 0 4 2 】

図 9 は、屈曲振動モードの振動素子の Q 値の f / f_m 依存性を表すグラフである。同図において、点線で示されている曲線 F_1 は、振動素子 2 のように振動腕に溝が形成されている場合（振動腕の横断面形状が H 型の場合）を示し、実線で示されている曲線 F_2 は、振動腕に溝が形成されていない場合（連結腕の横断面形状が矩形の場合）を示している。同図に示すように、曲線 F_1 、 F_2 の形状は変わらないが、前述のような熱緩和周波数 f_m の低下に伴って、曲線 F_1 が曲線 F_2 に対して周波数低下方向へシフトする。したがって、振動素子 2 のように振動腕に溝が形成されている場合の熱緩和周波数を f_{m1} とすれば、下記式（2）を満たすことにより、常に、振動腕に溝が形成されている振動素子の Q 値が振動腕に溝が形成されていない振動素子の Q 値に対して高くなる。

30

【 0 0 4 3 】

【 数 1 】

$$f > \sqrt{f_{m0} f_{m1}} \quad \cdots \cdots (2)$$

【 0 0 4 4 】

更に、 $f / f_{m0} > 1$ の関係に限定すれば、より高い Q 値を得ることができる。

なお、図 9 において、 $f / f_m < 1$ の領域を等温的領域とも言い、この等温的領域では f / f_m が小さくなるにつれて Q 値が高くなる。これは、振動腕の機械的周波数が低くなる（振動腕の振動が遅くなる）につれて前述のような振動腕内の温度差が生じ難くなるためである。したがって、 f / f_m を 0（零）に限りなく近づけた際の極限では、等温準静操作となって、熱弾性損失は限りなく 0（零）に接近する。一方、 $f / f_m > 1$ の領域を断熱的領域とも言い、この断熱的領域では f / f_m が大きくなるにつれて Q 値が高くなる。これは、振動腕の機械的周波数が高くなるにつれて、各側面の温度上昇・温度低下の切り替わりが高速となり、前述のような熱伝導が生じる時間がなくなるためである。したがって、 f / f_m を限りなく大きくした際の極限では、断熱操作となって、熱弾性損失は限りなく 0（零）に接近する。このことから、 $f / f_m > 1$ の関係を満たすとは、 f / f_m が断熱的領域にあるとも言い換えることができる。

40

【 0 0 4 5 】

また、振動素子 2 では、 $f_m = \quad k / (2 \quad C_p a^2)$ としたときに $f / f_m > 1$ の範

50

囲を満足し、加えて、振動腕 5、6 に所定の形状の溝 5 5、5 6、6 5、6 6 を形成することにより、従来の振動素子よりも高い Q 値が得られるように構成されている。以下、振動腕 5、6 に形成された溝 5 5、5 6、6 5、6 6 の構成について具体的に説明する。なお、振動腕 5、6 は、互いに同様の構成であるため、以下では、振動腕 5 に形成された溝 5 5、5 6 について代表して説明し、振動腕 6 に形成された溝 6 5、6 6 については、その説明を省略する。

【0046】

図 4 に示すように、振動素子 2 では、主面 5 1 の溝 5 5 の X 軸方向両側に位置する土手部（振動腕 5 の長手方向に直交する幅方向に沿って溝 5 5 を挟んで並んでいる主面）5 1 a、5 1 b の幅（X 軸方向の長さ）が互いにほぼ等しく、その土手部 5 1 a、5 1 b の幅を W とし、振動腕 5 の厚さ（Z' 軸方向の長さ）を T とし、溝 5 5、5 6 の最大深さの合計を t_a とし、 t_a / T をとしたとき、下記式（3）で示す関係を満足している。

【0047】

$$4.236 \times 10 \times 10^{-2} - 8.473 \times 10 \times 10^{-2} + 4.414 \times 10 \times 10^{-2} W - 3.367 \times 10 \times 10^{-2} + 7.112 \times 10 \times 10^{-2} - 2.352 \times 10 \times 10^{-2} [\mu m] \cdots (3)$$

但し、 $0.75 < 1.00$

なお、主面 5 2 の溝 5 6 の X 軸方向両側に位置する土手部（部位）5 2 a、5 2 b の幅についても同様の関係を満足している。

【0048】

振動腕 5 の少なくとも一部に、式（3）を満足する領域 S が存在することにより、従来よりも優れた振動特性を発揮する振動素子 2 を得ることができる。なお、式（3）を満足する領域 S は、振動腕 5 の長手方向の一部に存在していればよいが、振動腕 5 の基端部を含んで存在していることが好ましい。基端部は、振動腕 5 の中でも大きく屈曲変形する部分であり、振動腕 5 の全体の振動特性に影響を与えやすい部位である。そのため、領域 S を少なくとも基端部を含んで存在させることにより、より確実かつ効果的に、従来よりも優れた振動特性を発揮する振動素子 2 を得ることができる。また、言い換えれば、領域 S を少なくとも振動腕 5 の屈曲変形量が最大となる部位に存在させることにより、より確実かつ効果的に、従来品よりも優れた振動特性を発揮する振動素子 2 を得ることができる。より具体的には、領域 S は、腕部 5 0 の基端部から先端部へ向かって、腕部 5 0 の長さに対して 30 % の長さの領域を含んで存在していることが好ましいと言える。

【0049】

図 1 に示すように、本実施形態の振動素子 2 では、腕部 5 0 がその延出方向の両端部を除くほぼ全域（領域 S 1）にてほぼ同一の幅および厚さとなるように構成されており、加えて、溝 5 5、5 6 が全域（領域 S 2）にてほぼ同一の幅および深さとなるように形成されている。振動素子 2 では、このような領域 S 1、S 2 が重なり合う領域が領域 S を構成しているため、領域 S を振動腕 5 の長手方向に長く存在させることができる。したがって、上述した効果がより顕著となる。

なお、前記式（3）は、熱弾性損失のみを考慮した Q 値を Q_{TED} とし、その Q_{TED} が所定値よりも高くなる条件である。

【0050】

以下、説明を続けるが、 Q_{TED} を規格化してその説明を行う。 Q_{TED} の規格化は、 Q_{TED} が限りなく 1 に近いときに予想される Q_{TED} を 1 として行う。すなわち、 Q_{TED} が限りなく 1 に近いときに予想される Q_{TED} を $Q_{TED} (= 1)$ とし、規格化される前の Q_{TED} を Q_{TEDb} とし、規格化された Q_{TED} を Q_{TEDa} としたとき、その Q_{TEDa} は、 $Q_{TEDb} / Q_{TED} (= 1)$ で表される。

まず、前記式（3）は、 $Q_{TEDa} \geq 0.65$ となる条件である。そして、 $Q_{TEDa} \geq 0.70$ 、 $Q_{TEDa} \geq 0.75$ 、 $Q_{TEDa} \geq 0.80$ 、 $Q_{TEDa} \geq 0.85$ となる条件は、それぞれ、下記の通りである。

【0051】

$$(Q_{TEDa} \geq 0.70)$$

10

20

30

40

50

$Q_{TEDa} = 0.70$ となる条件は、下記式(4)で示す関係を満足することである。
 $5.459 \times 10 \times 10^2 - 1.110 \times 10^2 \times W + 5.859 \times 10 \times 10^2 - 4.500 \times 10 \times 10^2 + 9.490 \times 10 \times 10^2 - 3.698 \times 10 \times 10^2 [\mu m] \dots (4)$
 但し、 $0.80 < 1.00$

【0052】

($Q_{TEDa} = 0.75$)
 $Q_{TEDa} = 0.75$ となる条件は、下記式(5)で示す関係を満足することである。
 $6.675 \times 10 \times 10^2 - 1.380 \times 10^2 \times W + 7.392 \times 10 \times 10^2 - 5.805 \times 10 \times 10^2 + 1.228 \times 10^2 \times W - 5.267 \times 10 \times 10^2 [\mu m] \dots (5)$
 但し、 $0.85 < 1.00$

【0053】

($Q_{TEDa} = 0.80$)
 $Q_{TEDa} = 0.80$ となる条件は、下記式(6)で示す関係を満足することである。
 $7.752 \times 10 \times 10^2 - 1.634 \times 10^2 \times W + 8.903 \times 10 \times 10^2 - 6.93 \times 10 \times 10^2 + 1.496 \times 10^2 \times W - 6.844 \times 10 \times 10^2 [\mu m] \dots (6)$
 但し、 $0.90 < 1.00$

【0054】

($Q_{TEDa} = 0.85$)
 $Q_{TEDa} = 0.85$ となる条件は、下記式(7)で示す関係を満足することである。
 $-1.847 \times 10 \times 10^2 + 2.217 \times 10^2 \times W - 1.189 \times 10 \times 10^2 - 8.433 [\mu m] \dots (7)$
 但し、 $0.95 < 1.00$

【0055】

($Q_{TEDa} = 0.90$)
 $Q_{TEDa} = 0.90$ となる条件は、下記式(7')で示す関係を満足することである。
 $-3.300 \times 10 \times 10^2 + 3.730 \times 10^2 \times W - 3.302 \times 10 \times 10^2 - 2.333 \times 10 [\mu m] \dots (7')$
 但し、 $0.95 < 1.00$

【0056】

以下、発明者が行ったシミュレーションにより解析した結果に基づいて、これらの条件を実証する。

図10は、ウェットエッチングにより形成された振動腕を示す断面図である。図11は、 W と Q_{TEDa} の関係を示すグラフである。図12～図17は、それぞれ、 Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。

【0057】

なお、以下では、Zカット水晶板をパターンニングしてなり、屈曲振動周波数(機械的屈曲振動周波数) $f = 32.768 \text{ kHz}$ の振動素子2を用いたシミュレーションを代表して用いるが、発見者によって、屈曲振動周波数 f が $32.768 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$ の範囲では、下記に示すシミュレーションによる解析結果とほとんど差がないことが確認されている。

【0058】

また、本シミュレーションでは、ウェットエッチングによって水晶基板3をパターンニングした振動素子2を用いている。したがって、溝55、56は、図10に示すように、水晶の結晶面が現れた形状となっている。なお、図10では、図3中のB-B線断面に相当する断面を示している。-X軸方向のエッチングレートが+X軸方向のエッチングレートよりも低いため、-X軸方向の側面が比較的なだらかな傾斜となり、+X軸方向の側面が垂直に近い傾斜となる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 9 】

また、本シミュレーションで用いた振動素子 2 の水晶基板 3 のサイズは、長さが 1 1 6 0 μm 、幅が 5 2 0 μm 、厚さ、すなわち、振動腕 5、6 のそれぞれの厚さ T が 1 2 0 μm である。なお、発見者らによって、長さ、幅、厚さを変更しても、下記に示すシミュレーション結果とほとんど差がないことが確認されている。また、本シミュレーションには、第 1、第 2 駆動用電極 8 4、8 5 が形成されていない振動素子 2 を用いた。

【 0 0 6 0 】

図 1 1 は、 Q_{TEDa} を、それぞれ、0 . 4 0、0 . 6 0、0 . 7 0、0 . 7 5、0 . 8 0、0 . 8 5、0 . 9 0、0 . 9 5、0 . 9 9 としたときの、土手部 5 1 a、5 1 b、5 2 a、5 2 b の幅 W と Q_{TEDa} との関係を示すグラフである。また、振動素子 2 にて達成すべき Q_{TEDa} の下限値 Q_{min} を 0 . 6 5 とし、線分 L 1 で示している。 Q_{TEDa} をこの値以上とすることにより、優れた振動特性を発揮することができる。

10

【 0 0 6 1 】

図 1 1 から、 Q_{TEDa} が 0 . 7 5、0 . 8 0、0 . 8 5、0 . 9 0、0 . 9 5、0 . 9 9 のときに、 Q_{TEDa} が 0 . 6 5 以上の領域が存在することが読み取れる。このことから、前述したように、 Q_{TEDa} が 0 . 6 5 とするには、「0 . 7 5 < 1 . 0 0」なる関係を満足する必要があることが読み取れる。

また、図 1 2 は、図 1 1 において各グラフが $Q_{TEDa} = 0 . 6 5$ とクロスする各点をプロットして得られたグラフであり、 $Q_{TEDa} = 0 . 6 5$ (Q_{min}) である場合における W と Q_{TEDa} の関係を示すグラフである。

20

【 0 0 6 2 】

この場合、W の下限値を示すグラフは、下記式 (8) で示される。

$$W[\mu\text{m}] = 4 . 236 \times 10 \times Q_{TEDa}^2 - 8 . 473 \times 10 \times Q_{TEDa} + 4 . 414 \times 10 [\mu\text{m}] \quad \dots (8)$$

また、W の上限値を示すグラフは、下記式 (9) で示される。

$$W[\mu\text{m}] = - 3 . 367 \times 10 \times Q_{TEDa}^2 + 7 . 112 \times 10 \times Q_{TEDa} - 2 . 352 \times 10 [\mu\text{m}] \quad \dots (9)$$

したがって、図 1 2 から、前記式 (3) で示す関係を満たすことにより、0 . 6 5 以上の Q_{TEDa} を有する振動素子 2 が得られることが読み取れる。以上より、式 (3) を満足することにより、0 . 6 5 以上の高い Q_{TEDa} が得られ、振動特性に優れた振動素子 2 となることが証明される。

30

【 0 0 6 3 】

同様に、図 1 1 から、 Q_{TEDa} が 0 . 8 0、0 . 8 5、0 . 9 0、0 . 9 5、0 . 9 9 のときに、 Q_{TEDa} が 0 . 7 0 以上の領域が存在することが読み取れる。このことから、前述したように、 Q_{TEDa} が 0 . 7 0 とするには、「0 . 8 0 < 1 . 0 0」なる関係を満足する必要があることが読み取れる。

また、図 1 3 は、図 1 1 において各グラフが $Q_{TEDa} = 0 . 7 0$ とクロスする各点をプロットして得られたグラフであり、 $Q_{TEDa} = 0 . 7 0$ (Q_{min}) である場合における W と Q_{TEDa} の関係を示すグラフである。

【 0 0 6 4 】

この場合、W の下限値を示すグラフは、下記式 (1 0) で示される。

$$W[\mu\text{m}] = 5 . 459 \times 10 \times Q_{TEDa}^2 - 1 . 110 \times 10^2 \times Q_{TEDa} + 5 . 859 \times 10 [\mu\text{m}] \quad \dots (10)$$

また、W の上限値を示すグラフは、下記式 (1 1) で示される。

$$W[\mu\text{m}] = - 4 . 500 \times 10 \times Q_{TEDa}^2 + 9 . 490 \times 10 \times Q_{TEDa} - 3 . 698 \times 10 [\mu\text{m}] \quad \dots (11)$$

したがって、図 1 3 から、前記式 (4) で示す関係を満たすことにより、0 . 7 0 以上の Q_{TEDa} を有する振動素子 2 が得られることが読み取れる。以上より、式 (4) を満足することにより、0 . 7 0 以上の高い Q_{TEDa} が得られ、振動特性に優れた振動素子 2 となることが証明される。

40

50

【 0 0 6 5 】

同様に、図 1 1 から、 Q_{TEDa} が 0 . 8 5、0 . 9 0、0 . 9 5、0 . 9 9 のときに、 Q_{TEDa} が 0 . 7 5 以上の領域が存在することが読み取れる。このことから、前述したように、 $Q_{TEDa} = 0 . 7 5$ とするには、「0 . 8 5 < 1 . 0 0」なる関係を満足する必要があることが読み取れる。

また、図 1 4 は、図 1 1 において各グラフが $Q_{TEDa} = 0 . 7 5$ とクロスする各点をプロットして得られたグラフであり、 $Q_{TEDa} = 0 . 7 5$ (Q_{min}) である場合における Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。

【 0 0 6 6 】

この場合、 W の下限値を示すグラフは、下記式 (1 2) で示される。

$$W[\mu m] = 6 . 6 7 5 \times 1 0 \times x^2 - 1 . 3 8 0 \times 1 0^2 \times x + 7 . 3 9 2 \times 1 0 [\mu m] \quad \cdots \cdots (1 2)$$

また、 W の上限値を示すグラフは、下記式 (1 3) で示される。

$$W[\mu m] = - 5 . 8 0 5 \times 1 0 \times x^2 + 1 . 2 2 8 \times 1 0^2 \times x - 5 . 2 6 7 \times 1 0 [\mu m] \quad \cdots \cdots (1 3)$$

したがって、図 1 4 から、前記式 (5) で示す関係を満たすことにより、0 . 7 5 以上の Q_{TEDa} を有する振動素子 2 が得られることが読み取れる。以上より、式 (5) を満足することにより、0 . 7 5 以上の高い Q_{TEDa} が得られ、振動特性に優れた振動素子 2 となることが証明される。

【 0 0 6 7 】

同様に、図 1 1 から、 Q_{TEDa} が 0 . 9 0、0 . 9 5、0 . 9 9 のときに、 Q_{TEDa} が 0 . 8 0 以上の領域が存在することが読み取れる。このことから、前述したように、 $Q_{TEDa} = 0 . 8 0$ とするには、「0 . 9 0 < 1 . 0 0」なる関係を満足する必要があることが読み取れる。

また、図 1 5 は、図 1 1 において各グラフが $Q_{TEDa} = 0 . 8 0$ とクロスする各点をプロットして得られたグラフであり、 $Q_{TEDa} = 0 . 8 0$ (Q_{min}) である場合における Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。

【 0 0 6 8 】

この場合、 W の下限値を示すグラフは、下記式 (1 4) で示される。

$$W[\mu m] = 7 . 7 5 2 \times 1 0 \times x^2 - 1 . 6 3 4 \times 1 0^2 \times x + 8 . 9 0 3 \times 1 0 [\mu m] \quad \cdots \cdots (1 4)$$

また、 W の上限値を示すグラフは、下記式 (1 5) で示される。

$$W[\mu m] = - 6 . 9 9 3 \times 1 0 \times x^2 + 1 . 4 9 6 \times 1 0^2 \times x - 6 . 8 4 4 \times 1 0 [\mu m] \quad \cdots \cdots (1 5)$$

したがって、図 1 5 から、前記式 (6) で示す関係を満たすことにより、0 . 8 0 以上の Q_{TEDa} を有する振動素子 2 が得られることが読み取れる。以上より、式 (6) を満足することにより、0 . 8 0 以上の高い Q_{TEDa} が得られ、振動特性に優れた振動素子 2 となることが証明される。

【 0 0 6 9 】

同様に、図 1 1 から、 Q_{TEDa} が 0 . 9 5、0 . 9 9 のときに、 Q_{TEDa} が 0 . 8 5 以上の領域が存在することが読み取れる。このことから、前述したように、 $Q_{TEDa} = 0 . 8 5$ とするには、「0 . 9 5 < 1 . 0 0」なる関係を満足する必要があることが読み取れる。

また、図 1 6 は、図 1 1 において各グラフが $Q_{TEDa} = 0 . 8 5$ とクロスする各点をプロットして得られたグラフであり、 $Q_{TEDa} = 0 . 8 5$ (Q_{min}) である場合における Q_{TEDa} と W の関係を示すグラフである。

【 0 0 7 0 】

この場合、 W の下限値を示すグラフは、下記式 (1 6) で示される。

$$W[\mu m] = - 1 . 8 4 7 \times 1 0 \times x^2 + 2 . 2 1 7 \times 1 0 [\mu m] \quad \cdots \cdots (1 6)$$

また、 W の上限値を示すグラフは、下記式 (1 7) で示される。

10

20

30

40

50

$$W[\mu\text{m}] = 1.189 \times 10 \times -8.433[\mu\text{m}] \cdots (17)$$

したがって、図16から、前記式(7)で示す関係を満たすことにより、0.85以上の Q_{TEDa} を有する振動素子2が得られることが読み取れる。以上より、式(7)を満足することにより、0.85以上の高い Q_{TEDa} が得られ、振動特性に優れた振動素子2となることが証明される。

なお、図17は、図11において各グラフが $Q_{TEDa} = 0.90$ とクロスする各点をプロットして得られたグラフであり、 $Q_{TEDa} = 0.90$ (Q_{min})である場合における W の関係を示すグラフである。

【0071】

この場合、 W の下限値を示すグラフは、下記式(16')で示される。

$$W = -3.300 \times 10 \times + 3.730 \times 10 [\mu\text{m}] \cdots (16')$$

また、 W の上限値を示すグラフは、下記式(17')で示される。

$$W = 3.302 \times 10 \times -2.333 \times 10 [\mu\text{m}] \cdots (17')$$

したがって、図17から、前記式(7')で示す関係を満たすことにより、0.90以上の Q_{TEDa} を有する振動素子2が得られることが読み取れる。以上より、式(7')を満足することにより、0.90以上の高い Q_{TEDa} が得られ、振動特性に優れた振動素子2となることが証明される。

【0072】

上記のような構成の腕部50、60の先端には、図3に示すように、ハンマーヘッド59、69が設けられている。ハンマーヘッド59は、腕部50よりも幅(X軸方向の長さ)が広く、腕部50からX軸方向の両側へ突出している。また、ハンマーヘッド69は、腕部60よりも幅(X軸方向の長さ)が広く、腕部60からX軸方向の両側へ突出している。

【0073】

ハンマーヘッド59、69を設けることで、振動腕5、6の全長を抑えつつ、振動腕5の先端側の質量を高めることができる。振動腕5、6の全長を抑える、すなわち振動腕5、6の長さ L を短くすることができることにより、振動腕5、6の面内に屈曲振動より変位する振動腕5、6の先端部の変位量を小さくすることができ、振動速度を遅くすることができる。すなわち、ハンマーヘッド59、69を設けることにより、所定の周波数(例えば32.768kHz)で振動させる場合、ハンマーヘッド59、69を設けていないものに比べて、振動速度を遅くすることができる。このように振動速度をより遅くすることができることで、振動素子2に加わる空気抵抗を小さくすることができ、よって、 Q 値の劣化をより低減することができる。

【0074】

また、ハンマーヘッド59、69をも設けることにより、振動素子2の小型化を図ることができる、よって振動子1の小型化が図れる。

さらに、振動腕5、6の全長を一定とした場合、振動腕5、6の先端部にハンマーヘッド59、69を設けることにより低下する屈曲振動の共振周波数を、腕部50、60の幅(X軸方向に沿った長さ)を拡げることによって、ハンマーヘッド59、69を設ける前と同一の共振周波数に維持すれば、屈曲振動時に腕部50、60で発生する熱が、腕部50、60のX軸方向に沿って流れるための経路が長くなるので、前述したように、断熱的領域において熱弾性損失を低減することによって Q 値を向上させ、それと共に CI 値を小さくすることができる。

なお、ハンマーヘッド59、69の表裏主面のうち少なくとも一方には、周波数調整用の錘材料が形成されていてもよい。

【0075】

以下に、振動腕5、6の全長と、ハンマーヘッド59、69の長さの関係について説明する。振動腕5、6は、互いに同様の構成であるため、以下では、振動腕5について代表して説明し、振動腕6については、その説明を省略する。

また、振動素子2では、振動腕5の全長(Y'軸方向の長さ)を L とし、ハンマーヘッ

ド 5 9 の全長 (Y ' 軸方向の長さ) を H としたとき、振動腕 5 は、 $0.183 \text{ H} / \text{L}$ 0.597 なる関係を満足していことが好ましい。このような関係を満足することによって、振動素子 2 に加わる空気抵抗をより小さくすることができ、Q 値の更なる向上を図ることができる。

【 0 0 7 6 】

ここで、本実施形態では、振動腕 5 の基端を、側面 5 4 が基部 4 と接続されている箇所と、側面 5 3 が基部 4 と接続されている箇所を結んだ線分の、振動腕 5 の幅 (X 軸方向の長さ) 中心に位置する箇所に設定している。また、本実施形態では、ハンマーヘッド 5 9 は、腕部 5 0 の幅 (X 軸方向の長さ) に対して 1.5 倍以上の幅を有する領域としている。

10

【 0 0 7 7 】

以下、 $0.183 \text{ H} / \text{L}$ 0.597 なる関係を満足することによって、上記効果を発揮することができることをシミュレーション結果に基づいて証明する。

図 1 8 は、 H / L と規格化値の関係を示すグラフである。図 1 9 は、シミュレーションに用いた振動腕 5 の形状および大きさを示す斜視図である。図 2 0 は、 H / L と高性能化指数 1 との関係を示すグラフである。

【 0 0 7 8 】

図 1 8 には、ハンマーヘッド 5 9 の長さ H と振動腕 5 の共振周波数との関係を指数化した曲線 G 1 と、ハンマーヘッド 5 9 の長さ H と振動腕 5 の Q 値の関係を指数化した曲線 G 2 とが示されている。また、曲線 G 2 で示す Q 値は、熱弾性損失のみを考慮したものである。また、以下では、曲線 G 1 の縦軸を「低周波化指数」とも言い、曲線 G 2 の縦軸を「高 Q 値化指数」とも言う。

20

【 0 0 7 9 】

また、曲線 G 1、G 2 を求めるためのシミュレーションは、1 本の振動腕 5 を用いて行った。本シミュレーションで用いた振動腕 5 は、水晶 Z 板 (回転角 0°) で構成されている。なお、図 1 9 には、互いに直交する 3 つの軸として、X 軸、Y 軸および Z 軸が図示されており、図 1 9 に示す X 軸、Y 軸および Z 軸は、それぞれ、水晶の X 軸 (電気軸)、Y 軸 (機械軸) および Z 軸 (光学軸) に対応している。

【 0 0 8 0 】

図 1 9 に示すように、振動腕 5 のサイズは、全長 L が $1210 \mu\text{m}$ 、厚さ T が $100 \mu\text{m}$ 、腕部 5 0 の幅 W 1 が $98 \mu\text{m}$ 、ハンマーヘッド 5 9 の幅 W 2 が $172 \mu\text{m}$ 、溝 5 5、5 6 の深さ t が共に $45 \mu\text{m}$ 、土手部 5 1 a、5 1 b、5 2 a、5 2 b の幅 W がそれぞれ $6.5 \mu\text{m}$ である。

30

このような振動腕 5 において、ハンマーヘッド 5 9 の長さ H を変化させてシミュレーションを行った。なお、発明者らによって、振動腕 5 のサイズ (L、W、W 1、W 2、T) を変更しても、下記に示すシミュレーション結果と同様の傾向となることが確認されている。

【 0 0 8 1 】

図 1 8 では、曲線 G 1 が規格化値 (低周波化指数) = 1 となる点 ($\text{H} / \text{L} = 0.51$) で、最も振動腕 5 の共振周波数が低下していることを意味しており、曲線 G 2 が規格化値 (高 Q 値化指数) = 1 となる点 ($\text{H} / \text{L} = 0.17$) で、最も振動腕 5 の Q 値が高いことを意味している。振動腕 5 の共振周波数が低い程、振動素子 2 を小型化することができるため、 $\text{H} / \text{L} = 0.51$ (以下「条件 1」とも言う) とすることで、最も振動素子 2 を小型化することができる。また、Q 値を高くする程、熱弾性損失が小さく、優れた振動特性を発揮することができるため、 $\text{H} / \text{L} = 0.17$ (以下「条件 2」とも言う) とすることで、最も優れた振動特性を有する振動素子 2 とすることができる。

40

【 0 0 8 2 】

しかしながら、図 1 8 から分かるように、 $\text{H} / \text{L} = 0.51$ では、高 Q 値化指数が十分に高くなく、 $\text{H} / \text{L} = 0.17$ では、低周波化指数が十分に高くない。したがって、条件 1 を満足するだけでは、優れた振動特性を得ることができず、反対に、条件 2 を満足す

50

るだけでは、振動素子 2 の小型化を十分に図ることができない。

そこで、振動素子 2 の小型化と振動特性の向上とを両立するための指数として「高性能化指数 1」を設定し、高性能化指数 1 と H/L との関係を図 20 に示した。なお、[高性能化指数 1] は、[低周波化指数] \times [高 Q 値化指数] \times [補正值] で表される。また、高性能化指数 1 は、その中で最大であった数値を 1 としたときの指数である。また、前記 [補正值] は、1 本の振動腕 5 で行ったシミュレーションを、2 本の振動腕 5、6 を有する振動素子 2 へ適合させるための補正值である。そのため、補正值を用いることで、高性能化指数 1 をより振動素子 2 の物性に近づけることができる。

【0083】

ここで、高性能化指数 1 が 0.8 以上であれば、十分に、小型化と振動特性の向上とを両立させた振動素子 2 が得られる。そのため、振動素子 2 では、 $0.183 < H/L < 0.597$ なる関係を満足するようにハンマーヘッド 59 の長さ H を設定することが好ましい。また、この範囲の中でも、高性能化指数 1 が 0.9 以上となるように、 $0.238 < H/L < 0.531$ なる関係を満足することがより好ましい。これにより、振動素子 2 に加わる空気抵抗をより小さくすることができ、Q 値の更なる向上を図ることができる。そのため、小型化と振動特性の向上とをさらに両立させた振動素子 2 を得ることができる。

【0084】

また、上述したような違う観点から、振動腕 5 の全長 (Y' 軸方向の長さ) を L とし、ハンマーヘッド 59 の長さ (Y' 軸方向の長さ) を H としたとき、振動腕 5 は、 $0.012 < H/L < 0.30$ なる関係を満足していることが好ましく、 $0.046 < H/L < 0.223$ なる関係を満足しているのがより好ましい。このような関係を満足することによって、振動素子 2 に加わる空気抵抗をより小さくすることができるとともに、振動素子 2 の CI 値を低く抑えられることができ、振動損失がより少なくなる。これにより、Q 値の劣化を低減することができ、優れた振動特性を有する振動素子 2 となる。

【0085】

また、振動腕 5 は、腕部 50 の幅 (X 軸方向の長さ) を $W1$ とし、ハンマーヘッド 59 の幅 (X 軸方向の長さ) を $W2$ としたとき、 $1.5 < W2/W1 < 10.0$ なる関係を満足していることが好ましく、 $1.6 < W2/W1 < 7.0$ なる関係を満足しているのがより好ましい。このような関係を満足することにより、ハンマーヘッド 59 の幅を広く確保することができる。そのため、ハンマーヘッド 59 の長さ H が上述のように比較的短くても (L の 30% 未満であっても)、ハンマーヘッド 59 による質量効果を十分に発揮することができる。したがって、上記関係を満足することによって、振動腕 5 の全長 L が抑えられることができるため、振動素子 2 に加わる空気抵抗に起因した Q 値の劣化をより低減することができる。また、振動素子 2 の小型化をさらに図ることができ、また、ハンマーヘッド 59 の幅が広すぎることによって、屈曲振動時における振動腕 5 の捩れが増大することに起因する振動漏れの増大を低減することができる。

【0086】

このように、振動腕 5 では、 $0.012 < H/L < 0.30$ なる関係と、 $1.5 < W2/W1 < 10.0$ なる関係を満足することによって、これら 2 つの関係の相乗効果によって、小型で、振動素子 2 に加わる空気抵抗をより小さく、CI 値がより抑えられた振動素子 2 が得られる。

なお、 $L = 2 \mu m$ 、好ましくは、 $L = 1 \mu m$ とすることで、携帯型音楽機器や IC カードのようなものに搭載する発振器に使用する、小型な振動素子を得ることができる。また、 $W1 = 100 \mu m$ 、好ましくは、 $W1 = 50 \mu m$ とすることで、上記 L の範囲においても、低消費電力を実現する発振回路に使用する、低周波で共振する振動素子を得ることができる。また、断熱的領域であれば、水晶 Z 板で Y' 方向に振動腕が延び、 X 方向に屈曲振動する場合、 $W1 = 12.8 \mu m$ であることが好ましく、水晶 Z 板で X 方向に振動腕が延び、 Y' 方向に屈曲振動する場合、 $W1 = 14.4 \mu m$ であることが好ましく、水晶 X 板で Y' 方向に振動腕が延び、 Z' 方向に屈曲振動する場合、 $W1 = 15.9 \mu m$ である

ことが好ましい。こうすることによって、確実に断熱的領域にすることができるので、溝の形成により熱弾性損失が減少してQ値が向上し、それと共に溝が形成されている領域で駆動することにより（電界効率が高く、駆動面積が稼げる）CI値が低くなる。

【0087】

以下、 $0.012 < H/L < 0.30$ なる関係と、 $1.5 \leq W2/W1 \leq 10.0$ なる関係とを満足することによって、上記効果を発揮することができることをシミュレーション結果に基づいて証明する。

図21は、実効幅aを説明する斜視図である。図22は、ハンマーヘッド占有率と低R1化指数の関係を示すグラフである。また、下記の表1は、ハンマーヘッド59の長さHを変化させたときのCI値の変化を示す表である。

【0088】

また、本シミュレーションは、図19に示すような、1本の振動腕5を用いて行った。なお、発見者らによって、振動腕5のサイズ（L、W、W1、W2、T）を変更しても、下記に示すシミュレーション結果と同様の傾向となることが確認されている。

本シミュレーションでは、次のようにして、各サンプルのCI値を算出している。まず、有限要素法によって、熱弾性損失のみを考慮したQ値を求める。次に、Q値は、周波数依存性を有しているため、求められたQ値を32.768kHz時のQ値（F変換後Q値）に換算する。次に、F変換後Q値に基づいて、R1（CI値）を算出する。なお、Q値が十分に高い場合（例えば1万以上）には、等価直列抵抗R1とクリスタルインピーダンスCIは略等しいので、本発明では同一視している。次に、CI値も周波数依存性を有しているため、求められたR1を32.768kHz時のR1に換算し、その逆数をとって「低R1指数」とした。低R1指数は、全てのシミュレーションの中で最大であった逆数を1としたときの指数である。したがって、低R1指数が1に近い程、CI値が小さいことを意味している。図22（a）に、横軸にハンマーヘッド占有率（H/L）、縦軸に低R1化指数をプロットしたグラフを示し、図22（b）に同図（a）の一部を拡大したグラフを示す。

【0089】

なお、Q値をF変換後Q値へ換算する方法は、次の通りである。

下記式（18）、（19）を用いて次のような計算を行った。

$$f_0 = k / (2 C_p a^2) \dots (18)$$

$$Q = \{ C_p / (C^2 H) \} \times [\{ 1 + (f / f_0)^2 \} / (f / f_0)] \dots (19)$$

ただし、式（18）、（19）中の ω は円周率、kは振動腕5の幅方向の熱電導率、 ρ は質量密度、 C_p は熱容量、Cは振動腕5の長さ方向の伸縮の弾性スティフネス定数、 α は振動腕5の長さ方向の熱膨張率、Hは絶対温度、fは固有周波数である。また、aは、振動腕5を図21に示すような平板形状として見做したときの幅（実効幅）である。なお、図21では、振動腕5に溝55、56が形成されていないが、この際のaの値を用いてもF変換後Q値への換算を行うことができる。

【0090】

まず、シミュレーションで用いた振動腕5の固有周波数をF1とし、求められたQ値をQ1とし、式（18）、（19）を用いて、 $f = F1$ 、 $Q = Q1$ となるようなaの値を求める。次に、求められたaを用い、また、 $f = 32.768 \text{ kHz}$ とし、式（19）からQの値を算出する。このようにして得られたQ値がF変換後Q値となる。

【0091】

【表 1】

表 1

	H/L	固有周波数 f1[Hz]	Q1	F 変換後 Q 値	R1 [Ω]	1/R1	低 R1 指 数
SIM001	0.6%	7.38E+04	159,398	76,483	3.50E+03	1.270E-04	0.861
SIM002	3.3%	5.79E+04	135,317	76,606	4.15E+03	1.363E-04	0.923
SIM003	6.0%	4.99E+04	120,906	79,442	4.58E+03	1.435E-04	0.972
SIM004	8.6%	4.48E+04	111,046	81,157	4.98E+03	1.467E-04	0.994
SIM005	11.2%	4.13E+04	103,743	82,223	5.37E+03	1.476E-04	1.000
SIM006	13.9%	3.88E+04	98,038	82,843	5.74E+03	1.471E-04	0.997
SIM007	16.5%	3.68E+04	93,507	83,225	6.10E+03	1.458E-04	0.988
SIM008	19.8%	3.49E+04	88,856	83,328	6.56E+03	1.430E-04	0.969
SIM009	23.1%	3.35E+04	85,017	83,115	7.02E+03	1.393E-04	0.944
SIM010	26.4%	3.24E+04	81,772	82,657	7.50E+03	1.348E-04	0.914
SIM011	29.8%	3.16E+04	78,811	81,824	8.01E+03	1.296E-04	0.878
SIM012	33.1%	3.09E+04	76,247	80,864	8.56E+03	1.239E-04	0.839
SIM013	36.4%	3.04E+04	73,813	79,591	9.17E+03	1.176E-04	0.796
SIM014	39.7%	3.00E+04	71,409	77,963	9.87E+03	1.106E-04	0.749
SIM015	43.0%	2.98E+04	69,077	76,078	1.07E+04	1.032E-04	0.699
SIM016	46.3%	2.96E+04	66,818	73,978	1.16E+04	9.557E-05	0.648
SIM017	49.6%	2.95E+04	64,449	71,494	1.27E+04	8.750E-05	0.593
SIM018	52.9%	2.96E+04	62,042	68,733	1.40E+04	7.928E-05	0.537
SIM019	56.2%	2.97E+04	59,670	65,800	1.55E+04	7.104E-05	0.481
SIM020	59.5%	3.00E+04	57,018	62,370	1.75E+04	6.257E-05	0.424
SIM021	62.8%	3.03E+04	54,502	58,918	1.98E+04	5.447E-05	0.369
SIM022	66.1%	3.08E+04	51,676	54,983	2.29E+04	4.640E-05	0.314
SIM023	69.4%	3.14E+04	48,788	50,857	2.69E+04	3.871E-05	0.262
SIM024	72.7%	3.23E+04	45,699	46,416	3.23E+04	3.140E-05	0.213
SIM025	76.0%	3.33E+04	42,398	41,687	4.00E+04	2.461E-05	0.167
SIM026	79.3%	3.47E+04	39,084	36,902	5.08E+04	1.857E-05	0.126
SIM027	82.6%	3.65E+04	35,523	31,872	6.77E+04	1.325E-05	0.090
SIM028	85.5%	3.86E+04	32,226	27,387	9.12E+04	9.314E-06	0.063
SIM029	88.3%	4.13E+04	28,763	22,842	1.31E+05	6.056E-06	0.041
SIM030	91.1%	4.50E+04	24,918	18,132	2.11E+05	3.448E-06	0.023
SIM031	93.9%	5.07E+04	21,042	13,614	4.04E+05	1.602E-06	0.011

10

20

30

40

【 0 0 9 2 】

発明者らは、低 R 1 化指数が 0.87 以上となる振動素子 2 を求めている。表 1 および図 22 のグラフから分かるように、 $0.012 < H/L < 0.30$ なる関係を満足するもの (SIM002 ~ SIM011) では低 R 1 化指数が目標の 0.87 以上となっている。特に、 $0.046 < H/L < 0.223$ なる関係を満足するもの (SIM003 ~ SIM008) では低 R 1 化指数が 0.95 を超えており、より C I 値が低くなっていることが分かる。以上のシミュレーション結果から、 $0.012 < H/L < 0.30$ なる関係を満足することにより、C I 値がより抑えられている振動素子 2 が得られることが証明され

50

た。

以上のような構成の振動素子 2 は、導電性接着剤 11 を介してパッケージ 9 のベース 91 に固定されている（図 2 参照）。以下、パッケージ 9 について説明する。

【0093】

《パッケージ》

図 1 および図 2 に示すように、パッケージ 9 は、上面に開放する凹部 911 を有する箱状のベース 91 と、凹部 911 の開口を塞ぐようにベース 91 に接合されている板状のリッド 92 とを有している。このようなパッケージ 9 は、凹部 911 がリッド 92 にて塞がれることにより形成された収容空間 A を有しており、この収容空間 A に振動素子 2 が気密的に収納されている。すなわち、ベース 91 とリッド 92 とによって画成された収容空間 A は、振動素子 2 を収容する収容部として機能している。なお、収容空間 A 内は、窒素、ヘリウム、アルゴン等の不活性ガスが封入されていてもよい。

10

また、凹部 911 には、段差部 912 が設けられており、振動素子 2 は、基部 4 の第 2 基部 42 にて、例えば、エポキシ系、アクリル系の樹脂に導電性フィラーを混合した導電性接着剤 11 を介して段差部 912 に固定されている。

【0094】

ベース 91 の構成材料としては、特に限定されないが、酸化アルミニウム等の各種セラミックスを用いることができる。また、リッド 92 の構成材料としては、特に限定されないが、ベース 91 の構成材料と線膨張係数が近似する部材であると良い。例えば、ベース 91 の構成材料を前述のようなセラミックスとした場合には、コパール等の合金とするのが好ましい。なお、ベース 91 とリッド 92 の接合は、特に限定されず、例えば、接着剤を介して接合してもよいし、シーム溶接等により接合してもよい。

20

【0095】

また、ベース 91 の段差部 912 には、接続端子 951、961 が形成されている。図示しないが、振動素子 2 の第 1 駆動用電極 84 は、基部 4 の第 2 基部 42 まで引き出されており、当該部分にて、導電性接着剤 11 を接続端子 951 と電氣的に接続されている。同様に、図示しないが、振動素子 2 の第 2 駆動用電極 85 は、基部 4 の第 2 基部 42 まで引き出されており、当該部分にて、導電性接着剤 11 を介して接続端子 961 と電氣的に接続されている。

【0096】

30

また、接続端子 951 は、ベース 91 を貫通する貫通電極（図示せず）を介してベース 91 の底面に形成された外部端子（図示せず）に電氣的に接続されており、接続端子 961 は、ベース 91 を貫通する貫通電極（図示せず）を介してベース 91 の底面に形成された外部端子（図示せず）に電氣的に接続されている。

接続端子 951、961、貫通電極および外部端子の構成としては、それぞれ、導電性を有していれば、特に限定されないが、例えば、Cr（クロム）、W（タングステン）などのメタライズ層（下地層）に、Ni（ニッケル）、Au（金）、Ag（銀）、Cu（銅）などの各被膜を積層した金属被膜で構成することができる。

【0097】

40

ここで、前述したように、振動子 1 は、振動素子 2 が備える振動腕 5、6 が互いに接近、離間を繰り返すように面内方向（XY' 平面方向）に所定の周波数で振動する。しかしながら、振動素子 2 が収容されているパッケージ 9 内の空気抵抗（空気が有する粘性）の大きさによっては、振動子 1（振動素子 2）の Q 値が劣化すると共に、CI 値が増加してしまう。

【0098】

そこで、本発明では、収容空間 A の減圧の程度（真空度）、すなわち、パッケージ 9 内の気圧（圧力）を、100Pa 以下とした。これにより、振動素子 2 に加わる空気抵抗を小さくすることができる。そのため、パッケージ 9 内の空気抵抗に起因する振動子 1（振動素子 2）の Q 値の劣化を低減することができ、それに伴って CI 値の増加を抑制することができる。これにより、Q 値の向上を図ることができ、振動子 1 の振動特性を安定させ

50

ることができる。

また、パッケージ 9 内の気圧は、 100 Pa 以下であれば、特に限定されないが、さらに、 10 Pa 以下であることが好ましい。これにより、振動素子 2 に加わる空気抵抗をさらに小さくすることができ、 Q 値の更なる向上を図ることができる。

【0099】

また、パッケージ 9 内の気圧は、さらに、 7×10^{-4} 以上であることが好ましい。これにより、パッケージ 9 内とパッケージ 9 外との気圧の違いにより生じるパッケージ 9 の不本意な反りや撓み、およびこれらに起因するクラックの発生等を低減することができる。そのため、より信頼性の高い振動子 1 を得ることができる。また、パッケージ 9 内の気圧が上記数値と下回っても、振動素子 2 に加わる空気抵抗に起因する Q 値の劣化を低減する効果のそれ以上の向上は期待できないばかりか、振動子 1 の生産性が低下するおそれがある。

10

【0100】

このようなことから、パッケージ 9 内の気圧は、 100 Pa 以下であれば、特に限定されないが、 $7 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 以上 10 Pa 以下の範囲にあることがより好ましく、さらには、 $7 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 以上 1 Pa 以下の範囲にあることが好ましく、 $7 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 以上 10^{-1} Pa 以下であることが最も好ましい。このような関係を満足することによって、パッケージ 9 の不本意な反りや撓み等の発生を低減することができるとともに、振動素子 2 に加わる空気抵抗に起因する Q 値の劣化をさらに低減することができる。そのため、上記関係を満足することにより、振動特性に特に優れ、信頼性が特に高い振動子 1 となる。

20

【0101】

以下、パッケージ 9 内の気圧が 100 Pa 以下であることによって、上記効果を発揮することができることを、パッケージ 9 内の気圧に対する Q 値 (Qv^{-1}) について検討した結果に基づいて証明する。

図 23 は、 Qv^{-1} と気圧との関係を検討に用いた振動素子 2 の形状および大きさを示す平面図である。図 24 は、 Qv^{-1} と気圧との関係を示すグラフである。図 25 は、等価直列抵抗値 $R1$ と気圧との関係を示すグラフである。

【0102】

図 24 に示すグラフの横軸は、圧力 [Pa] を示し、縦軸は、 Qv^{-1} (空気抵抗のみを考慮した Q 値の逆数) を示している。図 25 に示すグラフの横軸は、圧力 [Pa] を示し、縦軸は、 CI 値 ($R1$) [k] を示している。

30

本検討は、図 23 に示すような振動素子 2 を用い、この振動素子 2 をパッケージ 9 内に収容した振動子 1 を用いた。

【0103】

本検討に用いた振動素子 2 の各寸法は以下のとおりである。水晶基板 3 の長手方向の長さ (水晶基板 3' の Y' 方向の長さ) が、 $2200\text{ }\mu\text{m}$ であり、水晶基板 3 の短手方向の長さ (基部 4 の X 方向の長さ) が $503\text{ }\mu\text{m}$ である。また、第 1 基部 41 の Y' 方向の長さが $286\text{ }\mu\text{m}$ であり、第 2 基部 42 の Y' 方向の長さが $145\text{ }\mu\text{m}$ であり、連結部 43 の長さが $237\text{ }\mu\text{m}$ である。また、腕部 50、60 の長さ (Y' 方向の長さ) が、それぞれ $896\text{ }\mu\text{m}$ であり、ハンマーヘッド 59、69 の長さ (Y' 方向の長さ) が、それぞれ $671\text{ }\mu\text{m}$ である。また、ハンマーヘッド 59 と腕部 50 の境界部、およびハンマーヘッド 69 と腕部 60 の境界部の長さ (Y' 方向の長さ) が、それぞれ $52\text{ }\mu\text{m}$ である。また、腕部 50、60 の幅 (X 方向の長さ) $W1$ が、それぞれ $130 \sim 141\text{ }\mu\text{m}$ であり、ハンマーヘッド 59、69 の幅 (X 方向の長さ) $W2$ が、それぞれ $215\text{ }\mu\text{m}$ である。また、土手部の幅 W は、それぞれ、 $15 \sim 30\text{ }\mu\text{m}$ である。また、水晶基板 3 の厚さ T は、 $120\text{ }\mu\text{m}$ であり、溝 55、56、65、66 の深さは、それぞれ $50\text{ }\mu\text{m}$ である。また、電極形成領域 551、561、651、661 の長さ (Y' 方向の長さ) が、 $610\text{ }\mu\text{m}$ である。

40

【0104】

50

なお、発見者らによって、振動素子 2 のサイズ (L、W、W 1、W 2、T) を変更しても、下記に示す結果と同等の傾向となることが確認されている。また、発見者らによって、電極未形成領域 5 5 2、5 6 2、6 5 2、6 6 2 を有しておらず、溝 5 5、5 6、6 5、6 6 の内面全体に励振電極が設けられている場合にであっても、下記に示す結果と同等の傾向となることが確認されている。

【 0 1 0 5 】

本検討では、次のようにして、パッケージ 9 内の気圧に対する $Q v^{-1}$ を算出している。まず、パッケージ 9 内 (収容空間 A) の気圧を変更し、各気圧における Q (実測した Q 値) を実測した。また、真空度が十分高い (気圧が十分低い) 場合には、空気抵抗は、ほぼないものと考えられるため、この状態における空気抵抗による損失はないものとし、その際の Q 値を Q_0 とした。すなわち、真空度を高くしていき、 Q 値が飽和したときの Q 値を Q_0 (飽和した Q 値) とした。したがって、 Q (実測した Q 値) と、 Q_0 (飽和した Q 値) とから、 $Q v$ (各気圧における空気抵抗のみを考慮した Q 値) は、下記式 (2 0) によって表すことができる。

$$Q^{-1} = Q v^{-1} + Q_0^{-1} \cdots (20)$$

式 (2 0) 中の Q^{-1} は Q (実測した Q 値) の逆数、 Q_0^{-1} は Q_0 (飽和した Q 値) の逆数、 $Q v^{-1}$ は (各気圧における空気抵抗のみを考慮した Q 値) の逆数である。

【 0 1 0 6 】

なお、パッケージ 9 内 (収容空間 A) の気圧は、以下のようにして実測することができる。まず、真空チャンバー (図示せず) 内に振動子 1 を入れ、振動子 1 の C I 値を測定する。次に、振動子 1 のパッケージ 9 を開封して真空チャンバー内に振動子 1 を入れ、C I 値を計測しながら、真空チャンバー内の真空度を上げていき、パッケージ 9 を開封する前に測定した振動子 1 の C I 値と同じ値になったときの真空度を読み取る。このパッケージ 9 を開封した後の振動子 1 の C I 値と、パッケージ 9 を開封する前の振動子 1 の C I 値とからパッケージ 9 内の気圧を算出することができる。なお、表 2 に記載した本検討においては、振動子 1 のパッケージ 9 を開封した状態で真空チャンバー内に振動子 1 を入れ、真空チャンバー内の真空度を表 2 に記載した所定の気圧にした状態で、 Q 値を計測した。

表 2 に、各気圧 [Pa] における Q (実測した Q 値)、 $Q v$ (空気抵抗のみを考慮した Q 値)、および $Q v^{-1}$ (空気抵抗のみを考慮した Q 値の逆数) を示す。また、表 2 を基にして、各気圧 [Pa] における $Q v^{-1}$ をプロットしたものを図 2 4 に示す。

【 0 1 0 7 】

【 表 2 】

表 2

気圧 [Pa]	Q	Qv	Qv^{-1}
100000	3,174	3,492	2.9E-04
29000	5,253	6,184	1.6E-04
10000	6,448	7,909	1.3E-04
2900	7,167	9,018	1.1E-04
810	8,906	11,956	8.4E-05
240	11,670	17,530	5.7E-05
100	18,507	39,380	2.5E-05
50	23,354	70,532	1.4E-05
8.3	27,362	126,479	7.9E-06
3.7	33,214	681,788	1.5E-06
0.75	34,758	7,704,898	1.3E-07
0.0036	34,916		
0.00095	34,915		

【 0 1 0 8 】

図 2 4 に示すグラフから分かるように、気圧が低く (真空度が高く) なるほど $Q v^{-1}$ が小さくなっており、気圧が 1 0 0 [Pa] 以下のとき、 $Q v^{-1}$ が特に小さくなってい

ることが分かる。 Q_v^{-1} は、 Q_v （各気圧における空気抵抗のみを考慮した Q 値）の逆数であり、図24中の Q_v^{-1} が低いほど、 Q 値の劣化を低減することができるといえる。したがって、図24のグラフから分かるように、パッケージ9内の気圧が100 [Pa]以下であると、振動素子2に加わる空気抵抗をさらに小さくすることができ、 Q 値の更なる向上を図ることができることが証明された。

また、上記に記載した方法により、今度はパッケージ9内の気圧に対する CI 値（ R_1 ）[k]を計測した結果をプロットしたものを図25に示す。

【0109】

図25に示すグラフから、気圧が低く（真空度が高く）なるほど、 R_1 が小さくなっており、気圧が100 [Pa]以下のとき、 R_1 が特に小さくなっている。特に、気圧が10 [Pa]以下のとき、 R_1 がさらに小さくなっていることが分かる。 CI 値（ R_1 ）は、振動素子2に加わる空気抵抗と対応しており、図25中の CI 値（ R_1 ）が低いほど、 Q 値の劣化を低減することができるといえる。したがって、図25のグラフからも分かるように、パッケージ9内の気圧が100 [Pa]以下であると、振動素子2に加わる空気抵抗をさらに小さくすることができ、 Q 値の更なる向上を図ることができることが証明された。特に、気圧が10 [Pa]以下であると、振動素子2に加わる空気抵抗をさらに小さくすることができ、さらに気圧が1 [Pa]以下であると、振動素子2に加わる空気抵抗をさらに小さくすることができ、最も好ましくは気圧が 10^{-1} [Pa]以下であると、振動素子2に加わる空気抵抗がさらに小さくすることができ、それが証明された。

また、図17の R_1 の値からパッケージ内の気圧の下限値としては 7×10^{-4} Paであれば十分であり、それ以上に気圧を低下させても、 R_1 の値が飽和していることが観測された。従って、パッケージの封止工程においては、気圧を 7×10^{-4} Paより低下させて真空度を上げていっても、時間的なロスと作業上のコストアップの要因になることが判明した。ゆえに、真空度の程度として、気圧の下限値は 7×10^{-4} Paであれば十分であることが分かった。

【0110】

2. 発振器

次いで、本発明の振動子を適用した発振器（本発明の発振器）について説明する。

図26は、本発明の発振器の一例を示す断面図である。

図26に示す発振器10は、振動素子2と、振動素子2を駆動するためのICチップ（チップ部品）80とを有している。以下、発振器10について、前述した振動子との相違点を中心に説明し、同様の事項については、その説明を省略する。

【0111】

パッケージ9Aは、凹部911Aを有する箱状のベース91Aと、凹部911Aの開口を塞ぐ板状のリッド92とを有している。

ベース91Aの凹部911Aには、段差部912Aが設けられている。

段差部912Aには、接続端子（図示せず）が形成されている。また、凹部911Aの底面（段差部912Aよりも底側の面）には、ICチップ80が配置されている。ICチップ80は、振動素子2の駆動を制御するための駆動回路（発振回路）を有している。ICチップ80によって振動素子2を駆動すると、所定の周波数の信号を取り出すことができる。

【0112】

また、凹部911Aの底面には、ワイヤーを介してICチップ80と電氣的に接続された複数の内部端子（図示せず）が形成されている。これら複数の内部端子には、ベース91Aに形成された図示しないビアを介してパッケージ9Aの底面に形成された外部端子（図示せず）に電氣的に接続された端子と、図示しないビアやワイヤーを介して接続端子（図示せず）に電氣的に接続された端子とが含まれている。

なお、図26の構成では、ICチップ80が収容空間内に配置されている構成について説明したが、ICチップ80の配置は、特に限定されず、例えば、パッケージ9Aの外側（ベースの底面）に配置されていてもよい。

10

20

30

40

50

このような発振器 10 によれば、優れた信頼性を発揮することができる。

【0113】

3. 電子機器

次いで、本発明の振動子を適用した電子機器（本発明の電子機器）について、図 27～図 29 に基づき、詳細に説明する。

図 27 は、本発明の振動子を備える電子機器を適用したモバイル型（またはノート型）のパーソナルコンピュータの構成を示す斜視図である。この図において、パーソナルコンピュータ 1100 は、キーボード 1102 を備えた本体部 1104 と、表示部 100 を備えた表示ユニット 1106 とにより構成され、表示ユニット 1106 は、本体部 1104 に対しヒンジ構造部を介して回動可能に支持されている。このようなパーソナルコンピュータ 1100 には、フィルター、共振器、基準クロック等として機能する振動子 1 が内蔵されている。

10

【0114】

図 28 は、本発明の振動子を備える電子機器を適用した携帯電話機（PHS も含む）の構成を示す斜視図である。この図において、携帯電話機 1200 は、複数の操作ボタン 1202、受話口 1204 および送話口 1206 を備え、操作ボタン 1202 と受話口 1204 との間には、表示部 100 が配置されている。このような携帯電話機 1200 には、フィルター、共振器等として機能する振動子 1 が内蔵されている。

【0115】

図 29 は、本発明の振動子を備える電子機器を適用したデジタルスチルカメラの構成を示す斜視図である。なお、この図には、外部機器との接続についても簡易的に示されている。ここで、通常のカメラは、被写体の光像により銀塩写真フィルムを感光するのに対し、デジタルスチルカメラ 1300 は、被写体の光像を CCD（Charge Coupled Device）などの撮像素子により光電変換して撮像信号（画像信号）を生成する。

20

【0116】

デジタルスチルカメラ 1300 におけるケース（ボディー）1302 の背面には、表示部が設けられ、CCD による撮像信号に基づいて表示を行う構成になっており、表示部は、被写体を電子画像として表示するファインダとして機能する。また、ケース 1302 の正面側（図中裏面側）には、光学レンズ（撮像光学系）や CCD などを含む受光ユニット 1304 が設けられている。

30

【0117】

撮影者が表示部に表示された被写体像を確認し、シャッターボタン 1306 を押下すると、その時点における CCD の撮像信号が、メモリー 1308 に転送・格納される。また、このデジタルスチルカメラ 1300 においては、ケース 1302 の側面に、ビデオ信号出力端子 1312 と、データ通信用の入出力端子 1314 とが設けられている。そして、図示されるように、ビデオ信号出力端子 1312 にはテレビモニター 1430 が、データ通信用の入出力端子 1314 にはパーソナルコンピュータ 1440 が、それぞれ必要に応じて接続される。さらに、所定の操作により、メモリー 1308 に格納された撮像信号が、テレビモニター 1430 や、パーソナルコンピュータ 1440 に出力される構成になっている。このようなデジタルスチルカメラ 1300 には、フィルター、共振器等として機能する振動子 1 が内蔵されている。

40

【0118】

なお、本発明の振動子を備える電子機器は、図 27 のパーソナルコンピュータ（モバイル型パーソナルコンピュータ）、図 28 の携帯電話機、図 29 のデジタルスチルカメラの他にも、例えば、インクジェット式吐出装置（例えばインクジェットプリンター）、ラップトップ型パーソナルコンピュータ、テレビ、ビデオカメラ、ビデオテープレコーダー、カーナビゲーション装置、ページャー、電子手帳（通信機能付も含む）、電子辞書、電卓、電子ゲーム機器、ワードプロセッサ、ワークステーション、テレビ電話、防犯用テレビモニター、電子双眼鏡、POS 端末、医療機器（例えば電子体温計、血圧計、血糖計、心電図計測装置、超音波診断装置、電子内視鏡）、魚群探知機、各種測定機器、

50

計器類（例えば、車両、航空機、船舶の計器類）、フライトシュミレーター等に適用することができる。

【0119】

4. 移動体

次いで、本発明の振動子を適用した移動体について、図30に基づき、詳細に説明する。

図30は、本発明の振動子を備える電子機器を適用した移動体（自動車）の構成を示す斜視図である。この図において、移動体1500は、車体1501と、4つの車輪1502とを有しており、車体1501に設けられた図示しない動力源（エンジン）によって車輪1502を回転させるように構成されている。このような移動体1500には、発振器10（振動素子2）が内蔵されている。

10

このような電子機器によれば、優れた信頼性を発揮することができる。

なお、発明の振動素子を備える移動体は、自動車に限定されず、例えば、オートバイ、鉄道等の他の車両、航空機、船舶、宇宙船等にも適用可能である。

【0120】

以上、本発明の振動子、発振器、電子機器および移動体について図示の実施形態に基づいて説明したが、本発明は、これに限定されるものではなく、各部の構成は、同様の機能を有する任意の構成のものに置換することができる。また、本発明に、他の任意の構成物が付加されていてもよい。また、各実施形態を適宜組み合わせてもよい。

また、振動素子としては、発振器に限定されず、例えば、ジャイロセンサーのようなセンサーにも適用することができる。

20

【0121】

また、前記実施形態では、水晶を用いた振動素子について説明したが、振動素子は水晶を用いたものに限定されず、Si、チタン酸バリウム、チタン酸鉛、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT：Pb(Zr, Ti)O₃）、ニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム等を用いたものでもよい。また更に、屈曲振動の駆動方式も圧電駆動型に限定されず、静電駆動型であっても良いことは言うまでもない。

【符号の説明】

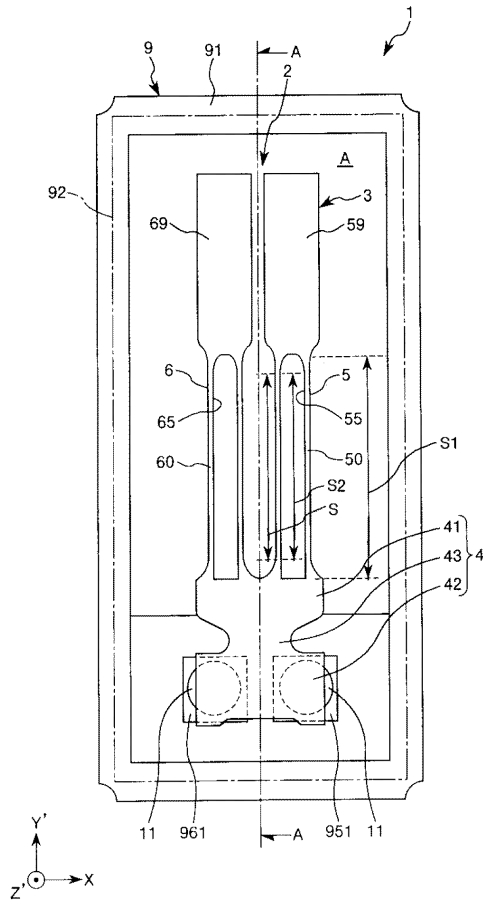
【0122】

1	振動子	2	振動素子	3	水晶基板	4	基部	5	振動腕	6		
振動腕	9	パッケージ	9A	パッケージ	10	発振器	11	導電性接着				
剤	41	第1基部	42	第2基部	43	連結部	59、69	ハンマーヘ				
ッド	55、56、65、66	溝	51、52	主面	53、54	側面	50					
、60	腕部	61、62	主面	63、63	側面	51a、51b、52a、						
53b	土手部	80	ICチップ	84	第1駆動用電極	85	第2駆動用					
電極	91	ベース	91A	ベース	92	リッド	100	表示部	151			
弾性棒	152	弾性棒	154	回転体	155	回転軸	156	回転				
体	157	回転軸	158	連結部（第1の連結部）	159	連結部（第2の						
連結部）	160	連結部（第3の連結部）	167	基部	168	基部	16					
9	第4の連結部	411	縮幅部	551、561、651、661	電極形成							
領域	552、562、652、662	電極未形成領域	911	凹部	911A							
凹部	912	段差部	912A	段差部	951、961	接続端子	11					
00	パーソナルコンピューター	1102	キーボード	1104	本体部	1						
106	表示ユニット	1200	携帯電話機	1202	操作ボタン	1204						
受話口	1206	送話口	1300	デジタルスチルカメラ	1302							
ケース	1304	受光ユニット	1306	シャッターボタン	1308	メモ						
リー	1312	ビデオ信号出力端子	1314	入出力端子	1430	テレビ						
モニター	1440	パーソナルコンピューター	1500	移動体	1501							
車体	1502	車輪	AA	領域	A	収容空間	S、S1、S2	領域				

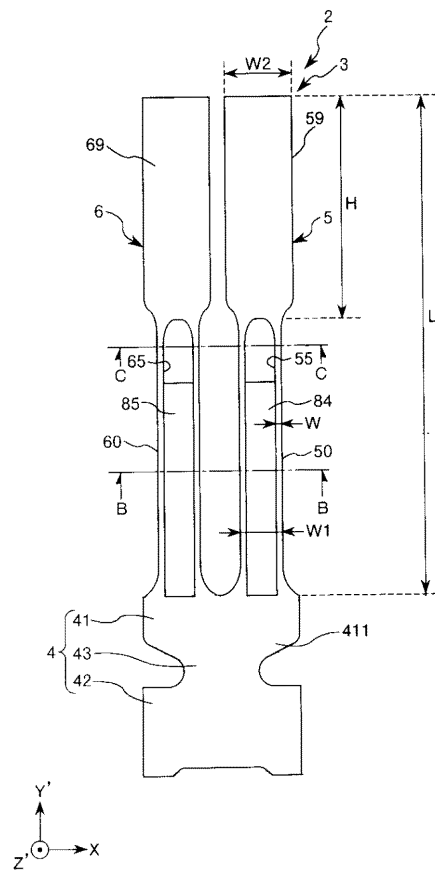
30

40

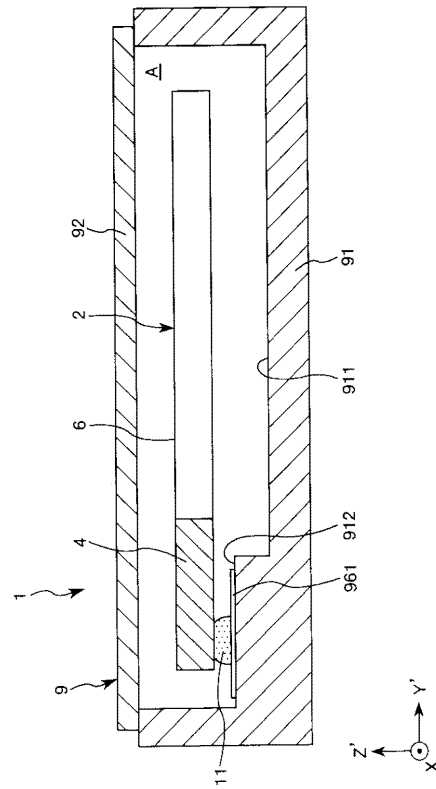
【図 1】



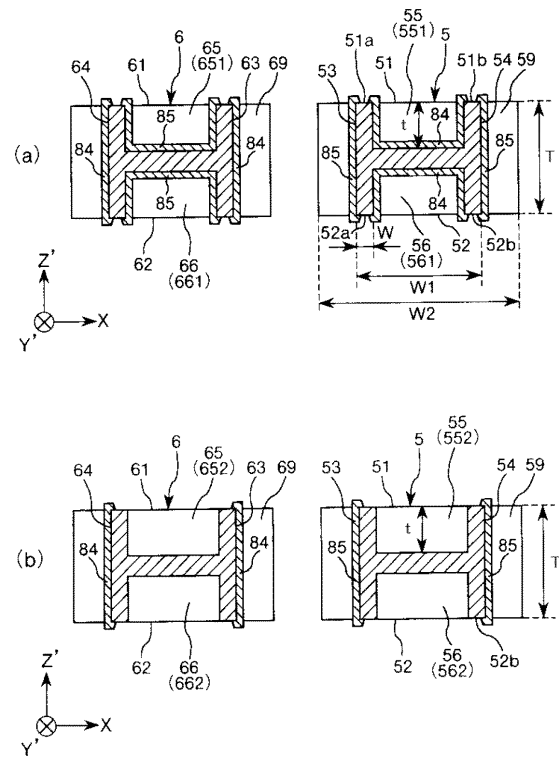
【図 3】



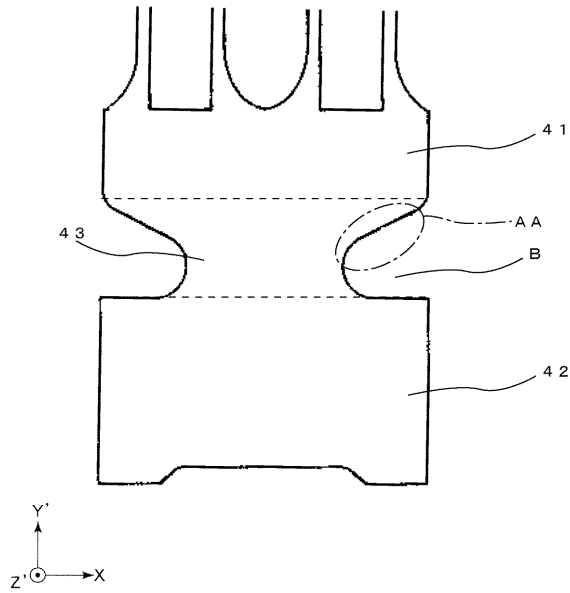
【図 2】



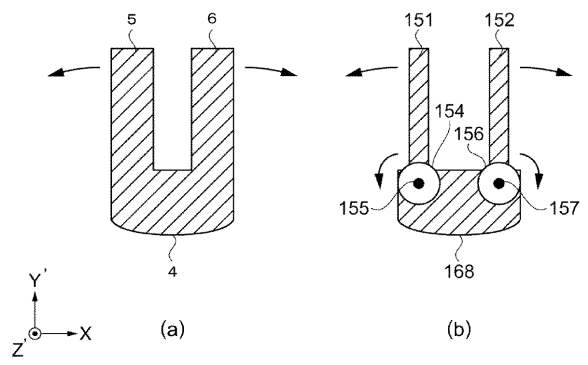
【図 4】



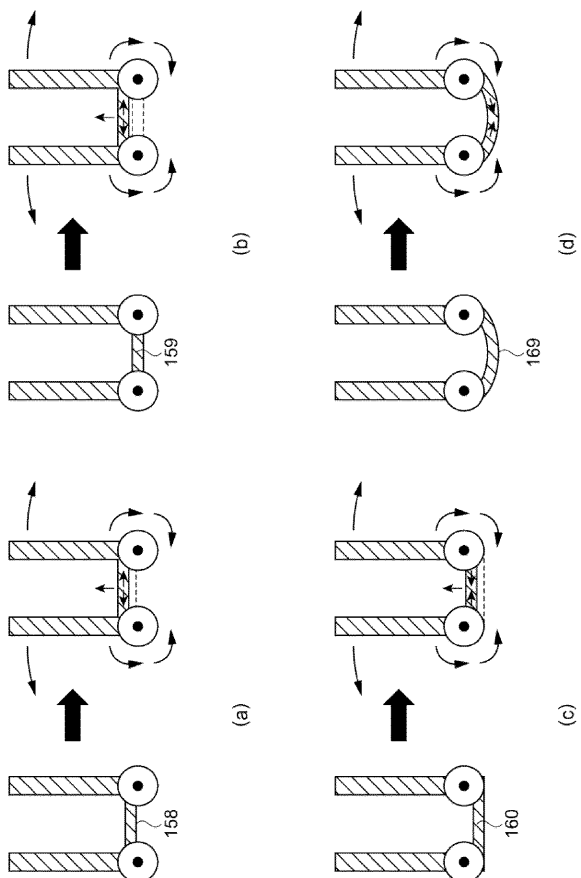
【図 5】



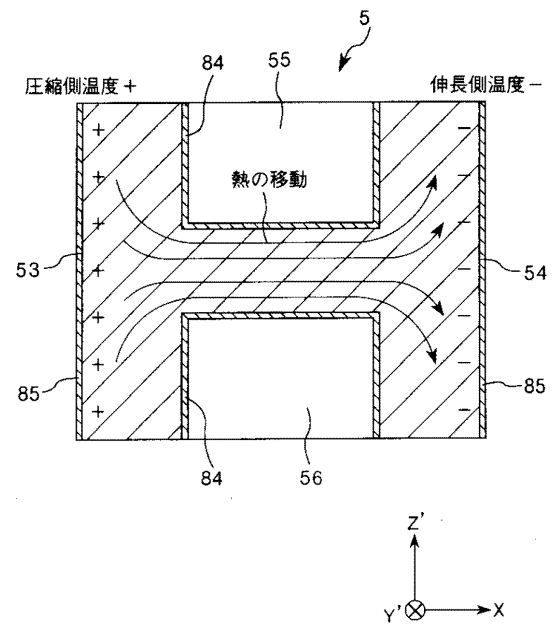
【図 6】



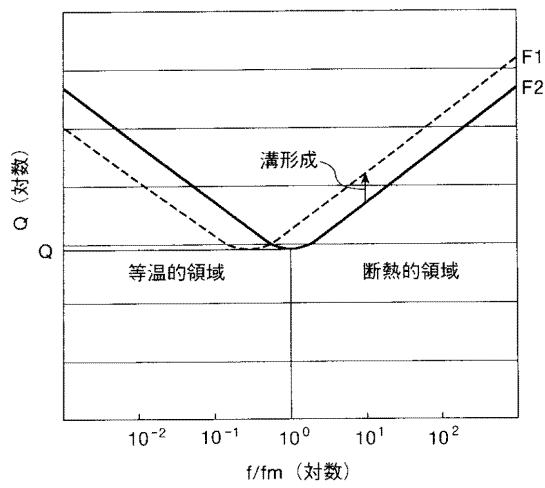
【図 7】



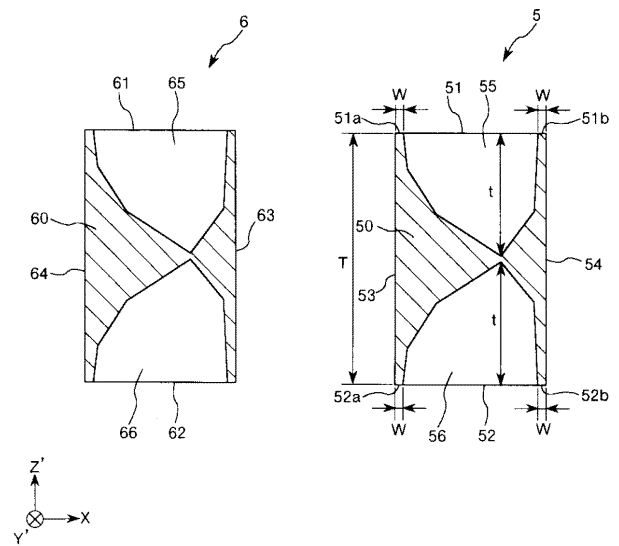
【図 8】



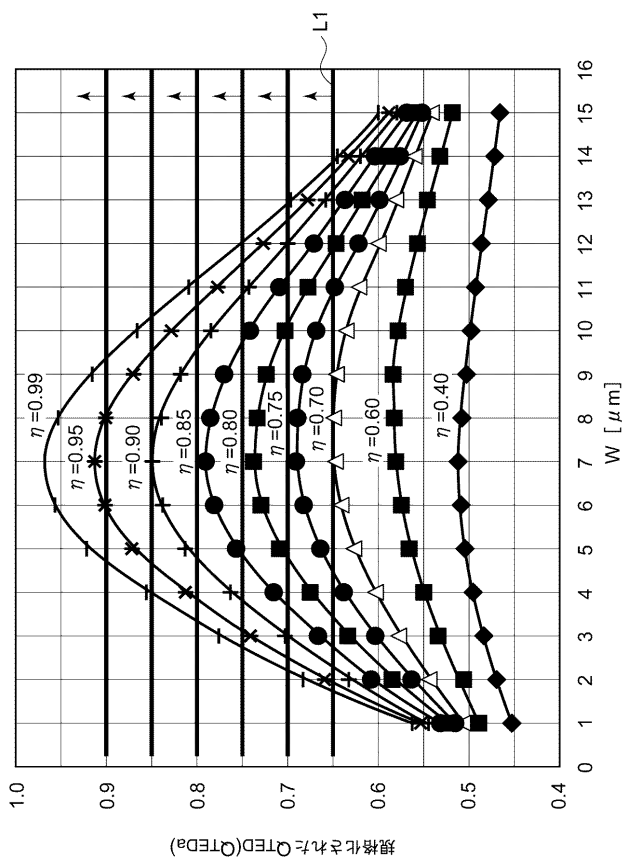
【図 9】



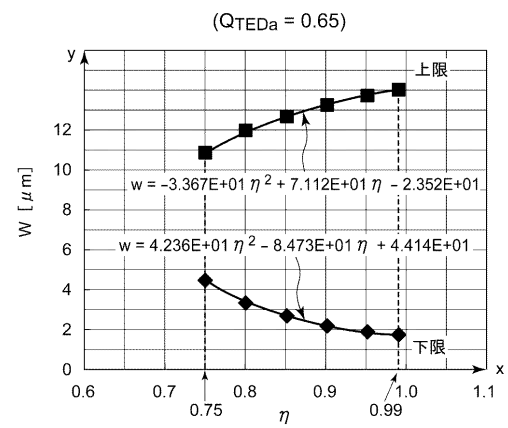
【図 10】



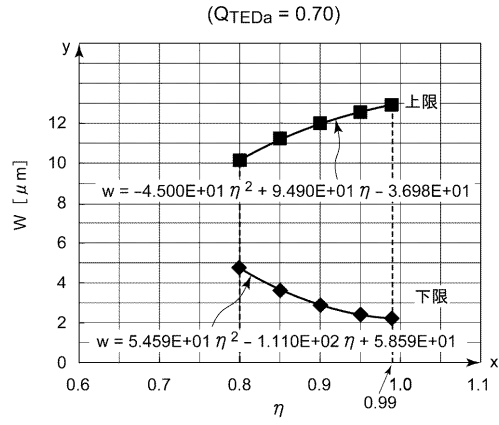
【図 11】



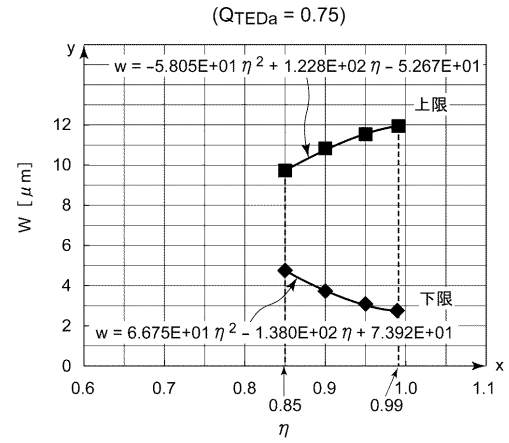
【図 12】



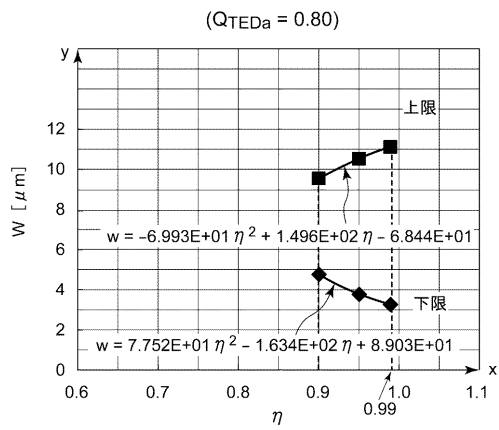
【図 1 3】



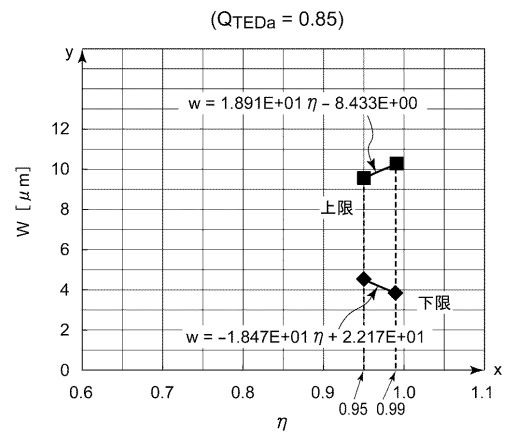
【図 1 4】



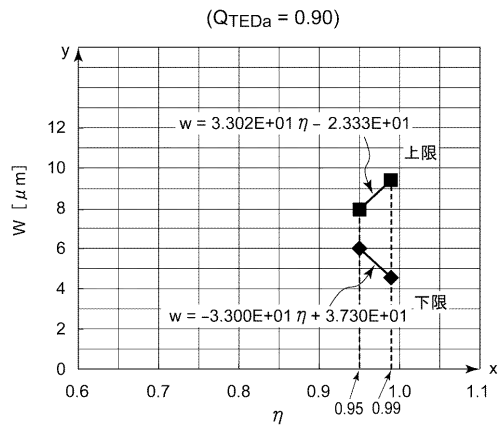
【図 1 5】



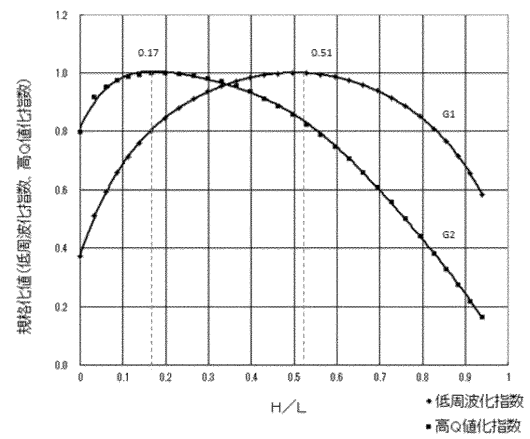
【図 1 6】



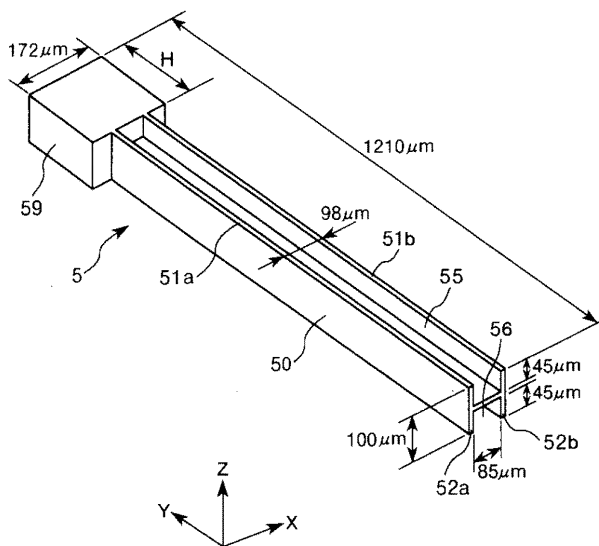
【図 17】



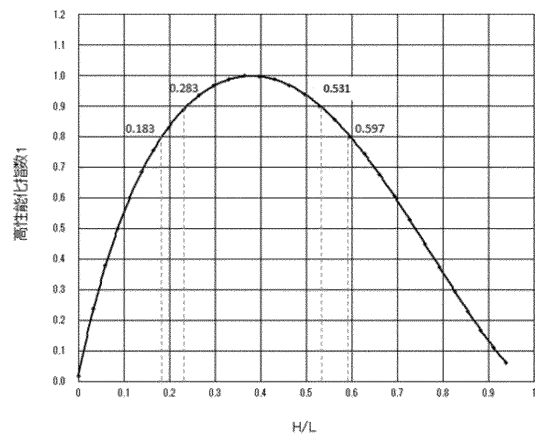
【図 18】



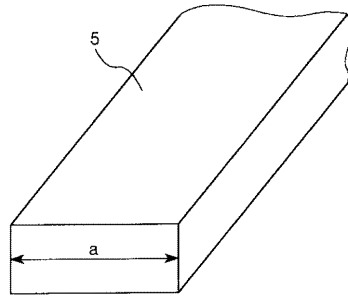
【図 19】



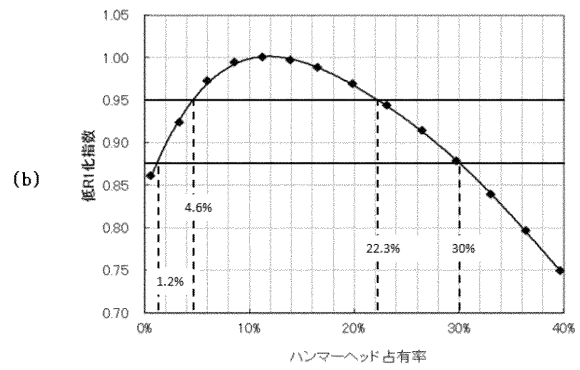
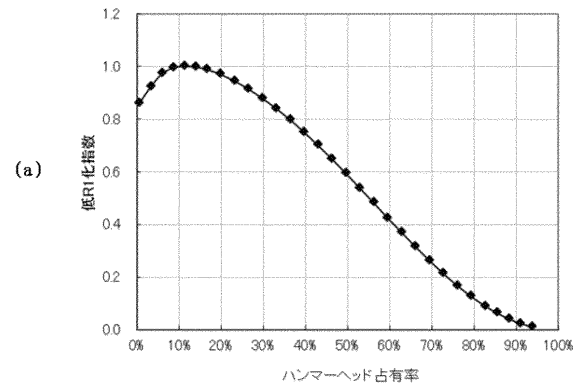
【図 20】



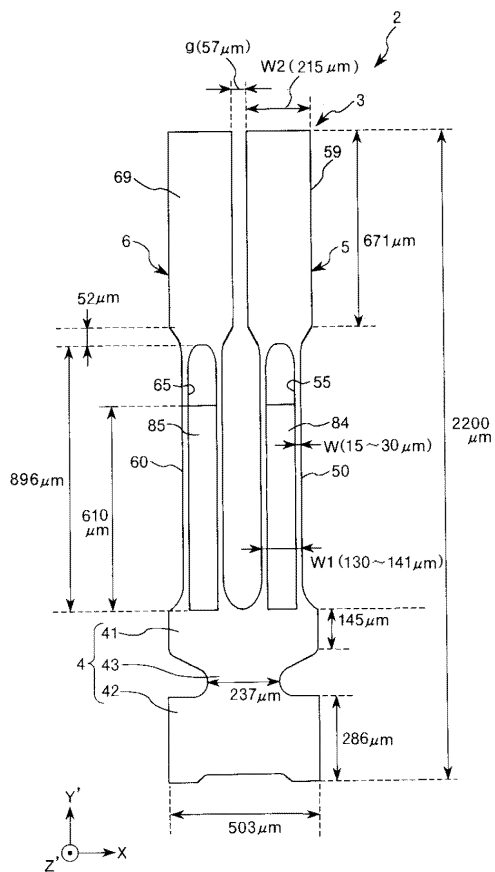
【図 2 1】



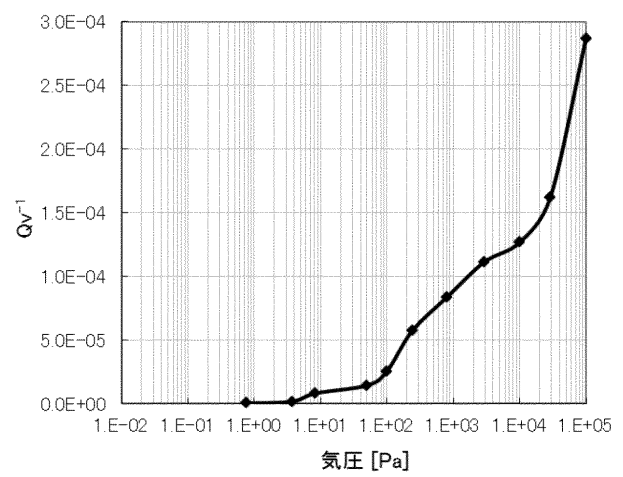
【図 2 2】



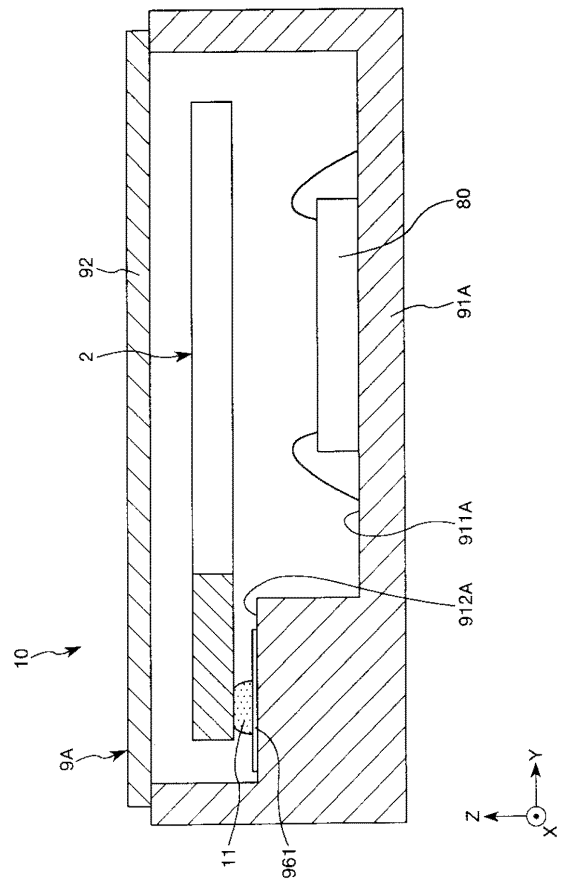
【図 2 3】



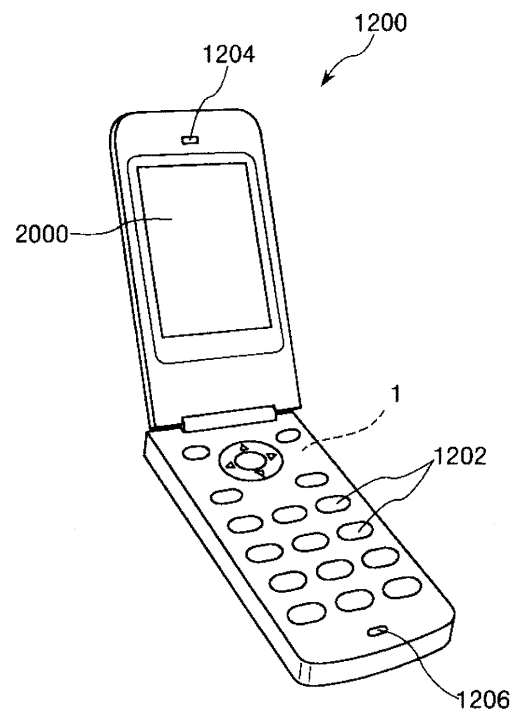
【図 2 4】



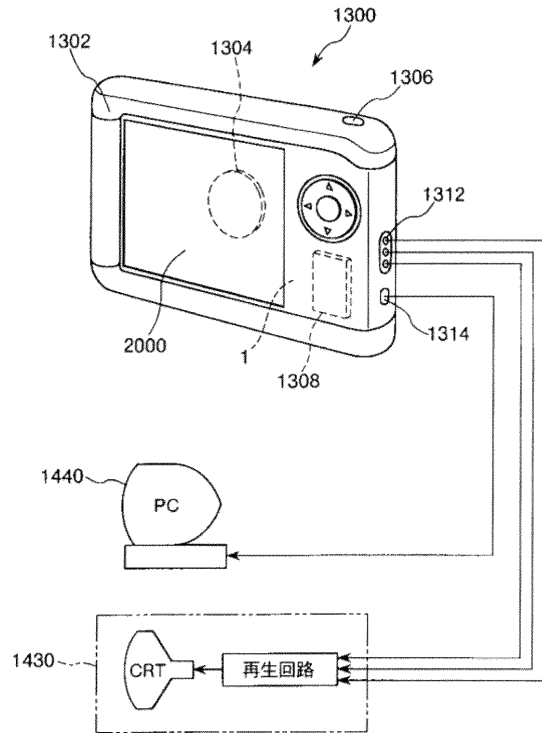
【 図 2 6 】



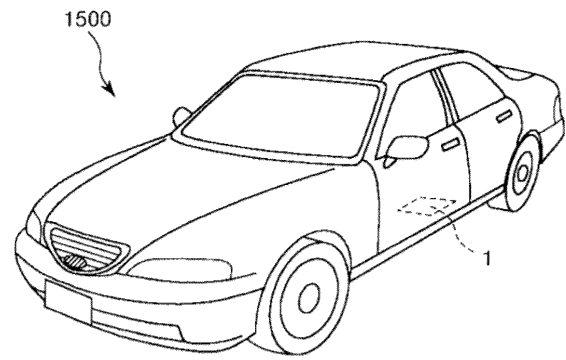
【 ㄨ 2 8 】



【図 29】



【図 30】



フロントページの続き

F ターム(参考) 5J108 AA01 BB02 BB03 CC06 CC09 DD05 EE03 EE04 EE07 EE13
EE18 FF05 FF11 GG03 KK04