

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7691035号
(P7691035)

(45)発行日 令和7年6月11日(2025.6.11)

(24)登録日 令和7年6月3日(2025.6.3)

(51)国際特許分類

F I

H 0 3 H 9/19 (2006.01)

H 0 3 H 9/19 F

H 0 3 H 9/19 D

請求項の数 16 (全51頁)

(21)出願番号	特願2024-562375(P2024-562375)	(73)特許権者	000006231
(86)(22)出願日	令和6年3月18日(2024.3.18)		株式会社村田製作所
(86)国際出願番号	PCT/JP2024/010616		京都府長岡京市東神足1丁目10番1号
審査請求日	令和6年10月22日(2024.10.22)	(74)代理人	100079108
(31)優先権主張番号	特願2023-124943(P2023-124943)		弁理士 稲葉 良幸
(32)優先日	令和5年7月31日(2023.7.31)	(74)代理人	100109346
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		弁理士 大貫 敏史
		(74)代理人	100117189
			弁理士 江口 昭彦
		(74)代理人	100134120
			弁理士 内藤 和彦
		(74)代理人	100126480
			弁理士 佐藤 睦
		(72)発明者	西村 俊雄
			京都府長岡京市東神足1丁目10番1号
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 圧電振動素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1主面及び前記第1主面と対向する第2主面を有する圧電片と、
前記第1主面に設けられた第1励振電極と、
前記第2主面に設けられた第2励振電極と
を備え、
前記第1主面と前記第2主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、前記第2励振電極の面積は、前記第1励振電極の面積よりも大きく、且つ、前記第2励振電極の一部が前記第1励振電極の全てと重なっており、
前記対向方向に沿った前記第2励振電極の厚さは、前記対向方向に沿った前記第1励振電極の厚さよりも大きく、
前記対向方向に沿った前記第1励振電極の厚さを T_e (μm)、前記対向方向に沿った前記第2励振電極の厚さを T_{e2} (μm)、前記対向方向に沿った前記圧電片の厚さを T_q (μm)とし、
前記第1励振電極及び前記第2励振電極の平均密度を ρ (kg/m^3)としたとき、
 $T_{e2}/T_q = -0.00001 \times \rho + 0.39 \times T_e/T_q + 0.16 \pm 0.01$
の関係が成り立つ、
圧電振動素子。

【請求項2】

第1主面及び前記第1主面と対向する第2主面を有する圧電片と、

前記第1主面に設けられた第1励振電極と、
前記第2主面に設けられた第2励振電極と
を備え、

前記第1主面と前記第2主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、前記第2励振電極の面積は、前記第1励振電極の面積よりも大きく、且つ、前記第2励振電極の一部が前記第1励振電極の全てと重なっており、

前記対向方向に沿った前記第2励振電極の厚さは、前記対向方向に沿った前記第1励振電極の厚さよりも大きく、

前記第1主面に設けられ、前記第1励振電極に電氣的に接続された第1引出電極と、
前記第2主面に設けられ、前記第2励振電極に電氣的に接続された第2引出電極とをさらに備え、

前記第1励振電極及び前記第2励振電極のうち前記対向方向における平面視において面積の大きい方の励振電極には、前記第1引出電極及び前記第2引出電極のうち前記対向方向における平面視において面積の小さい方の励振電極に電氣的に接続された方の引出電極と対向する領域に、切り欠き部が形成されている、

圧電振動素子。

【請求項3】

第1主面及び前記第1主面と対向する第2主面を有する圧電片と、

前記第1主面に設けられた第1励振電極と、
前記第2主面に設けられた第2励振電極と

を備え、

前記第1主面と前記第2主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、前記第2励振電極の面積は、前記第1励振電極の面積よりも大きく、且つ、前記第2励振電極の一部が前記第1励振電極の全てと重なっており、

前記対向方向に沿った前記第2励振電極の厚さは、前記対向方向に沿った前記第1励振電極の厚さよりも大きく、

前記第1主面に設けられ、前記第1励振電極に電氣的に接続された第1引出電極と、
前記第2主面に設けられ、前記第2励振電極に電氣的に接続された第2引出電極と
をさらに備え、

前記第1主面には、前記第1励振電極及び前記第1引出電極のみが設けられ、

前記第2主面には、前記第2励振電極及び前記第2引出電極のみが設けられ、

前記第1励振電極及び前記第2励振電極のうち前記対向方向における平面視において面積の大きい方の励振電極の中心は、前記対向方向における平面視において面積の小さい方の励振電極の中心に対して、前記第1引出電極及び前記第2引出電極のうち前記面積の小さい方の励振電極に電氣的に接続された方の引出電極から離間する方向にずれている、

圧電振動素子。

【請求項4】

第1主面及び前記第1主面と対向する第2主面を有する圧電片と、

前記第1主面に設けられた第1励振電極と、
前記第2主面に設けられた第2励振電極と

を備え、

前記第1主面と前記第2主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、前記第2励振電極の面積は、前記第1励振電極の面積よりも大きく、且つ、前記第2励振電極の一部が前記第1励振電極の全てと重なっており、

前記対向方向に沿った前記第2励振電極の厚さは、前記対向方向に沿った前記第1励振電極の厚さよりも大きく、

前記第1励振電極は高音速領域と低音速領域とを有し、

前記対向方向における平面視において、前記高音速領域は、前記第1励振電極と前記第2励振電極とが対向する領域の中央部に設けられ、前記低音速領域は、前記高音速領域の外側に設けられた、

10

20

30

40

50

圧電振動素子。

【請求項 5】

第 1 主面及び前記第 1 主面と対向する第 2 主面を有する圧電片と、

前記第 1 主面に設けられた第 1 励振電極と、

前記第 2 主面に設けられた第 2 励振電極と

を備え、

前記第 1 主面と前記第 2 主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、前記第 2 励振電極の面積は、前記第 1 励振電極の面積よりも大きく、且つ、前記第 2 励振電極の一部が前記第 1 励振電極の全てと重なっており、

前記対向方向に沿った前記第 2 励振電極の厚さは、前記対向方向に沿った前記第 1 励振電極の厚さよりも大きく、

前記対向方向における平面視において、前記第 1 励振電極及び前記第 2 励振電極は、互いの中心が重なる矩形状に設けられており、

第 1 方向に延在する互いに平行な辺と、前記第 1 方向と交差する第 2 方向に延在する互いに平行な辺とを有し、

前記対向方向における平面視において、前記第 1 励振電極及び前記第 2 励振電極のある方向において隣接する辺同士の間隔を D_e (μm) とし、

前記対向方向に沿った前記圧電片の厚さを T_q (μm) としたとき、

$5.22 \times T_q - 0.45 \leq D_e$

の関係が成り立つ、

圧電振動素子。

【請求項 6】

第 1 主面及び前記第 1 主面と対向する第 2 主面を有する圧電片と、

前記第 1 主面に設けられた第 1 励振電極と、

前記第 2 主面に設けられた第 2 励振電極と、

前記第 2 励振電極に積層された絶縁膜と

を備え、

前記第 1 主面と前記第 2 主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、前記第 2 励振電極及び前記絶縁膜からなる積層体の面積は、前記第 1 励振電極の面積よりも大きく、且つ、前記積層体の一部が前記第 1 励振電極の全てと重なっており、

前記対向方向に沿った前記第 2 励振電極の厚さ及び前記絶縁膜の厚さの和は、前記対向方向に沿った前記第 1 励振電極の厚さよりも大きい、

圧電振動素子。

【請求項 7】

前記対向方向における平面視において、前記第 1 励振電極の外縁部の全てが、前記第 2 励振電極の外縁部よりも内側に位置している、

請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の圧電振動素子。

【請求項 8】

前記絶縁膜は、前記第 2 励振電極における前記圧電片とは反対側の面に積層されている、請求項 6 に記載の圧電振動素子。

【請求項 9】

前記対向方向における平面視において、

前記第 2 励振電極の外縁部の全てが、前記第 1 励振電極の外縁部よりも内側に設けられ、

前記絶縁膜の外縁部の全てが、前記第 1 励振電極の外縁部よりも外側に設けられている、

請求項 6 又は 8 に記載の圧電振動素子。

【請求項 10】

前記対向方向に沿った前記第 2 励振電極の厚さは、前記対向方向に沿った前記第 1 励振電極の厚さよりも小さい、

請求項 6 に記載の圧電振動素子。

【請求項 11】

10

20

30

40

50

前記第 1 励振電極及び前記第 2 励振電極の材質はアルミニウムであり、
前記絶縁膜の材質は酸化シリコンである、
請求項 6 に記載の圧電振動素子。

【請求項 1 2】

前記第 1 主面に設けられ、前記第 1 励振電極に電氣的に接続された第 1 引出電極と、
前記第 2 主面に設けられ、前記第 2 励振電極に電氣的に接続された第 2 引出電極と
をさらに備え、

前記第 1 励振電極及び前記第 2 励振電極のうち前記対向方向における平面視において面積の大きい方の励振電極の中心は、前記対向方向における平面視において面積の小さい方の励振電極の中心に対して、前記第 1 引出電極及び前記第 2 引出電極のうち前記面積の小さい方の励振電極に電氣的に接続された方の引出電極から離間する方向にずれている、

10

請求項 1、2、5、6 のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【請求項 1 3】

前記対向方向における平面視において、前記第 1 励振電極と前記第 2 励振電極とが対向する領域は、中央部に設けられた高音速領域と、前記高音速領域の外側に設けられた低音速領域とを有する、

請求項 1、2、5、6 のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【請求項 1 4】

主要な振動モードは厚み滑り振動である、

請求項 1 から 6 のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

20

【請求項 1 5】

前記圧電片は水晶片である、

請求項 1 から 6 のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【請求項 1 6】

前記水晶片のカット角は、A T カット、B T カット又は S T カットである、

請求項 1 5 に記載の圧電振動素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、圧電振動素子に関する。

30

【背景技術】

【0002】

移動通信端末、通信基地局、家電などの各種電子機器において、タイミングデバイス、センサ又は発振器等の用途に圧電振動素子が用いられている。圧電振動素子は、一對の主面を有する圧電片と、圧電片の一對の主面に設けられた一對の励振電極を備える。

【0003】

例えば、特許文献 1 には、厚み滑り振動で振動し、表裏の関係にある第 1 の主面及び第 2 の主面を含む基板と、第 1 の主面に設けられている第 1 の励振電極と、第 2 の主面に設けられ、平面視で、第 1 の励振電極よりも大きい第 2 の励振電極と、を含み、第 1 の励振電極は、平面視で、第 2 の励振電極の外縁内に収まるように配置された、振動素子が開示されている。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特開 2014-154994 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

ところで、電子機器の高性能化に伴い、高い電気機械結合係数を有する圧電振動素子が求められている。

50

【0006】

本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、電気機械結合係数の向上を図ることができる圧電振動素子を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一態様に係る圧電振動素子は、第1主面及び第1主面と対向する第2主面を有する圧電片と、第1主面に設けられた第1励振電極と、第2主面に設けられた第2励振電極とを備え、第1主面と第2主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、第2励振電極の面積は、第1励振電極の面積よりも大きく、且つ、第2励振電極の一部が第1励振電極の全てと重なっており、対向方向に沿った第2励振電極の厚さは、対向方向に沿った第1励振電極の厚さよりも大きい。

10

【0008】

本発明の他の一態様に係る圧電振動素子は、第1主面及び第1主面と対向する第2主面を有する圧電片と、第1主面に設けられた第1励振電極と、第2主面に設けられた第2励振電極と、第2励振電極に積層された絶縁膜とを備え、第1主面と第2主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、第2励振電極及び絶縁膜からなる積層体の面積は、第1励振電極の面積よりも大きく、且つ、積層体の一部が第1励振電極の全てと重なっており、対向方向に沿った第2励振電極の厚さ及び絶縁膜の厚さの和は、対向方向に沿った第1励振電極の厚さよりも大きい、圧電振動素子。

【発明の効果】

20

【0009】

本発明によれば、電気機械結合係数の向上を図ることができる圧電振動素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】第1実施形態に係る水晶振動子の分解斜視図である。

【図2】第1実施形態に係る振動部の平面図である。

【図3】第1実施形態に係る振動部の断面図である。

【図4】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図5】第1励振電極に位置ずれが生じたときの断面図である。

30

【図6】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図7】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図8】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図9】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図10】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図11】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図12】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図13】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図14】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図15】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

40

【図16】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図17】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図18】第2実施形態に係る振動部の平面図である。

【図19】第2実施形態に係る振動部の断面図である。

【図20】第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図21】第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図22】第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図23】第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図24】第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【図25】第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

50

【図 26】第 3 実施形態に係る振動部の構成を示す斜視図である。
【図 27】第 3 実施形態に係る振動部の振動分布を示す図である。
【図 28】第 3 実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。
【図 29】第 3 実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。
【図 30】第 4 実施形態に係る振動部の構成を示す斜視図である。
【図 31】第 4 実施形態に係る振動部の振動分布を示す図である
【図 32】第 5 実施形態に係る振動部の断面図である。
【図 33】第 6 実施形態に係る振動部の断面図である。
【図 34】第 7 実施形態に係る振動部の断面図である。
【図 35】第 8 実施形態に係る振動部の断面図である。
【発明を実施するための形態】

10

【0011】

以下に本発明の実施形態を説明する。以下の図面の記載において、同一又は類似の構成要素は同一又は類似の符号で表している。図面は例示であり、各部の寸法や形状は模式的なものであり、本発明の技術的範囲を当該実施形態に限定して解するべきではない。

【0012】

各図面には、各図面の相互の関係を明確にし、各部材の位置関係を理解する助けとするために、便宜的に X 軸、Y' 軸及び Z' 軸からなる直交座標系を付すことがある。X 軸、Y' 軸及び Z' 軸は各図面において互いに対応している。X 軸、Y' 軸及び Z' 軸は、それぞれ、後述する水晶片 11 の結晶軸 (Crystallographic Axes) に対応している。X 軸は水晶の電気軸 (極性軸)、Y 軸は水晶の機械軸、Z 軸は水晶の光学軸に、それぞれ相当する。Y' 軸及び Z' 軸は、それぞれ、X 軸方向の正方向から見て、Y 軸及び Z 軸を X 軸の周りに反時計回りに θ 度回転させた軸である。

20

【0013】

以下の説明において、X 軸に平行な方向を「X 軸方向」、Y' 軸に平行な方向を「Y' 軸方向」、Z' 軸に平行な方向を「Z' 軸方向」という。また、X 軸、Y' 軸及び Z' 軸の矢印の先端方向を「正」又は「+ (プラス)」、矢印とは反対の方向を「負」又は「- (マイナス)」という。なお、便宜的に、+Y' 軸方向を上方向、-Y' 軸方向を下方向として説明するが、水晶振動素子 10 及び水晶振動子 1 の上下の向きは限定されるものではない。また、X 軸及び Z' 軸によって特定される面を Z' X 面とし、他の軸によって特定される面についても同様とする。

30

【0014】

<第 1 実施形態>

【0015】

まず、図 1 乃至図 3 を参照しつつ、第 1 実施形態に従う水晶振動子の構成について説明する。図 1 は、第 1 実施形態に係る水晶振動子の分解斜視図である。図 2 は、第 1 実施形態に係る振動部の平面図である。図 3 は、第 1 実施形態に係る振動部の断面図である。なお、図 3 は、図 2 に示した振動部の III-III 線に沿った断面図である。

【0016】

水晶振動子 1 は、水晶振動素子 10 と、下蓋 20 と、上蓋 30 と、下接合部 40 と、上接合部 50 とを備えている。下蓋 20、水晶振動素子 10 及び上蓋 30 は、この順で Y' 軸方向に間隔を空けて並んでいる。以下、下蓋 20、水晶振動素子 10 及び上蓋 30 の積層する Y' 軸方向を、「厚さ方向」とする。Y' 軸方向は、「対向方向」の一例に当たる。

40

【0017】

水晶振動子 1 は、例えば、温度補償水晶発振器 (TCXO: Temperature Compensated Crystal Oscillator)、電圧制御水晶発振器 (VCXO: Voltage Controlled Crystal Oscillator) 又は恒温槽付水晶発振器 (OCXO: Oven Controlled Crystal Oscillator) の部品として用いられる。

【0018】

50

水晶振動素子１０は、圧電効果により電気エネルギーと機械エネルギーとを相互に変換する電気機械エネルギー変換素子である。図１に示すように、水晶振動素子１０は、振動部１１０と、保持部１２０と、支持腕１３０とを有している。

【００１９】

振動部１１０は、印加される交番電圧に基づいて所定の周波数で励振される。振動部１１０は、下蓋２０と上蓋３０との間に設けられた振動空間において振動可能に保持されている。振動部１１０の主要振動は、厚み滑り振動モード（Thickness Shear Vibration Mode）である。図２に示すように、ＸＺ'面を平面視（以下、単に「平面視」とする。）したときの振動部１１０の形状（以下、「平面形状」とする。）は、一対の短辺１１１，１１２と、一対の長辺１１３，１１４とを有する長方形状である。一対の短辺１１１，１１２は、Ｚ'軸方向に沿って延在し、Ｘ軸方向において互いに対向している。一対の長辺１１３，１１４は、Ｘ軸方向に沿って延在し、Ｚ'軸方向において対外に対向している。

10

【００２０】

なお、振動部の主要振動は厚み滑り振動モードに限定されるものではなく、例えば、厚み縦振動モード、広がり振動モード、長さ振動モード又は屈曲振動モードであってもよい。また、振動部の平面形状は長方形状に限定されるものではなく、例えば、正方形状、多角形状、円形状、楕円形状又はこれらの組み合わせであってもよい。

【００２１】

保持部１２０は、振動部１１０を保持するための部分である。保持部１２０は、下蓋２０、上蓋３０、下接合部４０及び上接合部５０とともに、振動部１１０の振動空間を形成している。平面視したとき、保持部１２０は、振動部１１０から間隔を空けて、振動部１１０を囲むように枠状に設けられている。保持部１２０は、枠部１２１Ａ，１２１Ｂ，１２１Ｃ，１２１Ｄを有している。

20

【００２２】

枠部１２１Ａ，１２１Ｂ，１２１Ｃ，１２１Ｄは、それぞれ、振動部１１０を囲む略矩形状の枠体の一部である。図１及び図２に示すように、枠部１２１Ａは、振動部１１０の短辺１１１からＸ軸方向において間隔を空けて設けられ、Ｚ'軸方向に沿って短辺１１１と平行に延びている。枠部１２１Ｂは、振動部１１０の短辺１１２からＸ軸方向において間隔を空けて設けられ、Ｚ'軸方向に沿って短辺１１２と平行に延びている。枠部１２１Ｃは、振動部１１０の長辺１１３からＺ'軸方向において間隔を空けて設けられ、Ｘ軸方向に沿って長辺１１３と平行に延びている。枠部１２１Ｄは、振動部１１０の長辺１１４からＺ'軸方向において間隔を空けて設けられ、Ｘ軸方向に沿って長辺１１４と平行に延びている。

30

【００２３】

枠部１２１Ｃの両端は、それぞれ、枠部１２１Ａの一端及び枠部１２１Ｂの一端に接続されている。枠部１２１Ｄの両端は、それぞれ、枠部１２１Ａの他端及び枠部１２１Ｂの他端に接続されている。枠部１２１Ａと枠部１２１Ｂとは、振動部１１０を挟んでＸ軸方向において互いに対向している。枠部１２１Ｃと枠部１２１Ｄは、振動部１１０を挟んでＺ'軸方向において互いに対向している。

【００２４】

なお、保持部は、振動部の周囲の少なくとも一部に設けられていればよく、枠状の形状に限定されるものではない。保持部は、例えば、２本の平行な枠部を有するレール状に設けられてもよい。

40

【００２５】

支持腕１３０は、振動部１１０を支持し、保持部１２０に振動部１１０を保持させる。支持腕１３０は、振動部１１０と保持部１２０とを接続している。図１及び図２に示すように、支持腕１３０は、振動部１１０の短辺１１２側の端部と、保持部１２０の枠部１２１Ｂとを接続している。支持腕１３０は、Ｘ軸に延在している。

【００２６】

下蓋２０は、水晶振動素子１０の振動部１１０、保持部１２０及び支持腕１３０に対し

50

てY'軸方向において間隔を空けて対向している。下蓋20は平板状に設けられている。図1に示すように、平面視したとき、下蓋20は、X軸方向に沿って延在しZ'軸方向において互いに対向する一対の長辺と、Z'軸方向に沿って延在しZ軸方向において互いに対向する一対の短辺とを有している。また、下蓋20の一対の長辺と一対の短辺とは、一対の長辺及び一対の短辺に対して傾斜する辺によって接続されている。つまり、平面視における下蓋20の四隅には切り欠きが形成されている。

【0027】

上蓋30は、下蓋20とは反対側において、水晶振動素子10の振動部110、保持部120及び支持腕130に対してY'軸方向において間隔を空けて対向している。上蓋30は、平板状に設けられている。図1に示すように、平面視したとき、上蓋30は、X軸方向に沿って延在しZ'軸方向において互いに対向する一対の長辺と、Z'軸方向に沿って延在しZ軸方向において互いに対向する一対の短辺とを有している。上蓋30の平面形状は長方形である。

10

【0028】

下接合部40及び上接合部50は、水晶振動素子10の保持部120に沿って枠状に設けられている。下接合部40は、水晶振動素子10の保持部120と、下蓋20の端部とを接合している。上接合部50は、水晶振動素子10の保持部120と、上蓋30の端部とを接合している。下接合部40及び上接合部50は、例えば、エポキシ系、ビニル系、アクリル系、ウレタン系又はシリコン系の樹脂を含む有機系接着剤によって設けられる。

【0029】

下接合部及び上接合部の材質は、有機系接着剤に限定されるものではなく、水ガラスなどを含むケイ素系接着剤や、セメントなどを含むカルシウム系接着剤などの無機系接着剤によって設けられてもよい。下接合部及び上接合部の材質は、低融点ガラス（例えば鉛ホウ酸系や錫リン酸系等）であってもよい。下接合部及び上接合部の材質は、金（Au）、錫（Sn）、銅（Cu）、チタン（Ti）、アルミニウム（Al）、ゲルマニウム（Ge）、シリコン（Si）又はこれらのうち少なくとも1種類を含む共晶合金であってもよい。

20

【0030】

次に、水晶振動素子10、下蓋20及び上蓋30の詳細な構成について説明する。

【0031】

水晶振動素子10は、水晶片11と、第1励振電極14aと、第2励振電極14bと、第1引出電極15aと、第2引出電極15bと、第1接続電極16aと、第2接続電極16bとを備えている。

30

【0032】

水晶片11は、印加電圧に応じて振動する圧電体からなる圧電片の一種である。水晶片11は、振動部110、保持部120及び支持腕130に亘って連続に設けられている。XZ'面方向において、水晶片11は、振動部110、保持部120及び支持腕130のそれぞれの略全域に延在している。水晶片11は、XZ'面を主面とする薄片状の水晶結晶である。

【0033】

水晶片11は、例えばATカットの水晶片である。すなわち、X軸正方向側から視てZ'軸及びY'軸のZ軸及びY軸からの反時計回りの回転角 θ は35度15分 $\pm$ 1分30秒である。ATカットの水晶片11を用いた水晶振動素子10は、広い温度範囲で高い周波数安定性を有する。

40

【0034】

なお、水晶片のカット角は上記に限定されるものではない。ATカット型の水晶片11におけるY'軸及びZ'軸の回転角は、35度15分から-5度以上又は+15度以下の範囲で傾いてもよい。また、水晶片のカット角は、ATカット以外の異なるカット、例えばBTカット、GTカット、SCカット等を適用してもよい。

【0035】

振動部110における水晶片11の平面形状は、X軸方向に沿った長辺とZ'軸方向に沿

50

った短辺とを有する長形状である。図3に示すように、振動部110において、水晶片11は、上蓋30側に設けられた上面11Aと、下蓋20側に設けられた下面11Bとを有している。上面11A及び下面11Bは、水晶片11のY'軸方向において互いに対向する一对の主面の一例に相当する。

【0036】

なお、水晶片の振動部の平面形状は上記に限定されるものではない。例えば、水晶片の振動部の平面形状は、Z'軸方向に延在する長辺とX軸方向に延在する短辺とを有する長形状であってもよく、Z'軸方向に延在する短辺とX軸方向に延在する長辺とを有する長形状であってもよい。水晶片の振動部の平面形状は、多角形状、円形状、楕円形状、又はこれらの組合せであってもよい。また、水晶片の振動部は平板状に限定されるものではない。水晶片の振動部は、上面及び下面の少なくとも一方に凹凸を有するメサ型構造又は逆メサ型構造であってもよい。水晶片の振動部は、厚さの変化量が連続的に変化するコンベックス構造であってもよく、厚さの変化量が不連続に変化するベベル構造であってもよい。

【0037】

第1励振電極14a及び第2励振電極14bは、振動部110の水晶片11に交番電圧を印加して、振動部110を励振する。図3に示すように、第1励振電極14aは振動部110における水晶片11の上面11Aに設けられ、第2励振電極14bは振動部110における水晶片11の下面11bに設けられている。第1励振電極14a及び第2励振電極14bは、水晶片11を挟んでY'軸方向において互いに対向している。

【0038】

図2に示すように、平面視において、第2励振電極14bの面積は、第1励振電極14aの面積よりも大きく、且つ、第2励振電極14bの一部が第1励振電極14aの全部と重なっている。第1励振電極14a及び第2励振電極14bは、振動部110の中央部に設けられており、第1励振電極14aの中心は、第2励振電極14bの中心と重なっている。

【0039】

なお、第1励振電極及び第2励振電極の位置は、振動部の中央部に限定されるものではない。平面視において、第1励振電極及び第2励振電極は、振動部の中央部から外側に寄せて設けられてもよい。また、第1励振電極及び第2励振電極の中心の位置は互いに重なる位置に限定されるものではない。平面視にいて、第1励振電極の中心は、第2励振電極の中心から離れていてもよい。

【0040】

第1励振電極14aの平面形状は、Z'軸方向に延在する短辺と、X軸方向に延在する長辺とを有する長形状である。第2励振電極14bの平面形状は、第1励振電極14aの平面形状と同様である。つまり、第1励振電極14a及び第2励振電極14bは、振動部110の短辺と平行な短辺を有し振動部110の長辺と平行な短辺を有する。また、第1励振電極14a及び第2励振電極14bは、Y'軸方向に厚さを有し、第2励振電極14bの厚さは、第1励振電極14aの厚さよりも大きい。

【0041】

なお、第1励振電極及び第2励振電極の平面形状は上記に限定されるものではない。第1励振電極及び第2励振電極の平面形状は、X軸方に延在する短辺を有する長形状であってもよい。第1励振電極及び第2励振電極の平面形状は、正方形形状、多角形状、円形状、楕円形状又はこれらの組み合わせであってもよい。また、第1励振電極の平面形状は、第2励振電極の平面形状と同じものに限定されるものではなく、第1励振電極及び第2励振電極の互いの平面形状は異なってもよい。

【0042】

第1引出電極15aは、第1励振電極14aと第1接続電極16aとを電氣的に接続する。図1に示すように、第1励振電極14aから引き出された第1引出電極15aは、振動部110、支持腕130及び保持部120の枠部121Bの上面、並びに保持部120の側面に亘って延在し、保持部120の下面に設けられた第1接続電極16aに電氣的に

接続されている。第2励振電極14bから引き出された第2引出電極15bは、振動部110、支持腕130の下面、側面及び上面、保持部120の枠部121B及び121Dの上面、並びに保持部120の側面に亘って延在し、保持部120の下面に設けられた第2接続電極16bに電氣的に接続されている。

【0043】

第1接続電極16aは、第1励振電極14aを外部端子に電氣的に接続し、第2接続電極16bは、第2励振電極14bを外部端子に電氣的に接続する。図1に示すように、第1接続電極16aは、枠部121Bと枠部121Cとが接続する保持部120の角部における水晶片11の下面（下蓋20側の面）に設けられている。第2接続電極16bは、枠部121Aと枠部121Dとが接続する保持部120の角部における水晶片11の下面に設けられている。

【0044】

第1励振電極14a、第1引出電極15a及び第1接続電極16aは、一体的に設けられている。第2励振電極14b、第2引出電極15b及び第2接続電極16bも同様である。これら水晶振動素子10の電極は、例えば、アルミニウム層からなる単層構造である。水晶振動素子10の電極は、下地層と表面層とをこの順に積層して設けられる多層構造であってもよい。例えば、下地層は水晶片11との密着性が良好なクロム（Cr）層であり、表面層は化学的安定性の良好な金（Au）層である。水晶振動素子10の電極は、銀（Ag）、銅（Cu）、チタン（Ti）、モリブデン（Mo）又はアルミ銅合金（AlCu）を含んでもよい。

【0045】

下蓋20は、水晶片21と、電源端子ST1、ST2と、ダミー端子DT1、DT2とを有している。水晶片21は、平面視において水晶振動素子10の略全体と重なる平板状の基板である。水晶片21は、水晶振動素子10の水晶片11と同じカット角の水晶結晶によって形成されている。これによれば、水晶振動素子10と下蓋20との間における熱膨張係数の差異や熱伸縮の方向の差異に起因した熱応力を低減することができる。これによって、水晶振動素子10の周波数の変動を抑制することができる。水晶片21は、水晶振動素子10側に設けられた上面21Aと、上面21Aとは反対側に設けられた下面21Bとを有している。平面視したとき、水晶片21は、X軸方向に沿って延在する長辺と、Z'軸方向に沿って延在する短辺とを有している。また、平面視したとき、水晶片21の上面21Aと下面21Bとを繋ぐ側面は、水晶振動素子10における保持部120の外側面と重なっている。水晶片21の短辺と長辺とが接続する角部には切り欠きが形成されている。水晶片21の平面視における面積は、この切り欠きの分だけ、後述する水晶片31の平面視における面積よりも小さい。水晶片21の角部において切り欠きによって形成される側面の形状は、例えば平面状である。但し、水晶片21の角部において切り欠きによって形成される側面の形状はこれに限定されるものではなく、円柱や角柱の一部である屈曲面状であってもよい。

【0046】

電源端子ST1、ST2及びダミー端子DT1、DT2は、水晶片21の下面21Bに設けられている。電源端子ST1、ST2及びダミー端子DT1、DT2は、水晶振動素子1の外部端子の一例に相当する。電源端子ST1、ST2は、水晶振動素子1に駆動信号（駆動電圧）を与えるためのものである。電源端子ST1は、水晶片21の角部の切り欠き及び下接合部40の外側面に設けられた側面電極を介して、第1接続電極16aに電氣的に接続されている。電源端子ST2は、水晶片21の角部の切り欠き及び下接合部40の外側面に設けられた側面電極を介して、第2接続電極16bに電氣的に接続されている。ダミー端子DT1、DT2は、電源端子ST1、ST2との間において、静電容量などの電氣的特性のバランス、及び、機械的強度のバランスを取るためのものである。ダミー端子DT1、DT2は、水晶振動素子10に電氣的に接続されていない、いわゆるフローティング電極である。

【0047】

なお、ダミー端子DT1, DT2の少なくとも一方は、水晶振動子1の一部を電氣的に接地する接地電極であってもよい。

【0048】

上蓋30は、水晶片31を有している。水晶片31は、平面視において水晶振動素子10の略全体と重なる平板状の基板である。水晶片31は、水晶振動素子10の水晶片11と同じカット角の水晶結晶によって形成されている。これによれば、水晶振動素子10と上蓋30との間における熱膨張係数の差異や熱伸縮の方向の差異に起因した熱応力を低減することができる。これによって、水晶振動素子10の周波数の変動を抑制することができる。水晶片31は、水晶振動素子10側に設けられた下面31Bと、下面31Bとは反対側に設けられた上面31Aとを有している。平面視したとき、水晶片31は、X軸方向に沿って延在する長辺と、Z'軸方向に沿って延在する短辺とを有する長方形状である。また、平面視したとき、水晶片31の上面31Aと下面31Bとを繋ぐ側面は、水晶振動素子10における保持部120の外側面と重なっている。

10

【0049】

なお、下蓋及び上蓋が有する水晶片のカット角は特に限定されるものではなく、水晶振動素子が有する水晶片のカット角と異なってもよい。また、下蓋及び上蓋は、水晶片の代わりに、ガラス基板、シリコン基板、セラミック基板又は金属基板などを有してもよい。

【0050】

次に、図2及び図3を参照しつつ、振動部110の詳細な構成について説明する。

20

【0051】

第1励振電極14aは、外縁部71, 72, 73, 74を有している。外縁部71は、平面視したときの第1励振電極14aの四辺の縁部のうち、X軸負方向側においてZ'軸に沿って延在する一辺の縁部である。外縁部72はX軸正方向側においてZ'軸に沿って延在する一辺の縁部であり、外縁部73はZ'軸正方向側においてX軸に沿って延在する一辺の縁部であり、外縁部74はZ'軸負方向側においてX軸に沿って延在する一辺の縁部である。つまり、平面視における第1励振電極14aの中央部に対して、外縁部71は枠部121A側に位置し、外縁部72は枠部121B側に位置し、外縁部73は枠部121C側に位置し、外縁部74は枠部121D側に位置している。

【0052】

第2励振電極14bは、外縁部81, 82, 83, 84を有している。外縁部81は、平面視したときの第2励振電極14bの四辺の縁部のうち、X軸負方向側においてZ'軸に沿って延在する一辺の縁部である。外縁部82はX軸正方向側においてZ'軸に沿って延在する一辺の縁部であり、外縁部83はZ'軸正方向側においてX軸に沿って延在する一辺の縁部であり、外縁部84はZ'軸負方向側においてX軸に沿って延在する一辺の縁部である。つまり、平面視における第2励振電極14bの中央部に対して、外縁部81は枠部121A側に位置し、外縁部82は枠部121B側に位置し、外縁部83は枠部121C側に位置し、外縁部84は枠部121D側に位置している。

30

【0053】

図2に示すように、平面視において、第1励振電極14aの外縁部71, 72, 73, 74の全てが、第2励振電極14bの外縁部81, 82, 83, 84よりも内側に位置している。外縁部81は外縁部71, 72, 73, 74のうち外縁部71に隣接し、外縁部82は外縁部71, 72, 73, 74のうち外縁部72に隣接し、外縁部83は外縁部71, 72, 73, 74のうち外縁部73に隣接し、外縁部84は外縁部71, 72, 73, 74のうち外縁部74に隣接している。平面視において、外縁部71及び外縁部81は平行に設けられており、外縁部72及び外縁部82は平行に設けられており、外縁部73及び外縁部83は平行に設けられており、外縁部74及び外縁部84は平行に設けられている。

40

【0054】

図2に示すように、平面視において、振動部110のX軸方向に沿った寸法を長さLq

50

、振動部 110 の Z' 軸方向に沿った寸法を長さ W_q とする。第 1 励振電極 14a の X 軸方向に沿った寸法を長さ L_e 、第 1 励振電極 14a の Z' 軸方向に沿った寸法を長さ W_e とする。第 2 励振電極 14b の X 軸方向に沿った寸法を長さ L_{e2} 、第 2 励振電極 14b の Z' 軸方向に沿った寸法を長さ W_{e2} とする。

【0055】

長さ L_q は、例えば、所定の位置における短辺 111 と短辺 112 との間の X 軸方向に沿った距離として特定される。当該所定の位置は、例えば、平面視における振動部 110 の中心を通り X 軸方向に沿って延在する直線上である。長さ L_q は、短辺 111 と短辺 112 との間の X 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定されてもよい。長さ W_q は、例えば、所定の位置における長辺 113 と長辺 114 との間の Z' 軸方向に沿った距離として特定される。当該所定の位置は、例えば、平面視における振動部 110 の中心を通り Z' 軸方向に沿って延在する直線上である。長さ W_q は、長辺 113 と長辺 114 との間の Z' 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定されてもよい。

【0056】

同様に、長さ L_e は、所定の位置（例えば、第 1 励振電極 14a の中心を通り X 軸方向に沿って延在する直線上）における外縁部 71 と外縁部 72 との間の X 軸方向に沿った距離、若しくは、外縁部 71 と外縁部 72 との間の X 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。長さ W_e は、所定の位置（例えば、第 1 励振電極 14a の中心を通り Z' 軸方向に沿って延在する直線上）における外縁部 73 と外縁部 74 との間の Z' 軸方向に沿った距離、若しくは、外縁部 73 と外縁部 74 との間の Z' 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。長さ L_{e2} は、所定の位置（例えば、第 2 励振電極 14b の中心を通り X 軸方向に沿って延在する直線上）における外縁部 81 と外縁部 82 との間の X 軸方向に沿った距離、若しくは、外縁部 81 と外縁部 82 との間の X 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。長さ W_{e2} は、所定の位置（例えば、第 2 励振電極 14b の中心を通り Z' 軸方向に沿って延在する直線上）における外縁部 83 と外縁部 84 との間の Z' 軸方向に沿った距離、若しくは、外縁部 83 と外縁部 84 との間の Z' 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。

【0057】

なお、長さ L_e と長さ L_{e2} とを比較等する場合、長さ L_e 及び長さ L_{e2} は、同じ特定方法によって特定される。すなわち、長さ L_e が所定の位置における外縁部 71 と外縁部 72 との間の X 軸方向に沿った距離として特定されるのであれば、長さ L_{e2} は所定の位置における外縁部 81 と外縁部 82 との間の X 軸方向に沿った距離として特定される。長さ L_e が外縁部 71 と外縁部 72 との間の X 軸方向に沿った距離の平均値として特定されるのであれば、長さ L_{e2} は外縁部 81 と外縁部 82 との間の X 軸方向に沿った距離の平均値として特定される。長さ L_e が外縁部 71 と外縁部 72 との間の X 軸方向に沿った距離の最大値として特定されるのであれば、長さ L_{e2} は外縁部 81 と外縁部 82 との間の X 軸方向に沿った距離の最大値として特定される。他の長さや厚さを比較等する場合も、同様に特定方法は統一される。

【0058】

振動部 110 の平面形状は X 軸方向を長手方向とする長方形形状であるため、長さ L_q は長さ W_q よりも大きい ($W_q < L_q$)。第 1 励振電極 14a 及び第 2 励振電極 14b の平面形状も同様の長方形形状であるため、長さ L_e は長さ W_e よりも大きく ($W_e < L_e$)、長さ L_{e2} は長さ W_{e2} よりも大きい ($W_{e2} < L_{e2}$)。第 2 励振電極 14b の外縁部 81, 82, 83, 84 の全ては、振動部 110 の短辺 111, 112 及び長辺 113, 114 よりも内側に位置しているため、長さ L_q は長さ L_{e2} よりも大きく ($L_{e2} < L_q$)、長さ W_q は長さ W_{e2} よりも大きい ($W_{e2} < W_q$)。第 1 励振電極 14a の外縁部 71, 72, 73, 74 の全ては、第 2 励振電極 14b の外縁部 81, 82, 83, 84 よりも内側に位置しているため、長さ L_e は長さ L_{e2} よりも大きく ($L_e < L_{e2}$)、長さ W_e は長さ W_{e2} よりも大きい ($W_e < W_{e2}$)。まとめると、 $L_e < L_{e2} < L_q$ 、及び、 $W_e < W_{e2} < W_q$ の関係が成り立つ。

【0059】

図2に示すように、平面視において、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの外縁部の間の距離のうち、外縁部71と外縁部81との間のX軸方向に沿った距離を長さ $dLe1$ 、外縁部72と外縁部82との間のX軸方向に沿った距離を長さ $dLe2$ 、外縁部73と外縁部83との間のZ'軸方向に沿った距離を長さ $dWe1$ 、外縁部74と外縁部84との間のZ'軸方向に沿った距離を長さ $dWe2$ とする。長さ $dLe1$ 及び長さ $dLe2$ の和を dLe とし($dLe = dLe1 + dLe2$)、長さ $dWe1$ 及び長さ $dWe2$ の和を dWe とする($dWe = dWe1 + dWe2$)。

【0060】

長さ $dLe1$ は、例えば、所定の位置における外縁部71と外縁部81との間のX軸方向に沿った距離として特定される。当該所定の位置は、例えば、平面視において、第1励振電極14a又は第2励振電極14bの中心を通り、X軸方向に沿って延在する直線上である。長さ $dLe1$ は、外縁部71と外縁部81との間のX軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定されてもよい。長さ $dWe1$ は、例えば、所定の位置における外縁部73と外縁部83との間のZ'軸方向に沿った距離として特定される。当該所定の位置は、例えば、平面視において、第1励振電極14a又は第2励振電極14bの中心を通り、Z'軸方向に沿って延在する直線上である。長さ $dWe1$ は、外縁部73と外縁部83との間のZ'軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定されてもよい。

【0061】

同様に、長さ $dLe2$ は、所定の位置(例えば、第1励振電極14a又は第2励振電極14bの中心を通りX軸方向に沿って延在する直線上)における外縁部72と外縁部82との間のX軸方向に沿った距離、若しくは、外縁部72と外縁部82との間のX軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。長さ $dWe2$ は、所定の位置(例えば、第1励振電極14a又は第2励振電極14bの中心を通りZ'軸方向に沿って延在する直線上)における外縁部74と外縁部84との間のZ'軸方向に沿った距離、若しくは、外縁部74と外縁部84との間のZ'軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。

【0062】

長さ dLe は、長さ Le と長さ $Le2$ との差分として特定される。つまり、式 $dLe = Le2 - Le$ を用いて長さ $Le2$ 、 Le に基づいて算出されるが、式 $dLe = dLe1 + dLe2$ を用いて長さ $dLe1$ 、 $dLe2$ に基づいて算出されてもよい。長さ dWe は、長さ We と長さ $We2$ との差分として特定される。つまり、式 $dWe = We2 - We$ を用いて長さ $We2$ 、 We に基づいて算出されるが、式 $dWe = dWe1 + dWe2$ を用いて長さ $dWe1$ 、 $dWe2$ に基づいて算出されてもよい。

【0063】

第1励振電極14a及び第2励振電極14bの互いの中心の位置は重なるため、長さ $dLe1$ は長さ $dLe2$ と等しく、長さ $Le2$ と長さ Le との差分の半分の大きさである。つまり、 $0 < dLe1 = dLe2 = dLe / 2 = (Le2 - Le) / 2$ の関係を満たす。同様に、長さ $dWe1$ は長さ $dWe2$ と等しく、長さ $We2$ と長さ We との差分の半分の大きさである。つまり、 $0 < dWe1 = dWe2 = dWe / 2 = (We2 - We) / 2$ の関係を満たす。

【0064】

なお、長さ $dLe1$ と長さ $dLe2$ との大小関係は上記に限定されるものではなく、 $0 < dLe1 < dLe2$ 又は $0 < dLe2 < dLe1$ の関係を満たしてもよい。長さ $dWe1$ と長さ $dWe2$ との大小関係についても上記に限定されるものではなく、 $0 < dWe1 < dWe2$ 又は $0 < dWe2 < dWe1$ の関係を満たしてもよい。なお、長さ $dLe1$ 、 $dLe2$ 、 $dWe1$ 、 $dWe2$ のうち少なくとも1つが0よりも大きければ、その他は0であってもよい。例えば、 $0 = dLe1 = dLe2$ 、 $0 < dWe1$ 、且つ、 $0 < dWe2$ の関係を満たしてもよく、 $0 < dLe1$ 、 $0 < dLe2$ 、且つ、 $0 = dWe1 = dWe2$ の関係を満たしてもよい。また、例えば、 $0 = dLe2$ 、 $0 < dLe1$ 、 $0 < dWe1$ 、且つ、

10

20

30

40

50

$0 < dWe2$ の関係を満たしてもよい。但し、長さ $dLe1$ 、 $dLe2$ 、 $dWe1$ 、 $dWe2$ の全てが 0 よりも大きいことが望ましい。つまり、 $0 < dLe1$ 、 $0 < dLe2$ 、 $0 < dWe1$ 、 $0 < dWe2$ の関係が成り立つことが望ましい。

【0065】

図 3 に示すように、振動部 110 における水晶片 11 の厚さを Tq 、第 1 励振電極 14a の厚さを Te 、第 2 励振電極 14b の厚さを $Te2$ とする。

【0066】

厚さ Tq は、例えば、所定の位置における上面 11A と下面 11B との間の Y' 軸方向に沿った距離として特定される。当該所定の位置は、例えば、第 1 励振電極 14a と第 2 励振電極 14b とが対向する領域の中心を通り、 Y' 軸方向に沿って延在する直線上である。厚さ Tq は、第 1 励振電極 14a と第 2 励振電極 14b とが対向する領域における、上面 11A と下面 11B との間の Y' 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定されてもよい。

【0067】

同様に、厚さ Te は、所定の位置（例えば、第 1 励振電極 14a と第 2 励振電極 14b とが対向する領域の中心を通り Y' 軸方向に沿って延在する直線上）における第 1 励振電極 14a の上面と下面との間の Y' 軸方向に沿った距離、若しくは、第 1 励振電極 14a と第 2 励振電極 14b とが対向する領域における第 1 励振電極 14a の上面と下面との間の Y' 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。厚さ $Te2$ は、所定の位置（例えば、第 1 励振電極 14a と第 2 励振電極 14b とが対向する領域の中心を通り Y' 軸方向に沿って延在する直線上）における第 2 励振電極 14b の上面と下面との間の Y' 軸方向に沿った距離、若しくは、第 1 励振電極 14a と第 2 励振電極 14b とが対向する領域における第 2 励振電極 14b の上面と下面との間の Y' 軸方向に沿った距離の平均値又は最大値として特定される。

【0068】

厚さ Tq は厚さ $Te2$ よりも大きく、厚さ $Te2$ は厚さ Te よりも大きい。つまり、 $Te < Te2 < Tq$ の関係が成り立つ。また、水晶片 11 の厚さは第 1 励振電極 14a 及び第 2 励振電極 14b の厚さの和よりも大きいため、 $Te + Te2 < Tq$ の関係が成り立つ。

【0069】

次に、図 4 乃至図 17 を参照しつつ、第 1 実施形態に基づくシミュレーション結果について説明する。

【0070】

図 4 は、第 1 実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図 4 のグラフにおいて、横軸は dLe 又は dWe (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。

【0071】

図 4 において、グラフの横軸が 0 よりも大きいとき、すなわち $Le2 > Le$ 又は $We2 > We$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 1.0 \mu m$$

$$Te = 0.05 \mu m$$

$$Te2 = 0.12 \mu m$$

$$Lq = Wq = 120 \mu m$$

$$Le = 55 \mu m、$$

$$We = 50 \mu m、$$

$$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

【0072】

図 4 において、グラフの横軸が 0 以下のとき、すなわち $Le2 \leq Le$ 又は $We2 \leq We$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 1.0 \mu m$$

$$T_e = 0.05 \mu m$$

$$T_{e2} = 0.12 \mu m$$

$$L_q = W_q = 120 \mu m$$

$$L_{e2} = 55 \mu m$$

$$W_{e2} = 50 \mu m$$

$$dL_e = L_{e2} - L_e = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2} : \text{変数}$$

$$dW_e = W_{e2} - W_e = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2} : \text{変数}$$

【0073】

図4のグラフ中のプロットは、それぞれ、 $dL_e = dW_e$ として dL_e 及び dW_e の両方を変数とした場合のシミュレーション結果、 $dL_e = 0$ （定数）として dW_e を変数とした場合のシミュレーション結果、及び、 dL_e を変数として $dW_e = 0$ （定数）とした場合のシミュレーション結果を示している。図4のグラフ中の横軸である dL_e 、 dW_e の値は、それぞれの場合における変数の値を示している。つまり、横軸 dL_e 、 dW_e の値は、 $dL_e = dW_e$ が変数の場合には dL_e 及び dW_e の両方の値、 dL_e が定数で dW_e が変数の場合には dW_e の値、 dL_e が変数で dW_e が定数の場合には dL_e の値を示している。以下において、グラフの横軸に示す変数の値を「 $\{dL_e, dW_e\}$ 」と表現する。

【0074】

$dL_e = dW_e$ が変数の場合、 dL_e が変数で $dW_e = 0$ （定数）の場合、及び、 $dL_e = 0$ （定数）で dW_e が変数の場合のいずれにおいても、 $0 < \{dL_e, dW_e\}$ となったとき、すなわち、第1励振電極14a及び第2励振電極14bのうち、厚い方の第2励振電極14bの面積が、薄い方の第1励振電極14aの面積よりも大きくなったとき、電気機械結合係数 k が向上する。 $0 \mu m$ から $10 \mu m$ までは $\{dL_e, dW_e\}$ が大きくなるほど、電気機械結合係数 k は向上している。 $10 \mu m < \{dL_e, dW_e\} < 25 \mu m$ の領域では、 $\{dL_e, dW_e\}$ が変化しても電気機械結合係数 k は略一定となっている。なお、 $-25 \mu m \leq \{dL_e, dW_e\} \leq 0$ の領域では、 $dL_e = dW_e$ が変数のときの電気機械結合係数 k 、 dL_e が変数のときの電気機械結合係数 k 、及び、 dW_e が変数のときの電気機械結合係数 k は略同じである。

【0075】

dL_e が変数で $dW_e = 0$ （定数）の場合のプロット、及び、 $dL_e = 0$ （定数）で dW_e が変数の場合のプロットが示すように、 dL_e 及び dW_e の一方を0として他方を0よりも大きくした場合であっても、 dL_e 及び dW_e の一方を0として他方を0以下とした場合に比べて電気機械結合係数 k （%）は向上している。また、 $dL_e = dW_e$ が変数の場合のプロットが示すように、 dL_e 及び dW_e の両方を0よりも大きくした場合の電気機械結合係数 k （%）は、 dL_e 及び dW_e の一方を0として他方を0よりも大きくした場合の電気機械結合係数 k （%）に比べて、さらに向上している。

【0076】

図5は、第1励振電極に位置ずれが生じたときの断面図である。図6は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。

【0077】

図5に示すように、平面視において、第1励振電極14aの中心が、第2励振電極14bの中心から、X軸方向及びZ'軸方向に $\Delta \mu m$ 変位した場合の電気機械結合係数 k の変化を示したのが図6のグラフである。図6のグラフにおいて、横軸は dL_e 及び dW_e （ μm ）を示し、縦軸は電気機械結合係数 k （%）を示している。図6のグラフ中の「位置ずれ」の大きさは、図5に示した「 Δ 」に相当する。グラフの横軸 dL_e 、 dW_e の値を「 $\{dL_e, dW_e\}$ 」と表現する。

【0078】

図5において、シミュレーション条件は以下の通りである。

$$T_q = 1.0 \mu m$$

$$T_e = 0.05 \mu m$$

$T e 2 = 0.12 \mu m$
 $L q = W q = 120 \mu m$
 $L e = 55 \mu m$
 $W e = 50 \mu m$
 $d L e = L e 2 - L e$: 変数
 $d W e = W e 2 - W e$: 変数
 $d L e = d W e$
 $d L e 1 = d L e / 2 - \Delta$
 $d L e 2 = d L e / 2 + \Delta$
 $d W e 1 = d W e / 2 - \Delta$
 $d W e 2 = d W e / 2 + \Delta$

【0079】

$d L e 1 = d L e / 2 - \Delta < 0$ 及び $d W e 1 = d W e / 2 - \Delta < 0$ 、すなわち $d L e / 2 < \Delta$ 及び $d W e / 2 < \Delta$ の関係が成り立つとき、平面視において第1励振電極14aが第2励振電極14bの外側にはみ出る。 $\Delta \leq d L e / 2$ 及び $\Delta \leq d W e / 2$ の関係が成り立つとき、 $0 \mu m < \Delta$ であったとしても、平面視において第1励振電極14aは第2励振電極14bからはみ出ず、第1励振電極14aの全部が第2励振電極14bの一部に重なっている。

【0080】

図6のグラフ中のプロットは、それぞれ、 $\Delta = 0 \mu m$ 、 $1 \mu m$ 、 $5 \mu m$ の場合のシミュレーション結果を示している。 $\Delta = 0 \mu m$ の場合、 $d L e$ 及び $d W e$ が $10 \mu m$ 以上であり $25 \mu m$ 以下となる領域 ($10 \mu m \leq [d L e, d W e] \leq 25$) では、電気機械結合係数 k は $d L e$ 又は $d W e$ に依らず略一定となる。 $\Delta = 0 \mu m$ の場合、 $d L e$ 及び $d W e$ が $10 \mu m$ よりも小さく $0 \mu m$ 以上となる領域 ($0 \mu m \leq [d L e, d W e] < 10 \mu m$) では、 $d L e$ 及び $d W e$ が小さくなるほど電気機械結合係数 k が低下する。 $\Delta = 1 \mu m$ の場合、 $\Delta = 0 \mu m$ の場合と略同じ傾向を示している。

【0081】

$\Delta = 5 \mu m$ の場合、 $d L e$ 及び $d W e$ が $10 \mu m$ よりも小さく 0 以上となる領域 ($0 \mu m \leq [d L e, d W e] < 10 \mu m$) では、電気機械結合係数 k が、 $\Delta = 0 \mu m$ の場合よりも低下している。このとき、 $\Delta = 5 \mu m$ 及び $0 \mu m \leq [d L e, d W e] < 10 \mu m$ であるため、 $d L e / 2 < \Delta$ 及び $d W e / 2 < \Delta$ の関係が成り立ち、平面視において第1励振電極14aが第2励振電極14bの外側にはみ出している。すなわち、平面視において第1励振電極14aが第2励振電極14bの外側にはみ出したとき、電気機械結合係数 k が、 $\Delta = 0 \mu m$ の場合よりも低下している。一方で、 $\Delta = 5 \mu m$ の場合であっても、 $d L e$ 及び $d W e$ が $10 \mu m$ 以上であり $25 \mu m$ 以下となる領域 ($10 \mu m \leq [d L e, d W e] \leq 25$) では、 $\Delta = 0 \mu m$ の場合と略同じ傾向を示している。このとき、 $\Delta = 5 \mu m$ 及 $10 \mu m \leq [d L e, d W e] \leq 25$ であるため、 $\Delta \leq d L e / 2$ 及び $\Delta \leq d W e / 2 < \Delta$ の関係が成り立ち、第1励振電極14aの全部が第2励振電極14bの一部に重なっている。

【0082】

つまり、第1励振電極14aの中心が第2励振電極14bの中心に対して位置ずれを起こしたとしても、第1励振電極14aの全部が第2励振電極14bに重なっているうちは、電気機械結合係数 k の向上効果は維持されている。しかしながら、第1励振電極14aが第2励振電極14bの外側にはみ出した場合には、電気機械結合係数 k の向上効果は失われる。したがって、第1励振電極14aの中心が第2励振電極14bの中心に対して多少位置ずれを起こしたとしても、電気機械結合係数 k の向上効果が維持されるためには、 $d L e$ 及び $d W e$ が大きいことが望ましい。具体的は、第2励振電極14bに対する第1励振電極14aの位置ずれの許容範囲は、 $d L e$ 及び $d W e$ の $1/2$ 以下である。例えば、第2励振電極14bに対する第1励振電極14aの位置ずれが最大で $5 \mu m$ と想定される場合、 $d L e$ 及び $d W e$ は $10 \mu m$ 以上であることが望ましい。第2励振電極14bに

10

20

30

40

50

対する第1励振電極14aの位置ずれが最大で $2.5\mu\text{m}$ と想定される場合、 dLe 及び dWe は $5\mu\text{m}$ 以上であることが望ましい。

【0083】

図7は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図8は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図7のグラフにおいて、横軸は $Te2(\mu\text{m})$ を示し、縦軸は $Te2=0.05\mu\text{m}$ のときの周波数を基準とした周波数変化 $dF(\text{ppm})$ を示している。図8のグラフにおいて、横軸は $Te2(\mu\text{m})$ を示し、縦軸は電気機械結合係数 $k(\%)$ を示している。

【0084】

図7及び図8において、 $0\mu\text{m} < dLe = dWe$ のときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 1.0\mu\text{m}$

$Te = 0.05\mu\text{m}$

$Te2$ ：変数

$Lq = Wq = 120\mu\text{m}$

$Le = 55\mu\text{m}$

$We = 50\mu\text{m}$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$ ：変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$ ：変数

【0085】

図7及び図8において、 $dLe = dWe \leq 0\mu\text{m}$ のときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 1.0\mu\text{m}$

$Te = 0.05\mu\text{m}$

$Te2$ ：変数

$Lq = Wq = 120\mu\text{m}$

$Le2 = 55\mu\text{m}$

$We2 = 50\mu\text{m}$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$ ：変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$ ：変数

【0086】

図7に示すように、 dLe 及び dWe の値に依らず、 $Te2$ が大きくなるほど dF が小さくなる。つまり、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの面積が周波数に与える影響は軽微である。

【0087】

図8に示すように、 $dLe = dWe = 0\mu\text{m}$ のとき、 $0\mu\text{m} < Te2 < 0.10\mu\text{m}$ ($0 < Te2 / Te < 2$) の範囲において、 $Te2(\mu\text{m})$ が小さくなるほど、電気機械結合係数 $k(\%)$ は低下する。 $0.10\mu\text{m} \leq Te2 \leq 0.20\mu\text{m}$ ($2 \leq Te2 / Te \leq 4$) の範囲において、 $Te2(\mu\text{m})$ が大きくなるほど、電気機械結合係数 $k(\%)$ は低下する。

【0088】

図8に示すように、 $dLe < 0\mu\text{m}$ 、且つ、 $dWe < 0\mu\text{m}$ のとき、 $0.05\mu\text{m} < Te2 \leq 0.20\mu\text{m}$ ($1 < Te2 / Te \leq 4$) の範囲において、 $Te2(\mu\text{m})$ が大きくなるほど、電気機械結合係数 $k(\%)$ は低下する。 $0.12\mu\text{m} < Te2 \leq 0.20\mu\text{m}$ ($2.4 < Te2 / Te \leq 4$) の範囲においては、 $dLe < 0\mu\text{m}$ 、且つ、 $dWe < 0\mu\text{m}$ のときの電気機械結合係数 $k(\%)$ は、 $dLe = dWe = 0\mu\text{m}$ のときの電気機械結合係数 $k(\%)$ よりも低下している。

【0089】

図8に示すように、 $0\mu\text{m} < dLe$ 、且つ、 $0\mu\text{m} < dWe$ のとき、 $0.05\mu\text{m} < Te2 \leq 0.15\mu\text{m}$ ($1 \leq Te2 / Te \leq 3$) の範囲において、 $Te2(\mu\text{m})$ が大きくなる

10

20

30

40

50

なるほど、電気機械結合係数 k (%) は向上する。 $0.15 \mu\text{m} < T_{e2} \leq 0.20 \mu\text{m}$ ($3 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲においては、 T_{e2} (μm) が大きくなるほど、電気機械結合係数 k (%) は低下する。つまり、 T_{e2} が $0.15 \mu\text{m}$ ($T_{e2}/T_e = 3$) 程度のときに、電気機械結合係数 k (%) は最大となる。また、 $0.10 \mu\text{m} \leq T_{e2} \leq 0.20 \mu\text{m}$ ($2 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲において、 T_{e2} の変化に対する電気機械結合係数 k の変化は小さく、電気機械結合係数 k は略一定である。 $0.05 \mu\text{m} \leq T_{e2} \leq 0.20 \mu\text{m}$ ($1 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲において、 $0 \mu\text{m} < dL_e$ 、且つ、 $0 \mu\text{m} < dW_e$ のときの電気機械結合係数 k (%) は、 $dL_e = dW_e = 0 \mu\text{m}$ のときの電気機械結合係数 k (%) よりも向上している。

【0090】

したがって、第1励振電極14a及び第2励振電極14bのうち、厚い方の第2励振電極14bの面積が、薄い方の第1励振電極14aの面積よりも大きいとき、電気機械結合係数 k (%) は向上する。また、電気機械結合係数 k (%) が安定する $0.10 \mu\text{m} \leq T_{e2} \leq 0.20 \mu\text{m}$ ($2 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲においては、周波数を調整するために T_{e2} (μm) を変動させたとしても、電気機械結合係数 k (%) の変動を抑制することができる。

【0091】

図9は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図9のグラフにおいて、横軸は水晶片11の厚さ T_q に対する第2励振電極14bの厚さ T_{e2} の比率 T_{e2}/T_q を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。

【0092】

図9において、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.0 \mu\text{m}$

$T_e : 0.05$

T_{e2} : 変数

$L_q = W_q = 120 \mu\text{m}$

$L_e = 55 \mu\text{m}$

$W_e = 50 \mu\text{m}$

$dL_e = L_{e2} - L_e = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2} = 25 \mu\text{m}$

$dW_e = W_{e2} - W_e = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2} = 25 \mu\text{m}$

$\rho = 2,699 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

【0093】

$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$ は、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの平均密度である。第1励振電極14aの密度を ρ_1 、第2励振電極14bの密度を ρ_2 、第1励振電極14aの第2励振電極14bと対向する部分の体積を V_1 、第2励振電極14bの第1励振電極14aと対向する部分の体積を V_2 したとき、次の式によって算出される。

$$\rho = (\rho_1 \times V_1 + \rho_2 \times V_2) / (V_1 + V_2)$$

なお、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの材質が同じであれば、当該材質の密度を ρ とする。本シミュレーションにおいて第1励振電極14a及び第2励振電極14bの材質はアルミニウムであることから、 ρ はアルミニウムの密度である $2,699 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ とした。

【0094】

$0.05 \leq T_{e2}/T_q \leq 0.20$ の範囲において、電気機械結合係数 k (%) は、 $T_{e2}/T_q = 0.13$ 付近において最大となる。ここでは、電気機械結合係数 k (%) が最大となる T_{e2}/T_q を、「最適 T_{e2}/T_q 」とする。

【0095】

図10は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図10のグラフには、図9に示した最適 T_{e2}/T_q が、 T_e 及び ρ を変数としてプロットされている。図10のグラフにおいて、横軸は $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$ を示し、縦軸は最適 T_{e2}/T_q を示している。

10

20

30

40

50

【0096】

水晶片11の厚さ T_q に対する第1励振電極14aの厚さ T_e の比率 T_e/T_q が大きくなるにつれて、最適 T_{e2}/T_q は上昇している。また、 T_e/T_q を一定とした場合、 ρ (kg/m^3)が大きくなるにつれて、最適 T_{e2}/T_q は低下している。図10に示したグラフのフィッティングにより、電気機械結合係数 k (%)が最大となる条件式が、次式のように求められる。

$$T_{e2}/T_q = 0.00001 \times \rho + b \pm 0.01$$

【0097】

$T_e/T_q = 0.02$ のとき、 $b = 0.16369$ となる。 $T_e/T_q = 0.05$ のとき、 $b = 0.17572$ となる。 $T_e/T_q = 0.10$ のとき、 $b = 0.19861$ となる。 $T_e/T_q = 0.15$ のとき、 $b = 0.21293$ となる。

10

【0098】

図11は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図11のグラフには、図10に示した b が、 T_e/T_q を変数としてプロットされている。図11のグラフにおいて、横軸は T_e/T_q を示し、縦軸は b を示している。

【0099】

$0.02 \leq T_e/T_q \leq 0.15$ の範囲において、 T_e/T_q が大きくなるほど、 b は大きくなっている。図11に示したグラフのフィッティングにより、 b と T_e/T_q との関係式が、以下のように求められる。

$$b = 0.39 T_e/T_q + 0.16$$

20

【0100】

図10で求めた式に、図11で求めた式を代入することで、電気機械結合係数 k (%)が最大となる条件式が、以下のように求められる。

$$T_{e2}/T_q = 0.00001 \times \rho + 0.39 T_e/T_q + 0.16 \pm 0.01$$

【0101】

図12は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図12のグラフにおいて、横軸は T_{e2} (μm)を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%)を示している。

【0102】

図12において、 $0 \mu\text{m} < dLe = dWe$ のときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$$T_q = 1.0 \mu\text{m}$$

$$T_e = 0.05 \mu\text{m}$$

$$T_{e2} : \text{変数}$$

$$L_q = W_q = 120 \mu\text{m}$$

$$Le = 55 \mu\text{m}$$

$$We = 50 \mu\text{m}$$

$$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

【0103】

図12において、 $dLe = dWe \leq 0 \mu\text{m}$ のときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$$T_q = 1.0 \mu\text{m}$$

$$T_e = 0.05 \mu\text{m}$$

$$T_{e2} : \text{変数}$$

$$L_q = W_q = 120 \mu\text{m}$$

$$Le2 = 55 \mu\text{m}$$

$$We2 = 50 \mu\text{m}$$

$$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

40

50

【0104】

dLe及びdWeの一方を0として他方を0よりも大きくした場合、 $0.05\mu\text{m} \leq T_{e2} \leq 0.20\mu\text{m}$ ($1 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲において電気機械結合係数k (%) が最大となるのは、 T_{e2} が $0.10\mu\text{m}$ 以上 $0.15\mu\text{m}$ 以下 ($2 \leq T_{e2}/T_e \leq 3$) のときである。また、 $0.10\mu\text{m} \leq T_{e2} \leq 0.20\mu\text{m}$ ($2 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲において、 T_{e2} の変化に対する電気機械結合係数kの変化は小さく、電気機械結合係数k (%) は略一定である。つまり、 T_{e2} に対する電気機械結合係数k (%) の変化は、dLe及びdWeの一方が0であって他方が0よりも大きい場合であっても、dLe及びdWeの両方が0よりも大きい場合と同様の傾向を示す。但し、 $0.05\mu\text{m} \leq T_{e2} \leq 0.20\mu\text{m}$ ($1 \leq T_{e2}/T_e \leq 4$) の範囲において T_{e2} が同じであれば、dLe及びdWeの両方が0よりも大きい場合の電気機械結合係数k (%) は、dLe及びdWeの一方が0であって他方が0よりも大きい場合の電気機械結合係数k (%) よりも向上している。

10

【0105】

図13は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図13において、横軸はdLe及びdWe (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数k (%) を示している。グラフの横軸dLe, dWeの値を「[dLe, dWe]」と表現する。

【0106】

図13において、グラフの横軸が0よりも大きいとき、すなわち $L_e < L_{e2}$ 及び $W_e < W_{e2}$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

20

$$T_q = 1.5\mu\text{m}$$

$$T_e = 0.08\mu\text{m}$$

$$T_{e2} = 0.20\mu\text{m}$$

$$L_q = W_q = 120\mu\text{m}$$

$$L_e = 70\mu\text{m},$$

$$W_e = 70\mu\text{m},$$

$$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

$$dLe = dWe$$

【0107】

図13において、グラフの横軸が0以下のとき、すなわち $L_{e2} \leq L_e$ 及び $W_{e2} \leq W_e$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

30

$$T_q = 1.5\mu\text{m}$$

$$T_e = 0.08\mu\text{m}$$

$$T_{e2} = 0.20\mu\text{m}$$

$$L_q = W_q = 120\mu\text{m}$$

$$L_{e2} = 70\mu\text{m}$$

$$W_{e2} = 70\mu\text{m}$$

$$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

$$dLe = dWe$$

40

【0108】

図13におけるプロットは、図4における $dLe = dWe$ のプロットと同様の傾向を示している。つまり、一対の励振電極のうち一方の励振電極が他方の励振電極よりも厚く、厚い方の励振電極の面積が薄い方の励振電極の面積よりも大きいのであれば、一対の励振電極及び水晶片のそれぞれの寸法が異なっていたとしても、dLe, dWeの変化に対する電気機械結合係数k (%) の変化は、同様の傾向を示す。

【0109】

図14は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図14のグラフにおいて、横軸は T_{e2} (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数k (%) を示し

50

ている。

【0110】

図14において、 $0\ \mu\text{m} < dLe = dWe$ のときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 1.5\ \mu\text{m}$

$Te = 0.08\ \mu\text{m}$

$Te2$ ：変数

$Lq = Wq = 120\ \mu\text{m}$

$Le = 70\ \mu\text{m}$

$We = 70\ \mu\text{m}$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$ ：変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$ ：変数

【0111】

図14において、 $dLe = dWe \leq 0\ \mu\text{m}$ のときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 1.5\ \mu\text{m}$

$Te = 0.08\ \mu\text{m}$

$Te2$ ：変数

$Lq = Wq = 120\ \mu\text{m}$

$Le2 = 70\ \mu\text{m}$

$We2 = 70\ \mu\text{m}$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$ ：変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$ ：変数

【0112】

図14における $dLe = dWe = 15\ \mu\text{m}$ のプロットは、図8における $dLe = dWe = 5\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ のプロットと同様の傾向を示している。つまり、一对の励振電極のうち一方の励振電極が他方の励振電極よりも厚く、厚い方の励振電極の面積が薄い方の励振電極の面積よりも大きいのであれば、一对の励振電極及び水晶片のそれぞれの寸法が異なっていたとしても、 $Te2$ の変化に対する電気機械結合係数 k (%)の変化は、同様の傾向を示す。

【0113】

図15は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図15において、横軸は dLe (μm)を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%)を示している。

【0114】

図15において、第1励振電極及び第2励振電極の重なる部分の形状及び面積が同一であって、第1励振電極及び第2励振電極の形状が異なる2つの構成例についてシミュレーションを行っている。

【0115】

1つ目の構成例において、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの平面形状は面積の等しい正方形である。第1励振電極14aの各辺は、X軸方向及びZ'軸方向に沿って延在している。第2励振電極14bは、第1励振電極14aに対して中心が重なった状態で45度傾けて配置され、対角線がX軸方向及びZ'軸方向に沿って延在している。第1励振電極14a及び第2励振電極14bの互いに対向する部分の形状は正八角形状となっている。第1励振電極14aのX軸方向に沿った長さを Le とし、第2励振電極14bのX軸方向に沿った長さを $Le2$ とする。

【0116】

2つ目の構成例において、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの平面形状は正八角形であり、互いの中心は重なっている。第1励振電極14aの互いに対向する辺同士の間隔の長さを Le とし、第2励振電極14bの互いに対向する辺同士の間隔の長さを $Le2$ とする。

【0117】

図15において、シミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 1.5 \mu m$$

$$Te = 0.08 \mu m$$

$$Te2 = 0.20 \mu m$$

$$Lq = Wq = 120 \mu m$$

$$Le = 70 \mu m$$

$$dLe = Le2 - Le : \text{変数}$$

【0118】

図15における2つ目の構成例に基づくプロットは、図4における $dLe = dWe$ のプロットと同様の傾向を示している。つまり、第1励振電極14a及び第2励振電極14bのうち厚い方の励振電極の面積が、薄い方の励振電極の面積よりも大きく、且つ、厚い方の励振電極の一部が薄い方の励振電極の全部に重なっていれば、第1励振電極14a及び第2励振電極14bの平面形状に依らず、電気機械結合係数 $k(\%)$ が向上する。

【0119】

また、1つ目の構成例において、例えば、第2励振電極14bのX軸方向に延在する対角線上において $dLe = Le2 - Le = Le \times 2^{(1/2)} - Le = 28.99 > 0$ となっている。しかし、1つ目の構成例における電気機械結合係数 $k(\%)$ は、 $0 \mu m < dLe < 5 \mu m$ の範囲での2つ目の構成例における電気機械結合係数 $k(\%)$ と同程度であり、同じ dLe での2つ目の構成例における電気機械結合係数 $k(\%)$ に比べて小さい。つまり、1つ目の構成例における一对の励振電極の対向面積が2つ目の構成例における一对の励振電極の対向面積と同じであり、1つ目の構成例において部分的に $dLe > 0$ となっ

【0120】

図16は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図16のグラフにおいて、横軸は dLe 及び dWe (μm)を示し、縦軸は規格化された電気機械結合係数 $k(\%)$ を示している。グラフの横軸 dLe 、 dWe の値を「 $[dLe, dWe]$ 」と表現する。

【0121】

図16において、 $Tq = 0.5 \mu m$ とときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 0.5 \mu m$$

$$Te = 0.05 \mu m$$

$$Te2 = 0.12 \mu m$$

$$Lq = Wq = 120 \mu m$$

$$Le = 30 \mu m$$

$$We = 30 \mu m$$

$$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

$$dLe = dWe$$

【0122】

図16において、 $Tq = 1.0 \mu m$ とときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 1.0 \mu m$$

$$Te = 0.05 \mu m$$

$$Te2 = 0.12 \mu m$$

$$Lq = Wq = 120 \mu m$$

$$Le = 55 \mu m$$

$$We = 50 \mu m$$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$: 変数
 $dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$: 変数
 $dLe = dWe$

【0123】

図16において、 $Tq = 1.5 \mu m$ とときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 1.5 \mu m$

$Te = 0.05 \mu m$

$Te2 = 0.12 \mu m$

$Lq = Wq = 120 \mu m$

$Le = 70 \mu m$

$We = 70 \mu m$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$: 変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$: 変数

$dLe = dWe$

【0124】

図16において、 $Tq = 2.0 \mu m$ とときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 2.0 \mu m$

$Te = 0.05 \mu m$

$Te2 = 0.12 \mu m$

$Lq = Wq = 120 \mu m$

$Le = 55 \mu m$

$We = 50 \mu m$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$: 変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$: 変数

$dLe = dWe$

【0125】

図16において、 $Tq = 3.0 \mu m$ とときのシミュレーション条件は以下の通りである。

$Tq = 3.0 \mu m$

$Te = 0.05 \mu m$

$Te2 = 0.12 \mu m$

$Lq = Wq = 120 \mu m$

$Le = 55 \mu m$

$We = 50 \mu m$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$: 変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$: 変数

$dLe = dWe$

【0126】

図16に示すように、 Tq が大きくなるほど、電気機械結合係数 k (%)が向上するための dLe 及び dWe が大きくなる。以下、電気機械結合係数 k (%)を最大とするために必要な最小の dLe 及び dWe を、「最小 $\{dLe, dWe\}$ 」とする。

【0127】

図17は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図17のグラフには、図16のグラフに基づいて求められた、 Tq と最小 $\{dLe, dWe\}$ との関係がプロットされている。図17のグラフにおいて、横軸は Tq (μm)を示し、縦軸は最小 $\{dLe, dWe\}$ (μm)を示している。

【0128】

Tq が大きくなるにつれて、最小 $\{dLe, dWe\}$ は上昇している。図17に示したグラフのフィッティングにより、電気機械結合係数 k (%)が最大となる条件式が次式のように求められる。なお、次式の右辺 $\{dLe, dWe\}$ は、第1励振電極及び第2励振電極のある方向において隣接する辺同士の間距離 De の一例に相当する。

$$5.22 \times Tq - 0.45 \leq [dLe, dWe]$$

【0129】

以上説明した通り、本実施形態によれば、第2励振電極14bの面積は第1励振電極14aの面積よりも大きく、第2励振電極14bの一部が第1励振電極14aの全てと重なっており、第2励振電極14bの厚さ T_{e2} は第1励振電極14aの厚さ T_e よりも大きい。

【0130】

これによれば、電気機械結合係数 k (%)を向上させることができる。

【0131】

また、本実施形態において、第1励振電極14aは、例えば、製造工程において周波数を調整するためにトリミング処理される側である。

10

【0132】

これによれば、当該トリミング処理によって、厚さ T_e を厚さ T_{e2} よりも小さくすることができる。したがって、第1励振電極14a及び第2励振電極14bを成膜時に異なる厚さに設けなくても $T_e < T_{e2}$ とすることができるため、製造工程を簡略化することができる。

【0133】

また、本実施形態において、第2励振電極14bは、周波数を調整するためにトリミング処理される側であってもよい。

【0134】

20

これによれば、第2励振電極14bの面積は第1励振電極14aの面積よりも大きいいため、第1励振電極14aをトリミング処理する場合に比べて、トリミング処理による周波数の調整効率を高めることができる。また、厚さ T_{e2} が厚さ T_e に比べて充分大きい場合、例えば $2 \times T_e \leq T_{e2} \leq 4 \times T_e$ の範囲において、厚さ T_{e2} の変化に対して電気機械結合係数 k (%)の変化が小さいため、厚さ T_{e2} がトリミング処理によって変動したとしても、電気機械結合係数 k (%)の低下を抑制することができる。

【0135】

また、本実施形態において、第1励振電極14aの外縁部71～74の全てが、第2励振電極14bの外縁部81～84よりも内側に位置している。

【0136】

30

これによれば、第1励振電極14aの外縁部71～74の一部が、第2励振電極14bの外縁部81～84の一部と重なる構成よりも、さらに電気機械結合係数 k (%)を向上させることができる。また、第2励振電極14bの厚さ T_{e2} の変化に対して電気機械結合係数 k (%)の変化を小さくすることができるため、周波数を調整するために第2励振電極14bにトリミング処理を施したときに、電気機械結合係数 k (%)の低下を抑制することができる。また、第1励振電極14aが第2励振電極14bに対して位置ずれを起こしたとしても、第1励振電極14aの全部が第2励振電極14bに重なる状態が維持されるため、電気機械結合係数 k (%)の低下を抑制することができる。

【0137】

また、本実施形態において、 $T_{e2} / Tq = 0.00001 \times p + 0.39 \times T_e / Tq + 0.16 \pm 0.01$ の関係が成り立つ。

40

【0138】

これによれば、厚さ Tq 、 T_e 、 T_{e2} が上記式の条件を満たすとき、電気機械結合係数 k (%)が最大となる。

【0139】

また、本実施形態において、 $5.22 \times Tq - 0.45 \leq dLe$ 、及び、 $5.22 \times Tq - 0.45 \leq dWe$ の少なくとも一方の関係が成り立ち、望ましくは両方の関係が成り立つ。

【0140】

これによれば、 Tq 、 dLe 及び dWe の関係による電気機械結合係数 k (%)の低下

50

を抑制することができる。つまり、電気機械結合係数 k (%) の充分に向上させることができる。

【0141】

以下に、その他の実施形態について説明する。なお、第1実施形態に示した構成と同一又は類似の構成について同一又は類似の符号を付し、その説明を適宜省略する。また、同様の構成による同様の作用効果については、逐次言及しない。

【0142】

<第2実施形態>

次に、図18及び図19を参照しつつ、第2実施形態に係る水晶振動素子200の構成について説明する。

【0143】

第1励振電極214aの面積は、第2励振電極214bの面積よりも大きく、第1励振電極214aの長さ L_e は第2励振電極214bの長さ L_{e2} よりも大きく、第1励振電極214aの長さ W_e は第2励振電極214bの長さ W_{e2} よりも大きい。第1励振電極214aの厚さ T_e は、第2励振電極214bの厚さ T_{e2} よりも大きい。

【0144】

水晶振動素子200は、第2励振電極214bに積層された絶縁膜241をさらに備えている。絶縁膜241の材質は、例えば、 SiO_2 などの酸化シリコンである。但し、絶縁膜241の材質は、これに限定されるものではなく、窒化シリコン、酸窒化シリコン及び酸化アルミニウムなどの無機系絶縁体、並びに、ポリビニルフェノール、ポリビニルアルコール、エーテルポリマー、ポリイミド、アクリル樹脂などの有機絶縁体のいずれかであってよい。

【0145】

図18に示すように、絶縁膜241は、振動部210の略全域に亘って延在している。絶縁膜241の面積は、第1励振電極214aの面積、及び、第2励振電極214bの面積よりも大きく、振動部210の面積と略等しい。したがって、平面視において、絶縁膜241のX軸方向に沿った長さを L_{e3} 、絶縁膜241のZ'軸方向に沿った長さを W_{e3} としたとき、 $L_{e2} < L_e < L_{e3} = L_q$ 、及び、 $W_{e2} < W_e < W_{e3} = W_q$ の関係が成り立つ。平面視において、絶縁膜241の中心は、第1励振電極214aの中心、及び、第2励振電極214bの中心と重なっている。したがって、第2励振電極214bの外縁部の全てが、第1励振電極214aの外縁部よりも内側に設けられ、絶縁膜241の外縁部の全てが、第1励振電極214aの外縁部よりも外側に設けられている。

【0146】

図19に示すように、絶縁膜241は、例えば、第2励振電極214bの水晶片11とは反対側の面に積層されている。絶縁膜241の厚さを T_{e3} としたとき、 $T_e < T_{e2} < T_{e3}$ の関係、及び、 $T_e < T_{e2} + T_{e3}$ の関係が成り立つ。

【0147】

厚さ T_{e3} は、例えば、所定の位置（例えば、第1励振電極214a、第2励振電極214b及び絶縁膜241が重なる領域の中心を通りY'軸方向に沿って延在する直線上）における絶縁膜241の上面と下面との間のY'軸方向に沿った距離として特定される。厚さ T_{e3} は、第1励振電極214a、第2励振電極214b及び絶縁膜241が重なる領域における絶縁膜241の上面と下面との間のY'軸方向に沿った距離の平均値、最大値又は最小値として特定されてもよい。

【0148】

なお、絶縁膜241、第1励振電極214a及び第2励振電極214bの位置や大小関係は、以下の条件の全てを満たすのであれば、上記の構成に限定されるものではない。条件の1つ目は、絶縁膜241が、一对の励振電極のうち平面視における面積が小さい方の励振電極に積層されていることである。条件の2つ目は、一对の励振電極のうち平面視における面積が小さい方の励振電極の厚さと絶縁膜241の厚さとの和が、一对の励振電極のうち平面視における面積が大きい方の励振電極の厚さよりも大きいことである。条件の

10

20

30

40

50

3つ目は、一对の励振電極のうち平面視における面積が小さい方の励振電極及び絶縁膜241からなる積層体240の面積が、一对の励振電極のうち平面視における面積が大きい方の励振電極の面積よりも大きいことである。ここで、「積層体240の面積」は、一对の励振電極のうち平面視における面積が小さい方の励振電極と、絶縁膜241との両方が重なって延在する部分の面積だけではなく、片方だけが延在する部分の面積も含む。条件の4つ目は、平面視において、積層体240の一部が、一对の励振電極のうち平面視における面積が大きい方の励振電極の全部と重なっていることである。

【0149】

例えば、図18に示した構成例は、 $L_{e2} < L_e < L_{e3} < L_q$ の関係が成り立つように変形されてもよい。同様に、 $W_{e2} < W_e < W_{e3} < W_q$ の関係が成り立つように変形されてもよい。

10

【0150】

また、例えば、図18に示した構成例は、平面視における絶縁膜241の中心が、平面視における第1励振電極214a及び第2励振電極214bの少なくとも一方の中心に対して、X軸正方向側、X軸負方向側、Z'軸正方向側又はZ'軸負方向側に位置するように変形されてもよい。

【0151】

また、例えば、図19に示した構成例は、 $T_{e2} < T_{e3} \leq T_e < T_{e2} + T_{e3}$ が成り立つように変形されてもよく、 $T_{e3} \leq T_{e2} \leq T_e < T_{e2} + T_{e3}$ の関係が成り立つように変形されてもよい。同様に、 $T_e \leq T_{e2} < T_{e3} < T_{e2} + T_{e3}$ の関係が成り立つように変形されてもよく、 $T_e \leq T_{e3} \leq T_{e2} < T_{e2} + T_{e3}$ の関係が成り立つように変形されてもよく、 $T_e < T_{e3} \leq T_{e2} < T_{e2} + T_{e3}$ の関係が成り立つように変形されてもよい。

20

【0152】

また、例えば、図19に示した構成例は、絶縁膜241が水晶片11と第2励振電極214bとの間に設けられるように変形されてもよい。水晶振動素子200は、第1励振電極214aに積層される絶縁膜をさらに備えてもよい。つまり、一对の励振電極のうち平面視における面積が小さい方の励振電極に第1の絶縁膜を積層し、一对の励振電極のうち平面視における面積が大きい方の励振電極に第2の絶縁膜を積層してもよい。なお、電気機械結合係数kの低下を抑制する観点から、面積が小さい方の励振電極の厚さと第1の絶縁膜の厚さの和は、面積が大きい方の励振電極の厚さと第2の絶縁膜の厚さの和よりも大きいことが望ましい。

30

【0153】

次に、図20乃至図24を参照しつつ、第2実施形態に基づくシミュレーション結果について説明する。

【0154】

図20は、第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図20のグラフにおいて、横軸は dL_e 及び dW_e (μm)を示し、縦軸は電気機械結合係数k (%)を示している。グラフの横軸 dL_e , dW_e の値を「 $[dL_e, dW_e]$ 」と表現する。図20の「SiO2」は絶縁膜241を意味している。他の図面についても同様である。

40

【0155】

図20において、 $T_{e2} < T_e$ の場合であって、 $[dL_e, dW_e]$ が0よりも大きいとき、すなわち $L_{e2} < L_e$ 及び $W_e < W_{e2}$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.0 \mu m$

T_e : 変数

T_{e2} : 変数

$T_{e3} = 0.12 \mu m$

$L_q = W_q = 120 \mu m$

50

$L_e = 55 \mu m$ 、
 $W_e = 50 \mu m$ 、
 $dL_e = L_e - L_{e2} = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2}$: 変数
 $dW_e = W_e - W_{e2} = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2}$: 変数
 $dL_e = dW_e$
 【0156】

図20において、 $T_{e2} < T_e$ の場合であって、 $\{dL_e, dW_e\}$ が0以下のとき、すなわち $L_e \leq L_{e2}$ 及び $W_e \leq W_{e2}$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.0 \mu m$
 T_e : 変数
 T_{e2} : 変数
 $T_{e3} = 0.12 \mu m$
 $L_q = W_q = 120 \mu m$
 $L_{e2} = 55 \mu m$
 $W_{e2} = 50 \mu m$
 $dL_e = L_e - L_{e2} = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2}$: 変数
 $dW_e = W_e - W_{e2} = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2}$: 変数
 $dL_e = dW_e$
 【0157】

図20において、 $T_e < T_{e2}$ の場合におけるシミュレーション条件は、 $dL_e = L_{e2} - L_e$ 、且つ、 $dW_e = W_{e2} - W_e$ であることを除き、 $T_{e2} < T_e$ の場合におけるシミュレーション条件と同じである。図20において、「SiO2あり」と記載されている場合、 $L_{e3} = L_q$ 、 $W_{e3} = W_q$ である。

【0158】
 $-25 \mu m \leq \{dL_e, dW_e\} \leq 25 \mu m$ の範囲におけるいずれの $\{dL_e, dW_e\}$ においても、 $T_e < T_{e2}$ 且つ絶縁膜241が設けられている場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ は、絶縁膜241が設けられていない場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ よりも向上している。 $-25 \mu m \leq \{dL_e, dW_e\} \leq 25 \mu m$ の範囲におけるいずれの $\{dL_e, dW_e\}$ においても、 $T_{e2} < T_e$ 且つ絶縁膜241が設けられている場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ は、 $T_e < T_{e2}$ 且つ絶縁膜241が設けられている場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ よりもさらに向上している。つまり、一对の励振電極のうち薄い方の励振電極に絶縁膜241を積層する場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ は、一对の励振電極のうち厚い方の励振電極に絶縁膜241を積層する場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ よりも向上する。

【0159】
 $T_{e2} < T_e$ の場合に、 $0 < \{dL_e, dW_e\}$ の範囲における電気機械結合係数 $k(\%)$ は、 $\{dL_e, dW_e\} \leq 0$ の範囲における電気機械結合係数 $k(\%)$ よりも向上している。つまり、 $T_{e2} < T_e$ の場合、 $L_{e2} < L_e$ 及び $W_{e2} < W_e$ のときに電気機械結合係数 $k(\%)$ が向上している。また、 $T_e < T_{e2}$ の場合も、 $0 < \{dL_e, dW_e\}$ の範囲における電気機械結合係数 $k(\%)$ は、 $\{dL_e, dW_e\} \leq 0$ の範囲における電気機械結合係数 $k(\%)$ よりも向上している。つまり、 $T_e < T_{e2}$ の場合、 $L_e < L_{e2}$ 及び $W_e < W_{e2}$ のときに電気機械結合係数 $k(\%)$ が向上している。まとめると、一对の励振電極のうち絶縁膜が積層されている方の励振電極の厚さが、一对の励振電極のうち絶縁膜が積層されていない方の励振電極の厚さよりも小さい場合及び大きい場合のいずれの場合においても、一对の励振電極のうち厚い方の励振電極の面積が薄い方の励振電極の面積よりも大きい場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ が、一对の励振電極のうち厚い方の励振電極の面積が薄い方の励振電極の面積よりも小さい場合の電気機械結合係数 $k(\%)$ よりも向上している。

【0160】

図 2 1 は、第 2 実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図 2 1 のグラフにおいて、横軸は dLe 及び dWe (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。グラフの横軸 dLe , dWe の値を「 $[dLe, dWe]$ 」と表現する。

【0161】

図 2 1 において、 $[dLe, dWe]$ が 0 よりも大きいとき、すなわち $Le2 < Le$ 及び $We2 < We$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 1.0 \mu m$$

$$Te = 0.10 \mu m$$

$$Te2 = 0.05 \mu m$$

$$Te3 = 0.12 \mu m$$

$$Lq = Wq = 120 \mu m$$

$$Le = 55 \mu m、$$

$$We = 50 \mu m、$$

$$dLe = Le - Le2 = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We - We2 = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

$$dLe = dWe$$

$$Le3 : \text{変数}$$

$$We3 : \text{変数}$$

【0162】

図 2 1 において、 $[dLe, dWe]$ が 0 以下のとき、すなわち $Le \leq Le2$ 及び $We \leq We2$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$$Tq = 1.0 \mu m$$

$$Te = 0.10 \mu m$$

$$Te2 = 0.05 \mu m$$

$$Te3 = 0.12 \mu m$$

$$Lq = Wq = 120 \mu m$$

$$Le2 = 55 \mu m$$

$$We2 = 50 \mu m$$

$$dLe = Le - Le2 = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2 : \text{変数}$$

$$dWe = We - We2 = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2 : \text{変数}$$

$$dLe = dWe$$

$$Le3 : \text{変数}$$

$$We3 : \text{変数}$$

【0163】

図 2 1 には、振動部 210 の下面全体に絶縁膜 241 を設けた場合と、第 2 励振電極 214b の下面のみに絶縁膜 241 を設けた場合と、絶縁膜 241 が設けられていない場合とにおけるシミュレーション結果をプロットしている。振動部 210 の下面全体に絶縁膜 241 を設けた場合とは、 $Le3 = Lq$ 、且つ、 $We3 = Wq$ の関係が成り立っていることを意味する。第 2 励振電極 214b の下面のみに絶縁膜 241 を設けた場合とは、 $Le3 = Le2$ 、且つ、 $We3 = We2$ の関係が成り立っていることを意味する。絶縁膜 241 が設けられていない場合とは、 $Le3 = We3 = 0$ の関係が成り立っていることを意味する。

【0164】

$-25 \mu m \leq [dLe, dWe] \leq 25 \mu m$ の範囲におけるいずれの $[dLe, dWe]$ においても、振動部 210 の下面全体に絶縁膜 241 を設けた場合の電気機械結合係数 k (%) は、絶縁膜 241 が設けられていない場合の電気機械結合係数 k (%) よりも向上している。しかし、 $-25 \mu m \leq [dLe, dWe] \leq 25 \mu m$ の範囲におけるいずれの $[dLe, dWe]$ においても、第 2 励振電極 214b の下面のみに絶縁膜 241 を設けた場合の電気機械結合係数 k (%) は、絶縁膜 241 が設けられていない場合の電気機

10

20

30

40

50

械結合係数 k (%) よりも低下している。

【0165】

以上のことから、平面視において一対の励振電極のうち面積の小さい方の励振電極と重なる領域にしか絶縁膜 241 が設けられていない場合には、電気機械結合係数 k (%) の向上効果は得られないことが示された。また、平面視において、第2励振電極 214b の外縁部の全てが、第1励振電極 214a の外縁部よりも内側に設けられ、絶縁膜 241 の外縁部の全てが、第1励振電極 214a の外縁部よりも外側に設けられている場合に、電気機械結合係数 k (%) の向上効果が得られることが示された。

【0166】

図22は、第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図22のグラフにおいて、横軸は T_e3 (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。

【0167】

図22において、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.0 \mu m$

T_e : 変数

T_e2 : 変数

T_e3 : 変数

$L_q = W_q = 120 \mu m$

$L_e2 = 55 \mu m$

$W_e2 = 50 \mu m$

$L_e3 = L_q$

$W_e3 = W_q$

$dLe = Le2 - Le = 2 \times dLe1 = 2 \times dLe2$: 変数

$dWe = We2 - We = 2 \times dWe1 = 2 \times dWe2$: 変数

$dLe = dWe$

【0168】

図22に示すように、 $0.06 \mu m \leq T_e3 \leq 0.20 \mu m$ の範囲において、 $T_e = 0.05 \mu m$ 、 $T_e2 = 0.10 \mu m$ 、 $dLe = dWe = 25 \mu m$ の場合の電気機械結合係数 k (%) は、 $T_e = 0.05 \mu m$ 、 $T_e2 = 0.05 \mu m$ 、 $dLe = dWe = 0 \mu m$ の場合の電気機械結合係数 k (%) よりも向上している。 $T_e = 0.10 \mu m$ 、 $T_e2 = 0.05 \mu m$ 、 $dLe = dWe = -25 \mu m$ の場合の電気機械結合係数 k (%) は、 $T_e = 0.05 \mu m$ 、 $T_e2 = 0.10 \mu m$ 、 $dLe = dWe = 25 \mu m$ の場合の電気機械結合係数 k (%) よりもさらに向上している。つまり、平面視において、一対の励振電極のうち厚い方の励振電極の一部に薄い方の励振電極の全部が重なっている場合に、絶縁膜がどちらの励振電極の側に設けられたとしても、電気機械結合係数 k (%) は向上する。しかし、薄い方の励振電極の側に絶縁膜が設けられている場合には、厚い方の励振電極の側に絶縁膜が設けられている場合よりも、電気機械結合係数 k (%) は向上する。

【0169】

また、 $T_e = 0.10 \mu m$ 、 $T_e2 = 0.05 \mu m$ 、 $dLe = dWe = -25 \mu m$ の場合、 T_e3 の変化に対する電気機械結合係数 k (%) の変化が小さい。つまり、平面視において、一対の励振電極のうち厚い方の励振電極の一部に薄い方の励振電極の全部が重なっており、且つ、薄い方の励振電極の側に絶縁膜が設けられている場合、電気機械結合係数 k (%) は、絶縁膜の膜厚に対して安定である。つまり、製造工程において周波数を調整するためのトリミング処理を絶縁膜に対して行ったとしても、電気機械結合係数 k (%) の低下を抑制することができる。

【0170】

図23は、第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図23のグラフにおいて、横軸は dLe 及び dWe (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。グラフの横軸 dLe 、 dWe の値を「 $[dLe, dWe]$ 」と表現す

る。

【0171】

図23において、 $T_{e2} < T_e$ の場合であって、 $\{dL_e, dW_e\}$ が0よりも大きいとき、すなわち $L_{e2} > L_e$ 及び $W_{e2} > W_e$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.5 \mu m$

T_e ：変数

T_{e2} ：変数

$T_{e3} = 0.20 \mu m$

$L_q = W_q = 120 \mu m$

$L_e = 70 \mu m$ 、

$W_e = 70 \mu m$ 、

$L_{e3} = L_q$

$W_{e3} = W_q$

$dL_e = L_e - L_{e2} = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2}$ ：変数

$dW_e = W_e - W_{e2} = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2}$ ：変数

$dL_e = dW_e$

【0172】

図23において、 $T_{e2} < T_e$ の場合であって、 $\{dL_e, dW_e\}$ が0以下のとき、すなわち $L_{e2} \leq L_e$ 及び $W_{e2} \leq W_e$ のとき、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.5 \mu m$

T_e ：変数

T_{e2} ：変数

$T_{e3} = 0.20 \mu m$

$L_q = W_q = 120 \mu m$

$L_{e2} = 70 \mu m$

$W_{e2} = 70 \mu m$

$L_{e3} = L_q$

$W_{e3} = W_q$

$dL_e = L_e - L_{e2} = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2}$ ：変数

$dW_e = W_e - W_{e2} = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2}$ ：変数

$dL_e = dW_e$

【0173】

図23において、 $T_e < T_{e2}$ の場合におけるシミュレーション条件は、 $dL_e = L_{e2} - L_e$ 、且つ、 $dW_e = W_{e2} - W_e$ であることを除き、 $T_{e2} < T_e$ の場合におけるシミュレーション条件と同じである。

【0174】

図23におけるプロットは、図20における「SiO₂あり」のプロットと同様の傾向を示している。つまり、一对の励振電極及び絶縁膜のそれぞれの寸法の大小関係が同じであれば、一对の励振電極及び絶縁膜のそれぞれの寸法が異なっていたとしても、 $\{dL_e, dW_e\}$ の変化に対する電気機械結合係数 k (%)の変化は、同様の傾向を示す。

【0175】

図24は、第2実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図24のグラフにおいて、横軸は T_{e3} (μm)を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%)を示している。

【0176】

図24において、シミュレーション条件は以下の通りである。

$T_q = 1.5 \mu m$

T_e ：変数

$$T e 2 = 0.08 \mu m$$

$T e 3$: 変数

$$L q = W q = 120 \mu m$$

$$L e 2 = 70 \mu m$$

$$W e 2 = 70 \mu m$$

$$L e 3 = L q$$

$$W e 3 = W q$$

$$d L e = L e 2 - L e = 2 \times d L e 1 = 2 \times d L e 2 : \text{変数}$$

$$d W e = W e 2 - W e = 2 \times d W e 1 = 2 \times d W e 2 : \text{変数}$$

$$d L e = d W e$$

【0177】

図24における $T e = 0.16 \mu m$ 、 $T e 2 = 0.08 \mu m$ 、 $d L e = d W e = -20 \mu m$ のプロットは、図22における $T e = 0.10 \mu m$ 、 $T e 2 = 0.05 \mu m$ 、 $d L e = d W e = -25 \mu m$ のプロットと同様の傾向を示す。つまり、一対の励振電極及び絶縁膜のそれぞれの寸法の大小関係が同じであれば、一対の励振電極及び絶縁膜のそれぞれの寸法が異なっていたとしても、 $T e 3$ の変化に対する電気機械結合係数 k (%)の変化は、同様の傾向を示す。

【0178】

以上説明した通り、本実施形態によれば、平面視において、第2励振電極214b及び絶縁膜241からなる積層体240の面積は、第1励振電極214aよりも大きく、積層体240の一部が第1励振電極214aの全部と重なっている。第2励振電極214bの厚さ $T e 2$ 及び絶縁膜241の厚さ $T e 3$ の和は、第1励振電極214aの厚さ $T e$ よりも大きい。

【0179】

これによれば、電気機械結合係数 k (%)を向上させることができる。

【0180】

また、本実施形態において、絶縁膜241は、第2励振電極214bにおける水晶片11とは反対側の面に積層されている。

【0181】

これによれば、第1励振電極214aと第2励振電極214bとの間に絶縁膜241が存在する構成に比べて、第1励振電極214aと第2励振電極214bとの間の距離を小さくすることができる。これによれば、圧電効果で振動する部分を薄くすることができるため、水晶振動素子200を高周波化することができるため、

【0182】

また、本実施形態において、第2励振電極214bの外縁部の全てが、第1励振電極214aの外縁部よりも内側に設けられ、絶縁膜241の外縁部の全てが、第1励振電極214aの外縁部よりも外側に設けられている。

【0183】

これによれば、絶縁膜241の厚さ $T e 3$ の変化に対して電気機械結合係数 k (%)の変化を小さくすることができるため、周波数を調整するために絶縁膜241にトリミング処理を施したときに、電気機械結合係数 k (%)の低下を抑制することができる。

【0184】

また、本実施形態において、第2励振電極214bの厚さ $T e 2$ は、第1励振電極214aの厚さ $T e$ よりも小さい。

【0185】

これによれば、電気機械結合係数 k (%)をさらに向上させることができる。

【0186】

また、本実施形態において、 $(T e 2 + T e 3) / T q = 0.00001 \times \rho' + 0.39 \times T e / T q + 0.16 \pm 0.01$ の関係が成り立つ。 ρ' は、第1励振電極214a、第2励振電極214b及び絶縁膜241の平均密度である。第1励振電極214aの密度

10

20

30

40

50

を $\rho 1$ 、第2励振電極214bの密度を $\rho 2$ 、絶縁膜241の密度を $\rho 3$ 、第1励振電極214aの第2励振電極214b及び絶縁膜241と対向する部分の体積を $V 1$ 、第2励振電極214bの第1励振電極214a及び絶縁膜241と対向する部分の体積を $V 2$ 、絶縁膜241の第1励振電極214a及び第2励振電極214bに対向する部分の体積を $V 3$ としたとき、次の式によって算出される。

$$\rho' = (\rho 1 \times V 1 + \rho 2 \times V 2 + \rho 3 \times V 3) / (V 1 + V 2 + V 3)$$

【0187】

これによれば、厚さ $T q$ 、 $T e$ 、 $T e 2$ 、 $T e 3$ が上記式の条件を満たすとき、第1実施形態と同様、電気機械結合係数 k (%) が最大となる。

【0188】

また、本実施形態において、第1励振電極214a及び第2励振電極214bの材質はアルミニウムであり、絶縁膜241の材質は酸化シリコンである。

【0189】

これによれば、アルミニウムの密度と酸化シリコンの密度とが近い数値であるため、平均密度 ρ' の計算を簡略化することができる。また、水晶片11と絶縁膜241との密着性が良好であり、水晶片11と第2励振電極214bとの密着性が、第2励振電極214bと絶縁膜241との密着性と略同等とすることができる。このため、絶縁膜241の水晶片11又は第2励振電極214bからの剥離や、第2励振電極214bの水晶片11からの剥離を抑制することができる。

【0190】

<第3実施形態>

次に、図25から図29を参照しつつ、第3実施形態に係る水晶振動素子300の構成について説明する。

【0191】

図25は、第1実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。具体的には、第2引出電極15bの影響を考慮して算出した、電気機械結合係数 k (%) のシミュレーション結果を示している。図25のグラフにおいて、横軸は引出電極の配線幅 $W w i r e$ (μm) であり、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。引出電極の配線幅とは、X軸方向に延在する第1引出電極15aにおける、Z'軸方向に沿った寸法である。

【0192】

図25において、シミュレーション条件は以下の通りである。なお、第1引出電極15aは、第1励振電極14aのX軸正方向側の外縁部のZ'軸方向における中央部から引き出されているものとする。

$$T q = 1.0 \mu m$$

$$T e = 0.05 \mu m$$

$$T e 2 = 0.05 \mu m$$

$$L q = W q = 120 \mu m$$

$$L e = 55 \mu m$$

$$W e = 50 \mu m$$

$$L e 2 = 70 \mu m$$

$$W e 2 = 60 \mu m$$

$$d L e = L e 2 - L e = 2 \times d L e 1 = 2 \times d L e 2 = 15 \mu m$$

$$d W e = W e 2 - W e = 2 \times d W e 1 = 2 \times d W e 2 = 10 \mu m$$

$W w i r e$: 変数

【0193】

$W w i r e = 0 \mu m$ の場合、すなわち第1引出電極15aを設けずに第1励振電極14a及び第2励振電極14bだけで励振のシミュレーションを行った場合、第1励振電極14aと第2励振電極14bとが重なる領域が励振される。しかし、 $0 \mu m < W w i r e$ に設定した場合、第2励振電極14bと第1引出電極15aとが重なる領域も励振される。このため、図25に示すように、 $0 \mu m < W w i r e$ のときの電気機械結合係数 k (%)

は、 $W_{wire} = 0 \mu m$ のときの電気機械結合係数 k (%) よりも低下している。なお、 $0 \mu m < W_{wire}$ の場合、 Q 値も低下する。

【0194】

図25に示すように、 W_{wire} が $0 \mu m$ から大きくなるにつれて電気機械結合係数 k (%) が低下し、 $W_{wire} = 10 \mu m$ 付近で電気機械結合係数 k (%) は極小となる。 W_{wire} が $10 \mu m$ から大きくなるにつれて電気機械結合係数 k (%) は向上し、 $W_{wire} = 40 \mu m$ 付近で電気機械結合係数 k (%) は極大となる。 $10 \mu m < W_{wire} < 40 \mu m$ の範囲において W_{wire} の増大に伴い電気機械結合係数 k (%) が増大するのは、広幅となった第1引出電極15aが第1励振電極14aの一部のように振る舞うためであると考えられる。

10

【0195】

振動漏れの抑制などの観点から W_{wire} は小さいことが望ましいが、 W_{wire} が小さいと図25に示したように電気機械結合係数 k (%) が低下する。このため、電気機械結合係数 k (%) 及び Q 値の低下を抑制するためには、 W_{wire} を小さくした上で、第1引出電極15aによる第2励振電極14bへの影響を抑制する必要がある。第3実施形態及び第4実施形態は、このような事情を鑑みて成された発明の一態様である。

【0196】

図26は、第3実施形態に係る振動部の斜視図である。図27は、第3実施形態に係る振動部の振動分布を示す図である。明暗によって振幅の大きさを示しており、明部が振幅の大きい領域であり、暗部が振幅の小さい領域である。なお、図27において、第2励振電極314bの図示は省略されている。

20

【0197】

図26に示すように、第3実施形態は、第2励振電極314bにおける第1引出電極315aに対向する領域に切り欠き部314Nが形成されている点において第1実施形態と相違しており、上記の点以外については第1実施形態と同様である。第1引出電極315aは、第1励振電極314aのX軸正方向側の外縁部からX軸正方向に延出しているため、切り欠き部314Nは、第2励振電極314bのX軸正方向側の外縁部に設けられている。平面視において、切り欠き部314Nは、矩形状の凹部である。切り欠き部314Nにおける第2励振電極314bの外縁部と第1励振電極314aとの間におけるX軸方向に沿った距離を L_n とし、切り欠き部314Nにおける第2励振電極314bの外縁部と第1引出電極315aとの間におけるZ'軸方向に沿った距離を W_n とする。

30

【0198】

図27に示すように、第3実施形態においては、振動する領域は第1励振電極314aに重なる領域に限定され、第1引出電極315aに重なる領域での振動は抑制されている。例えば、第3実施形態から第1引出電極315a及び切り欠き部314Nを省略した構成においてシミュレートすると $k = 6.86\%$ 、 $Q = 8,720$ となるが、その構成に $W_{wire} = 10 \mu m$ の第1引出電極315aを追加した構成においてシミュレートすると $k = 6.77\%$ 、 $Q = 8,540$ となる。しかし、そこにさらに切り欠き部314Nが形成された第3実施形態に係る構成においてシミュレートすると、 $k = 6.82\%$ 、 $Q = 8,730$ となる。つまり、切り欠き部314Nを形成することによって、第1引出電極315aによる第2励振電極314bへの影響が抑制され、電気機械結合係数 k (%) 及び Q 値の低下が抑制されている。

40

【0199】

以上説明した通り、本実施形態によれば、第2励振電極314bにおける第1引出電極315aに対向する領域に切り欠き部314Nが形成されている。

【0200】

これによれば、第1引出電極315aによる第2励振電極314bへの影響が抑制され、電気機械結合係数 k (%) 及び Q 値の低下が抑制されている。

【0201】

なお、第3実施形態は、第1実施形態における一对の励振電極のうち面積の大きい方の

50

励振電極の引出電極と対向する領域に切り欠き部が形成された構成であるが、第2実施形態における絶縁膜の引出電極に対向する領域に切り欠き部が形成されてもよい。このような構成においても、第3実施形態と同様の効果が得られる。但し、絶縁膜は励振電極の材料よりも軽いため、第2実施形態における第1励振電極と第2励振電極とが対向する領域における振動閉じ込め性は良好である。このため、第2実施形態における引出電極の影響による電気機械結合係数 k (%) 及び Q 値の低下は、第1実施形態における引出電極の影響による電気機械結合係数 k (%) 及び Q 値の低下ほど大きくはない。したがって、第2実施形態の絶縁膜に切り欠き部を形成したとしても、第1実施形態に切り欠き部を形成したときほどの効果は得られない場合がある。

【0202】

次に、図28及び図29を参照しつつ、図28及び図29は、第3実施形態に基づくシミュレーション結果を示すグラフである。図28及び図29のグラフにおいて、横軸は、 W_n (μm) を示し、縦軸は電気機械結合係数 k (%) を示している。

【0203】

図28及び図29において、シミュレーション条件は以下の通りである。図28は、 $W_{wire} = 10 \mu\text{m}$ としたときのシミュレーション結果を示しており、図29は、 $W_{wire} = 20 \mu\text{m}$ としたときのシミュレーション結果を示している。

$T_q = 1.0 \mu\text{m}$

$T_e = 0.05 \mu\text{m}$

$T_{e2} = 0.05 \mu\text{m}$

$L_q = W_q = 120 \mu\text{m}$

$L_e = 55 \mu\text{m}$

$W_e = 50 \mu\text{m}$

$L_{e2} = 70 \mu\text{m}$

$W_{e2} = 60 \mu\text{m}$

$dL_e = L_{e2} - L_e = 2 \times dL_{e1} = 2 \times dL_{e2} = 15 \mu\text{m}$

$dW_e = W_{e2} - W_e = 2 \times dW_{e1} = 2 \times dW_{e2} = 10 \mu\text{m}$

L_n : 変数

W_n : 変数

【0204】

図28及び図29に示すように、 L_n 及び W_n は $2 \mu\text{m}$ 以上 $6 \mu\text{m}$ 以下とすることが望ましい。これによれば、 W_{wire} の大きさに依らず、電気機械結合係数 k (%) の低下を抑制することができる。

【0205】

<第4実施形態>

次に、図30及び図31を参照しつつ、第4実施形態に係る水晶振動素子400の構成について説明する。図30は、第4実施形態に係る振動部の斜視図である。図31は、第4実施形態に係る振動部の振動分布を示す図である。明暗によって振幅の大きさを示しており、明部が振幅の大きい領域であり、暗部が振幅の小さい領域である。なお、図31において、第2励振電極414bの図示は省略されている。

【0206】

図30に示すように、第4実施形態は、平面視において、第2励振電極414bの中心が第1励振電極414aの中心に対してX軸負方向側に位置している点において第1実施形態と相違しており、上記の点以外については第1実施形態と同様である。第1引出電極315aは、第1励振電極314aのX軸正方向側の外縁部からX軸正方向に延出しているため、第2励振電極414bの中心は、第1励振電極414aの中心に対して、第1引出電極415aから離間する方向に位置している。つまり、平面視において、一对の励振電極のうち面積の大きい方の励振電極の中心は、一对の励振電極のうち面積の小さい方の励振電極の中心に対して、面積の小さい方の励振電極に電氣的に接続された引出電極から離間する方向にずれている。

【0207】

第1励振電極414aのX軸負方向側の外縁部471と、第2励振電極414bのX軸負方向側の外縁部481との間のX軸方向に沿った間隔をG1とする。第1励振電極414aのX軸正方向側の外縁部472と、第2励振電極414bのX軸正方向側の外縁部481との間のX軸方向に沿った間隔をG2とする。水晶振動素子400においては、 $0 \leq G2 < G1$ の関係が成り立つ。

【0208】

図31に示すように、第4実施形態において、振動する領域は第1励振電極414aに重なる領域に限定され、第1引出電極415aに重なる領域での振動は抑制されている。例えば、第4実施形態から第1引出電極415aを省略し且つ $G1 = G2$ とした構成においてシミュレートすると $k = 6.86\%$ 、 $Q = 8,720$ となるが、その構成にWire = $10\mu\text{m}$ の第1引出電極415aを追加した構成においてシミュレートすると $k = 6.77\%$ 、 $Q = 8,540$ となる。しかし、そこからさらに $G1 = 0\mu\text{m}$ と変形した第4実施形態に係る構成においてシミュレートすると、 $k = 6.84\%$ 、 $Q = 8,770$ となる。つまり、 $0\mu\text{m} \leq G1 < G2$ とすることによって、第1引出電極415aによる第2励振電極414bへの影響が抑制され、電気機械結合係数k(%)及びQ値の低下が抑制されている。

【0209】

以上説明した通り、本実施形態によれば、第2励振電極414bの中心が、第1励振電極414aの中心に対して、第1引出電極415aから離間する方向にずれており、 $0 \leq G2 < G1$ の関係が成り立っている。

【0210】

これによれば、第1引出電極415aによる第2励振電極414bへの影響が抑制され、電気機械結合係数k(%)及びQ値の低下が抑制されている。

【0211】

<第5実施形態>

次に、図32を参照しつつ、第5実施形態に係る水晶振動素子500の構成について説明する。図32は、第5実施形態に係る振動部の断面図である。

【0212】

第5実施形態は、質量付加膜542をさらに備えている点で第1実施形態と相違しており、上記の点以外については第1実施形態と同様である。質量付加膜542は、第1励振電極14aにおける水晶片11とは反対側の面に設けられている。平面視したとき、質量付加膜542は、第1励振電極14aの中央部よりも外側において、第1励振電極14aの外縁部に沿って設けられている。また、平面視したとき、質量付加膜542は、第1励振電極14aの外縁部と重なる領域、又は、第1励振電極14aの外縁部よりも内側の領域に設けられている。質量付加膜542の材質は、電気伝導体であり、例えば第1励振電極14aの材質と同じである。

【0213】

なお、質量付加膜542の位置及び材質は上記限定されるものではない。質量付加膜542は、第1励振電極14aと水晶片11との間、第2励振電極14bにおける水晶片11とは反対側の面、及び、第2励振電極14bと水晶片11との間、のいずれかの位置に設けられてもよい。質量付加膜542の材質は、第1励振電極14aとは異なる金属であってもよい。

【0214】

質量付加膜542は、質量付加効果により音速を低下させる。このため、質量付加膜542が設けられた領域の音速は、質量付加膜542が設けられていない領域の音速よりも小さくなる。つまり、平面視したとき、第1励振電極14aと第2励振電極14bとが対向する領域は、中央部に設けられた高音速領域517と、高音速領域517の外側に設けられた低音速領域518とを有する。低音速領域518は、例えば周方向に連続した枠状に設けられているが、周方向に非連続な枠状に設けられてもよい。例えば、低音速領域5

18は、外縁部71から外縁部72に亘って延在する帯状、又は、外縁部73から外縁部74に亘って延在する帯状に設けられてもよい。

【0215】

これによれば、スプリアスモードの電気機械結合係数 k (%)を抑制し、メインモードの電気機械結合係数 k (%)を向上させることができる。

【0216】

なお、本実施形態において、質量付加膜542を第1励振電極14aの一部として扱う場合、厚さ T_e は、質量付加膜542及び第1励振電極14aからなる積層体の平均厚さである。

【0217】

<第6実施形態>

次に、図33を参照しつつ、第6実施形態に係る水晶振動素子600の構成について説明する。図33は、第6実施形態に係る振動部の断面図である。

【0218】

第6実施形態は、第1励振電極614aの平面視における中央部に複数の孔部Hが形成されている点で第1実施形態と相違しており、上記の点以外については第1実施形態と同様である。

【0219】

孔部Hは、Y'軸方向において第1励振電極614aを貫通している。複数の孔部Hは、質量低減効果により音速を上昇させる。このため、複数の孔部Hが形成された領域の音速は、複数の孔部Hが形成されていない領域の音速よりも大きくなる。つまり、平面視したとき、第1励振電極14aと第2励振電極14bとが対向する領域は、中央部に設けられた高音速領域617と、高音速領域617の外側に設けられた低音速領域618とを有する。

【0220】

これによれば、スプリアスモードの電気機械結合係数 k (%)を抑制し、メインモードの電気機械結合係数 k (%)を向上させることができる。

【0221】

本実施形態において、平面視における第1励振電極614aの面積は、第1励振電極614aの外縁部に囲まれた領域の面積であり、複数の孔部Hの内部も第1励振電極614aの面積の一部として計算する。低音速領域618における第1励振電極614aの厚さを T_{e1} 、複数の孔部Hの開口率を H_{ar} としたとき、厚さ T_e は、次の式によって算出される。

$$T_e = T_{e1} \times (1 - H_{ar})$$

【0222】

高音速領域617における孔部Hの内部を第1励振電極614aの一部として機能させるためには、孔部Hの内径を H_r としたとき、 $0 < H_r / T_q \leq 2.0$ の関係が成り立つことが望ましい。このとき、孔部Hによる静電容量の低下率は1%以下に抑えられるため、孔部Hの内部も励振電極として十分に機能させることができる。また、 $0 < H_r / T_q \leq 1.5$ の関係が成り立つことがさらに望ましく、 $0 < H_r / T_q \leq 1.0$ の関係が成り立つことがさらに望ましい。 $0 < H_r / T_q \leq 1.5$ であれば、静電容量の低下率を0.5%以下に抑えることができ、 $0 < H_r / T_q \leq 1.0$ であれば、静電容量の低下率を0.1%以下に抑えることができる。なお、孔部Hを十分な加工精度で形成するためには、 $0.1 \leq H_r / T_q$ であることが望ましく、 $0.5 \leq H_r / T_q$ であることがさらに望ましい。

【0223】

なお、孔部Hは、第2励振電極に形成されてもよく、第1励振電極及び第2励振電極の両方に形成されてもよい。

【0224】

<第7実施形態>

10

20

30

40

50

次に、図 3 4 を参照しつつ、第 7 実施形態に係る水晶振動素子 7 0 0 の構成について説明する。図 3 4 は、第 7 実施形態に係る振動部の断面図である。

【 0 2 2 5 】

第 7 実施形態は、質量付加膜 5 4 2 をさらに備えている点で第 2 実施形態と相違しており、上記の点以外については第 2 実施形態と同様である。つまり、平面視したとき、第 1 励振電極 2 1 4 a と第 2 励振電極 2 1 4 b とが対向する領域は、中央部に設けられた高音速領域 7 1 7 と、高音速領域 7 1 7 の外側に設けられた低音速領域 7 1 8 とを有している。質量付加膜 5 4 2 は、第 2 励振電極 2 1 4 b の外縁部と重なる領域からその内側に亘って設けられている。したがって、平面視において、低音速領域 7 1 8 は、第 1 励振電極 2 1 4 a の外縁部よりも内側に位置している。

10

【 0 2 2 6 】

これによれば、スプリアスモードの電気機械結合係数 k (%) を抑制し、メインモードの電気機械結合係数 k (%) を向上させることができる。

【 0 2 2 7 】

< 第 8 実施形態 >

次に、図 3 5 を参照しつつ、第 8 実施形態に係る水晶振動素子 8 0 0 の構成について説明する。図 3 5 は、第 8 実施形態に係る振動部の断面図である。

【 0 2 2 8 】

第 8 実施形態は、第 1 励振電極 8 1 4 a の平面視における中央部に複数の孔部 H が形成されている点で第 2 実施形態と相違しており、上記の点以外については第 2 実施形態と同様である。

20

【 0 2 2 9 】

これによれば、スプリアスモードの電気機械結合係数 k (%) を抑制し、メインモードの電気機械結合係数 k (%) を向上させることができる。

【 0 2 3 0 】

以下に、本発明の実施形態の一部又は全部を付記する。なお、本発明は以下の付記に限定されるものではない。

【 0 2 3 1 】

< 1 >

第 1 主面及び第 1 主面と対向する第 2 主面を有する圧電片と、
第 1 主面に設けられた第 1 励振電極と、
第 2 主面に設けられた第 2 励振電極と
を備え、

30

第 1 主面と第 2 主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、第 2 励振電極の面積は、第 1 励振電極の面積よりも大きく、且つ、第 2 励振電極の一部が第 1 励振電極の全てと重なっており、

対向方向に沿った第 2 励振電極の厚さは、対向方向に沿った第 1 励振電極の厚さよりも大きい、

圧電振動素子。

【 0 2 3 2 】

40

< 2 >

対向方向における平面視において、第 1 励振電極の外縁部の全てが、第 2 励振電極の外縁部よりも内側に位置している、

< 1 > に記載の圧電振動素子。

【 0 2 3 3 】

< 3 >

対向方向に沿った第 1 励振電極の厚さを $T e$ (μm)、対向方向に沿った第 2 励振電極の厚さを $T e 2$ (μm)、対向方向に沿った圧電片の厚さを $T q$ (μm) とし、

第 1 励振電極及び第 2 励振電極の平均密度を ρ (kg/m^3) としたとき、

$$T e 2 / T q = 0.00001 \times \rho + 0.39 \times T e / T q + 0.16 \pm 0.01$$

50

の関係が成り立つ、

< 1 >又は< 2 >に記載の圧電振動素子。

【 0 2 3 4 】

< 4 >

第 1 主面及び第 1 主面と対向する第 2 主面を有する圧電片と、

第 1 主面に設けられた第 1 励振電極と、

第 2 主面に設けられた第 2 励振電極と、

第 2 励振電極に積層された絶縁膜と

を備え、

第 1 主面と第 2 主面とが互いに対向する対向方向における平面視において、第 2 励振電極及び絶縁膜からなる積層体の面積は、第 1 励振電極の面積よりも大きく、且つ、積層体の一部が第 1 励振電極の全てと重なっており、

対向方向に沿った第 2 励振電極の厚さ及び絶縁膜の厚さの和は、対向方向に沿った第 1 励振電極の厚さよりも大きい、

圧電振動素子。

【 0 2 3 5 】

< 5 >

絶縁膜は、第 2 励振電極における圧電片とは反対側の面に積層されている、

< 4 >に記載の圧電振動素子。

【 0 2 3 6 】

< 6 >

対向方向における平面視において、

第 2 励振電極の外縁部の全てが、第 1 励振電極の外縁部よりも内側に設けられ、

絶縁膜の外縁部の全てが、第 1 励振電極の外縁部よりも外側に設けられている、

< 4 >又は< 5 >に記載の圧電振動素子。

【 0 2 3 7 】

< 7 >

対向方向に沿った第 2 励振電極の厚さは、対向方向に沿った第 1 励振電極の厚さよりも小さい、

< 4 >から< 6 >のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【 0 2 3 8 】

< 8 >

対向方向に沿った第 1 励振電極の厚さを T_e (μm)、対向方向に沿った第 2 励振電極の厚さを T_{e2} (μm)、対向方向に沿った絶縁膜の厚さを T_{e3} (μm)、対向方向に沿った圧電片の厚さを T_q (μm) とし、

第 1 励振電極、第 2 励振電極及び絶縁膜の平均密度を ρ' (kg/m^3) としたとき、

$(T_{e2} + T_{e3}) / T_q = 0.00001 \times \rho' + 0.39 \times T_e / T_q + 0.16 \pm 0.01$

の関係が成り立つ、

< 4 >から< 7 >のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【 0 2 3 9 】

< 9 >

第 1 励振電極及び第 2 励振電極の材質はアルミニウムであり、

絶縁膜の材質は酸化シリコンである、

< 8 >に記載の圧電振動素子。

【 0 2 4 0 】

< 10 >

第 1 主面に設けられ、第 1 励振電極に電氣的に接続された第 1 引出電極と、

第 2 主面に設けられ、第 2 励振電極に電氣的に接続された第 2 引出電極と

をさらに備え、

10

20

30

40

50

第1励振電極及び第2励振電極のうち対向方向における平面視において面積の大きい方の励振電極には、第1引出電極及び第2引出電極のうち対向方向における平面視において面積の小さい方の励振電極に電氣的に接続された方の引出電極と対向する領域に、切り欠き部が形成されている、

<1>から<9>のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【0241】

<11>

第1主面に設けられ、第1励振電極に電氣的に接続された第1引出電極と、
第2主面に設けられ、第2励振電極に電氣的に接続された第2引出電極と
をさらに備え、

10

第1励振電極及び第2励振電極のうち対向方向における平面視において面積の大きい方の励振電極の中心は、対向方向における平面視において面積の小さい方の励振電極の中心に対して、第1引出電極及び第2引出電極のうち面積の小さい方の励振電極に電氣的に接続された方の引出電極から離間する方向にずれている、

<1>から<10>のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【0242】

<12>

対向方向における平面視において、第1励振電極と第2励振電極とが対向する領域は、中央部に設けられた高音速領域と、高音速領域の外側に設けられた低音速領域とを有する、

<1>から<11>のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

20

【0243】

<13>

対向方向における平面視において、第1励振電極及び第2励振電極は、互いの中心が重なる矩形状に設けられており、

第1方向に延在する互いに平行な辺と、第1方向と交差する第2方向に延在する互いに平行な辺とを有し、

対向方向における平面視において、第1励振電極及び第2励振電極のある方向において隣接する辺同士の間隔を D_e (μm)とし、

対向方向に沿った圧電片の厚さを T_q (μm)としたとき、

$$5.22 \times T_q - 0.45 \leq D_e$$

30

の関係が成り立つ、

<1>から<12>のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【0244】

<14>

主要な振動モードは厚み滑り振動である、

<1>から<13>のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

【0245】

<15>

圧電片は水晶片である、

<1>から<14>のいずれか一つに記載の圧電振動素子。

40

【0246】

<16>

水晶片のカット角は、ATカット、BTカット又はSTカットである、

<15>に記載の圧電振動素子。

【0247】

なお、本明細書中においては、圧電片 (Piezoelectric Element) として水晶片 (Quartz Crystal Element) を備える水晶振動素子 (Quartz Crystal Resonator) を例に挙げて説明したが、圧電振動素子 (Piezoelectric Resonator) はこれに限定されるものではない。本実施形態に係る圧電振動素子に好適に用いられる圧電片としては、例えば、チタ

50

ン酸ジルコン酸鉛（P Z T）や窒化アルミニウムなどの圧電セラミック、ニオブ酸リチウムやタンタル酸リチウムなどの圧電単結晶、を挙げることができるが、これらに限定されるものではなく適宜選択可能である。

【0248】

本発明に係る実施形態は、タイミングデバイス、発音器、発振器、荷重センサなど、圧電効果により電気機械エネルギー変換を行うデバイスであれば、特に限定されることなく適宜適用可能である。

【0249】

以上説明したように、本発明の一態様によれば、電気機械結合係数の向上を図ることができる圧電振動素子を提供することができる。

10

【0250】

なお、以上説明した実施形態は、本発明の理解を容易にするためのものであり、本発明を限定して解釈するためのものではない。本発明は、その趣旨を逸脱することなく、変更／改良され得るとともに、本発明にはその等価物も含まれる。すなわち、実施形態及び／又は変形例に当業者が適宜設計変更を加えたものも、本発明の特徴を備えている限り、本発明の範囲に包含される。例えば、実施形態及び／又は変形例が備える各要素及びその配置、材料、条件、形状、サイズなどは、例示したものに限定されるわけではなく適宜変更することができる。また、実施形態及び変形例は例示であり、異なる実施形態及び／又は変形例で示した構成の部分的な置換又は組み合わせが可能であることは言うまでもなく、これらも本発明の特徴を含む限り本発明の範囲に包含される。

20

【符号の説明】

【0251】

1 … 水晶振動子

10 … 水晶振動素子

11 … 水晶片

11A … 上面

11B … 下面

14a … 第1励振電極

14b … 第2励振電極

15a … 第1引出電極

15b … 第2引出電極

16a … 第1接続電極

16b … 第2接続電極

Lq … 水晶片のX軸方向に沿った長さ

Wq … 水晶片のZ'軸方向に沿った長さ

Tq … 水晶片の厚さ

Le … 第1励振電極のX軸方向に沿った長さ

We … 第1励振電極のZ'軸方向に沿った長さ

Te … 第1励振電極の厚さ

Le2 … 第2励振電極のX軸方向に沿った長さ

We2 … 第2励振電極のZ'軸方向に沿った長さ

Te2 … 第2励振電極の厚さ

30

40

50

【要約】

圧電振動素子（１０）は、第１主面（１１Ａ）及び第１主面（１１Ａ）と対向する第２主面（１１Ｂ）を有する圧電片（１１）と、第１主面（１１Ａ）に設けられた第１励振電極（１４ａ）と、第２主面（１１Ｂ）に設けられた第２励振電極（１４ｂ）とを備え、第１主面（１１Ａ）と第２主面（１１Ｂ）とが互いに対向する対向方向における平面視において、第２励振電極（１４ｂ）の面積は、第１励振電極（１４ａ）の面積よりも大きく、且つ、第２励振電極（１４ｂ）の一部が第１励振電極（１４ａ）の全てと重なっており、対向方向に沿った第２励振電極（１４ｂ）の厚さ（ T_{e2} ）は、対向方向に沿った第１励振電極（１４ａ）の厚さ（ T_e ）よりも大きい。

【図面】

【図１】

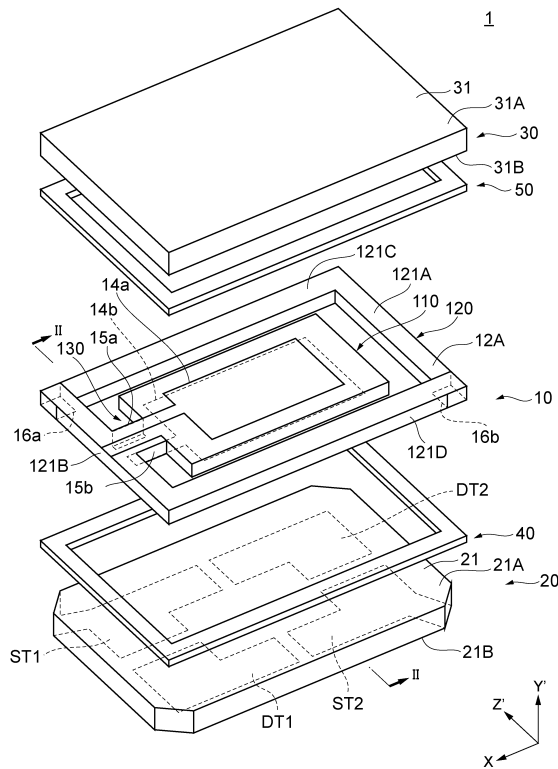


図 1

【図２】

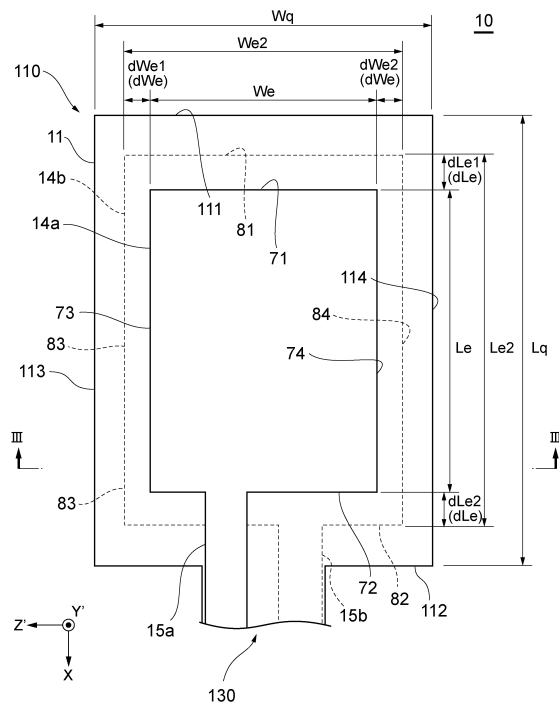


図 2

【図 3】

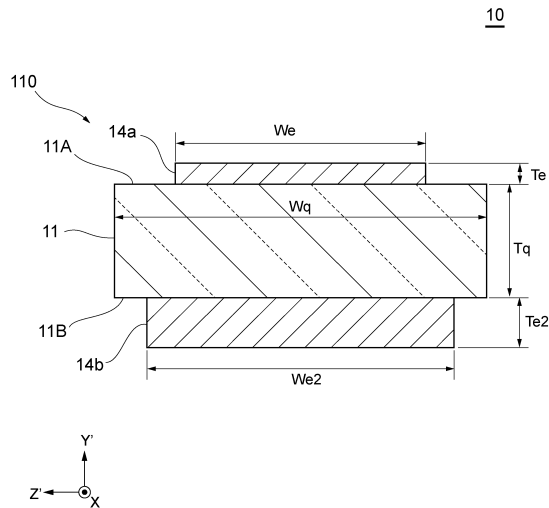


図 3

【図 4】

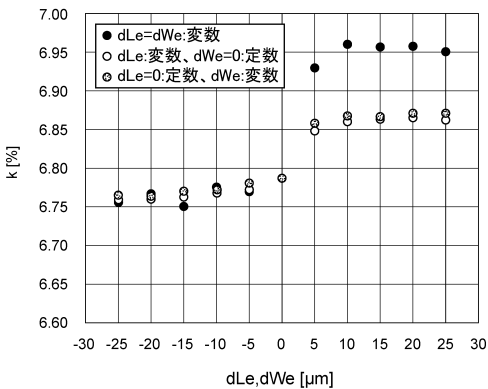


図 4

【図 5】

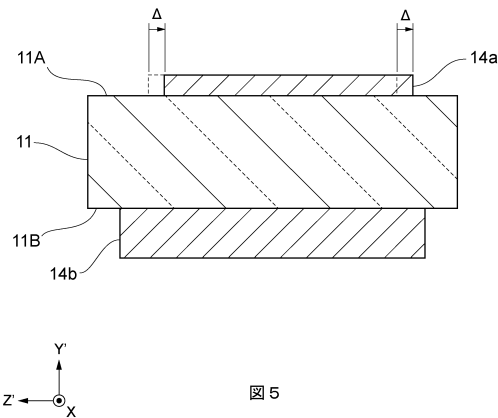


図 5

【図 6】

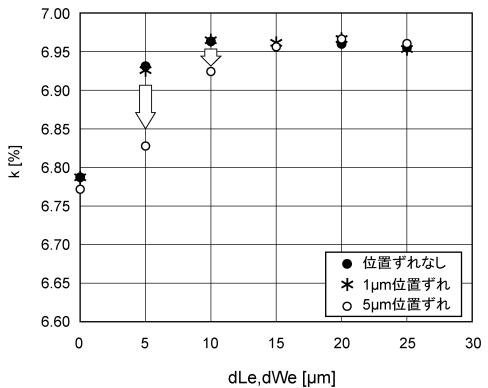


図 6

【図 7】

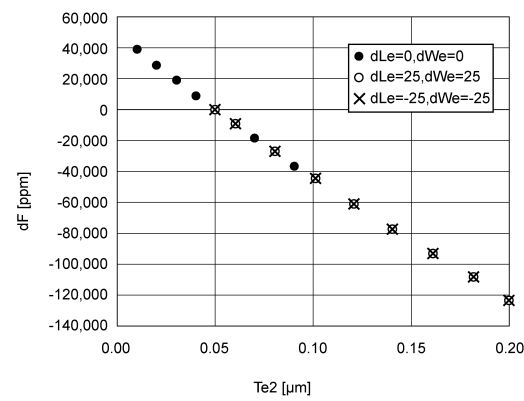


図 7

【図 8】

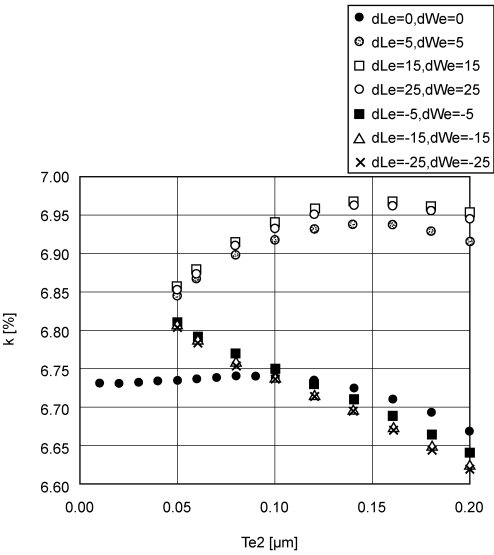


図 8

【図 9】

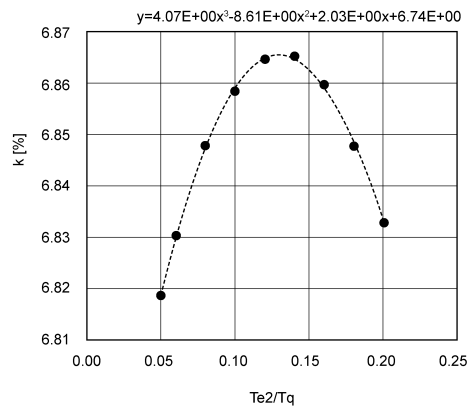


図 9

【図 10】

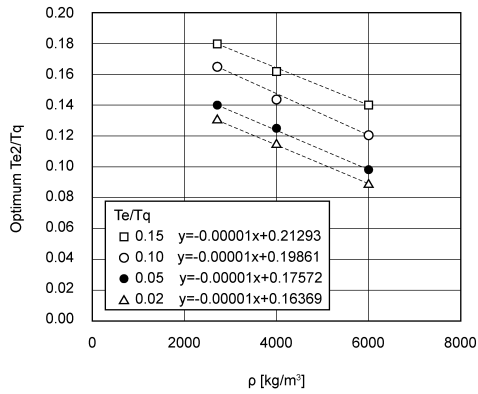


図 10

10

20

30

40

50

【図 1 1】

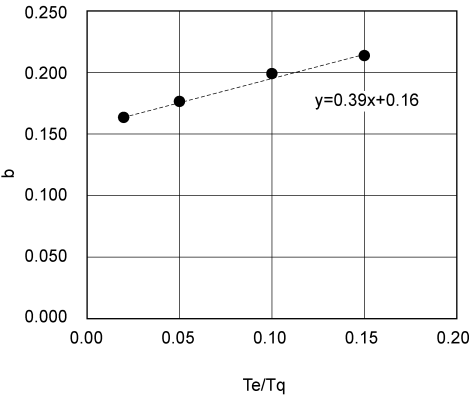


図 1 1

【図 1 2】

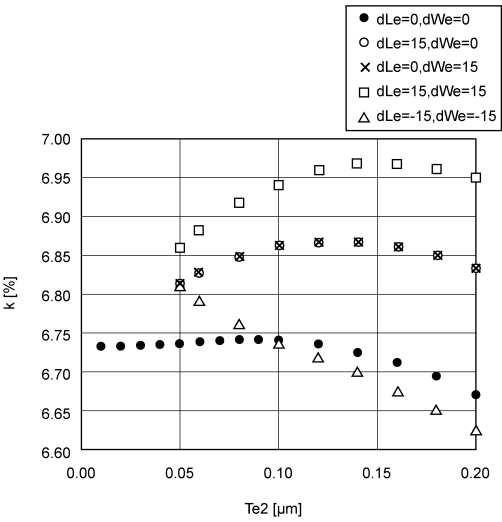


図 1 2

【図 1 3】

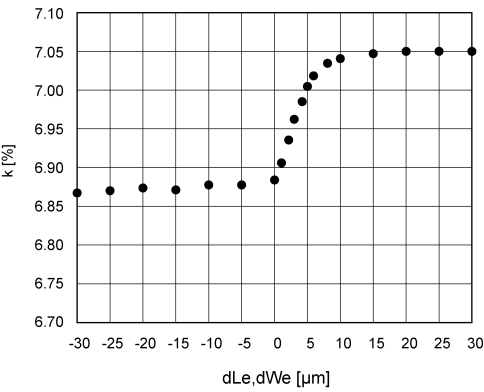


図 1 3

【図 1 4】

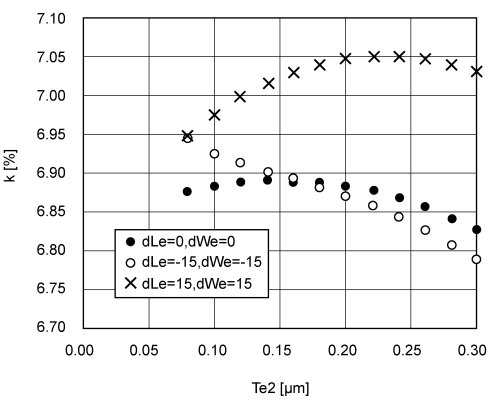


図 1 4

10

20

30

40

50

【図 1 5】

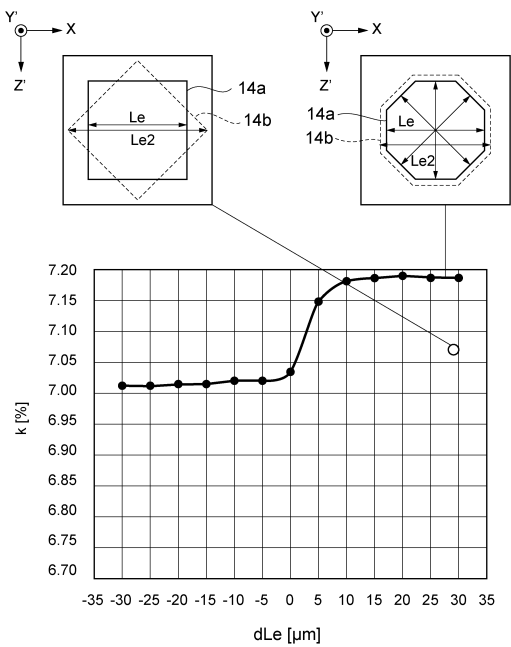


図 1 5

【図 1 6】

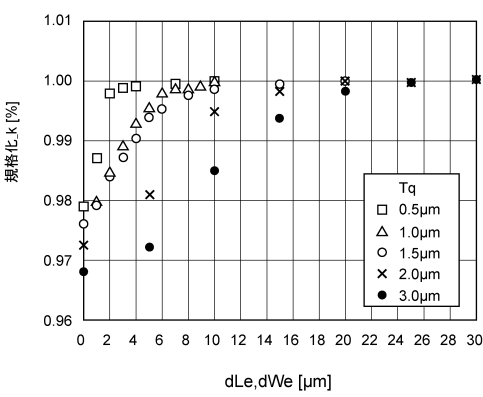


図 1 6

【図 1 7】

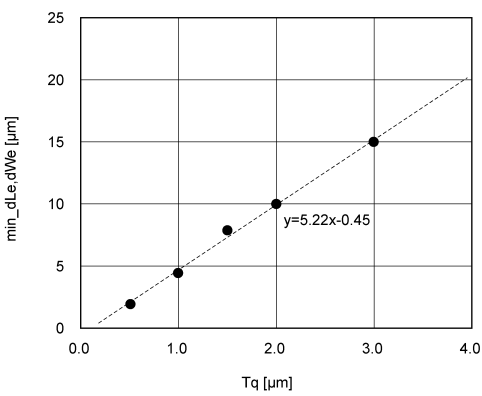


図 1 7

【図 1 8】

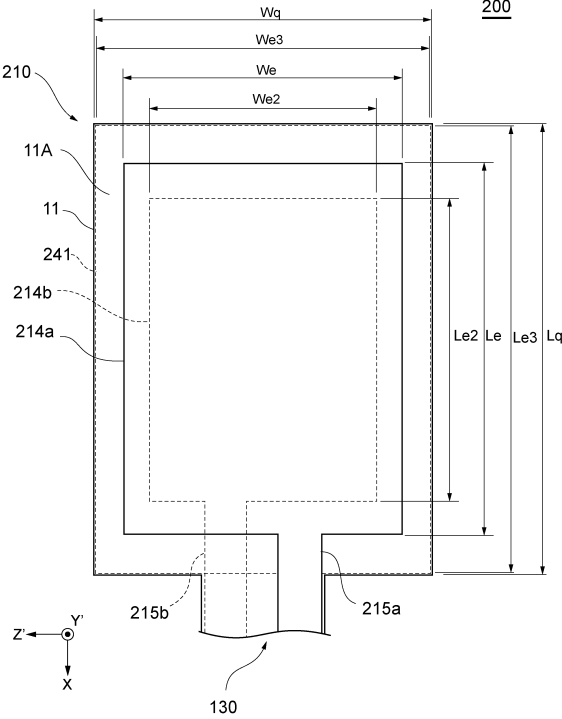


図 1 8

【図 1 9】

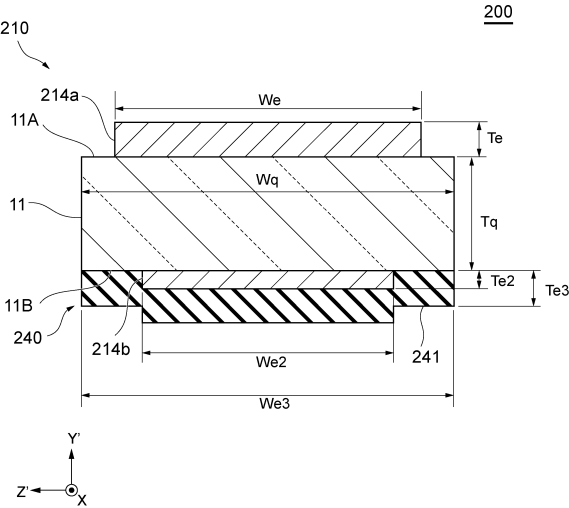


図 1 9

【図 2 0】

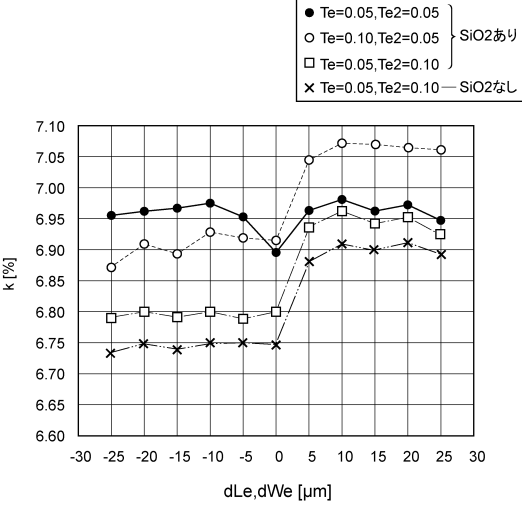


図 2 0

【図 2 1】

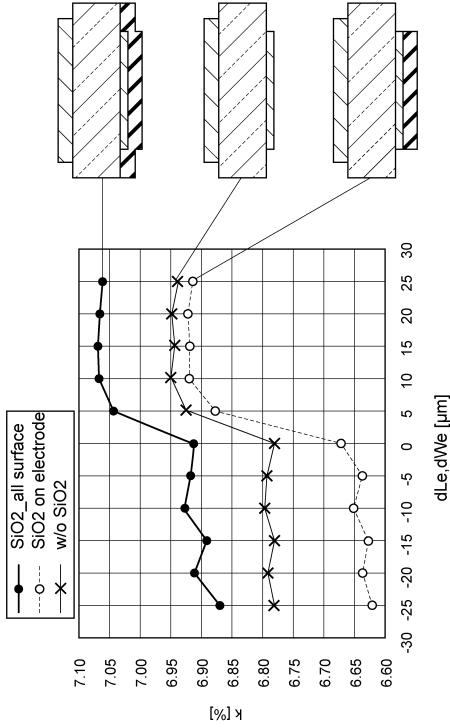


図 2 1

【図 2 2】

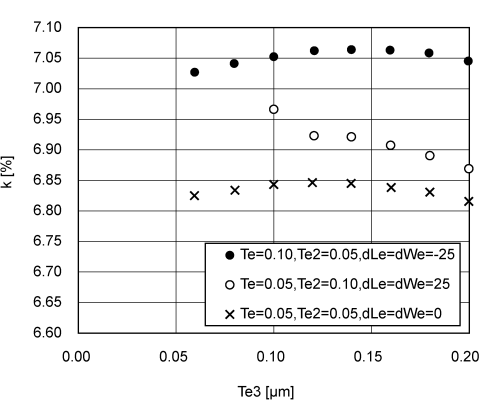


図 2 2

10

20

30

40

50

【図 2 3】

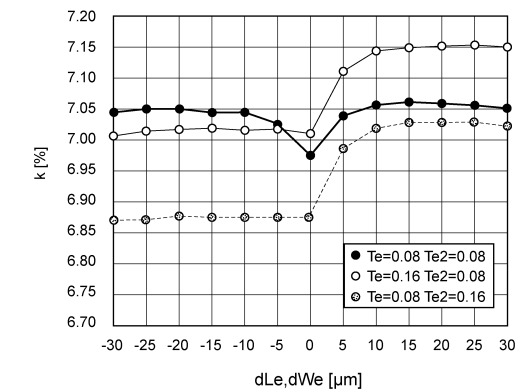


図 2 3

【図 2 4】

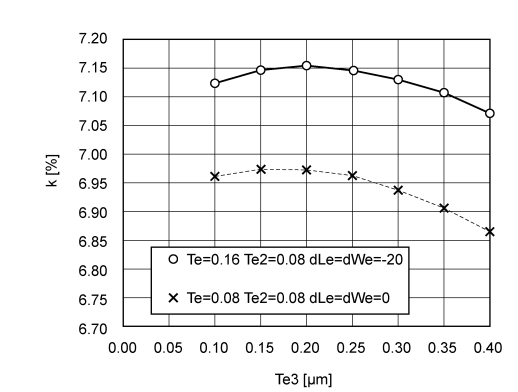


図 2 4

【図 2 5】

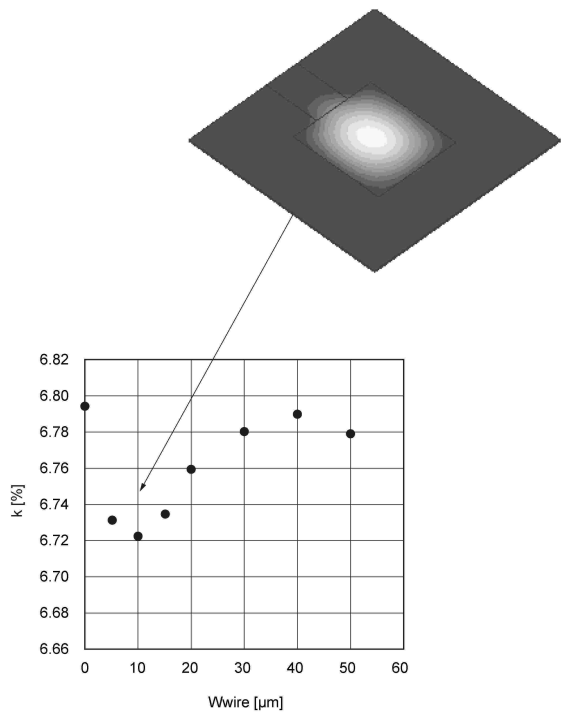


図 2 5

【図 2 6】

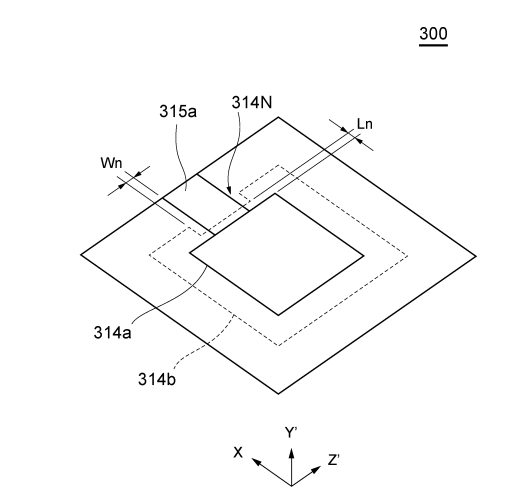


図 2 6

10

20

30

40

50

【図 2 7】

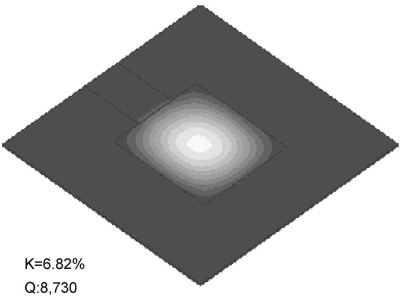


図 2 7

【図 2 8】

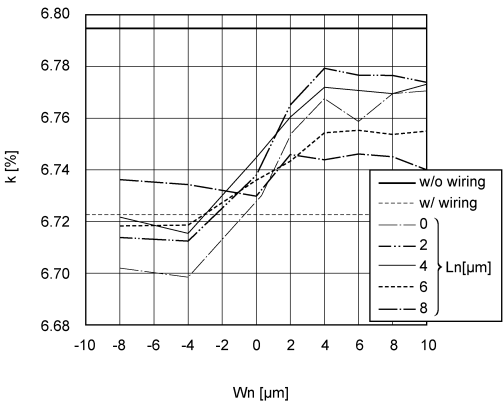


図 2 8

10

【図 2 9】

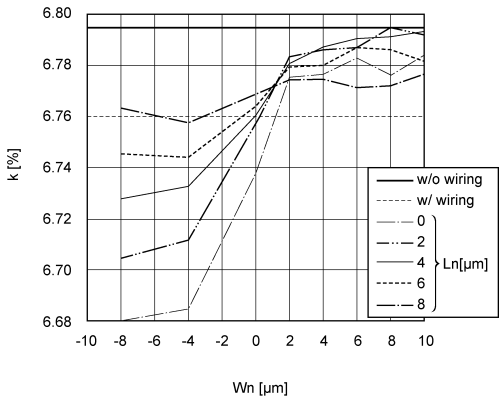


図 2 9

【図 3 0】

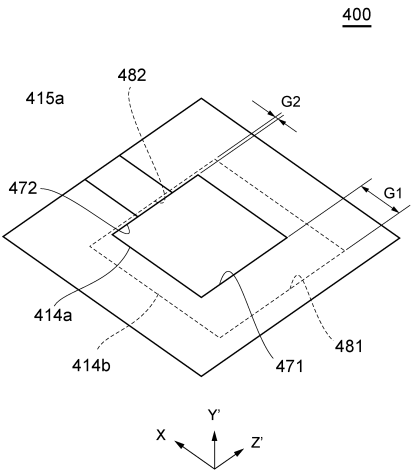


図 3 0

20

30

40

50

【図 3 1】

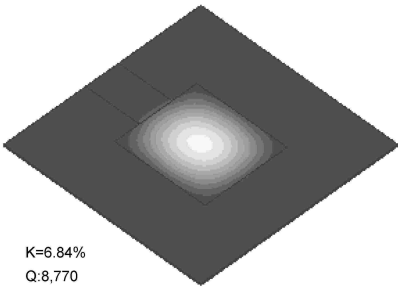


図 3 1

【図 3 2】

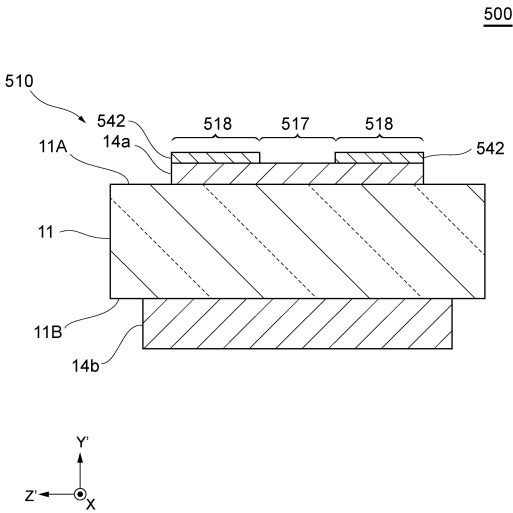


図 3 2

【図 3 3】

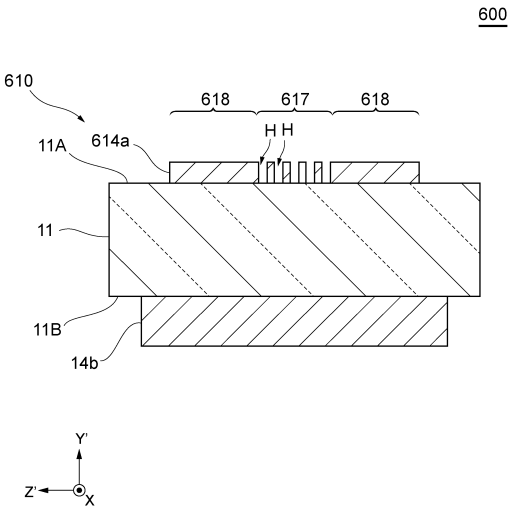


図 3 3

【図 3 4】

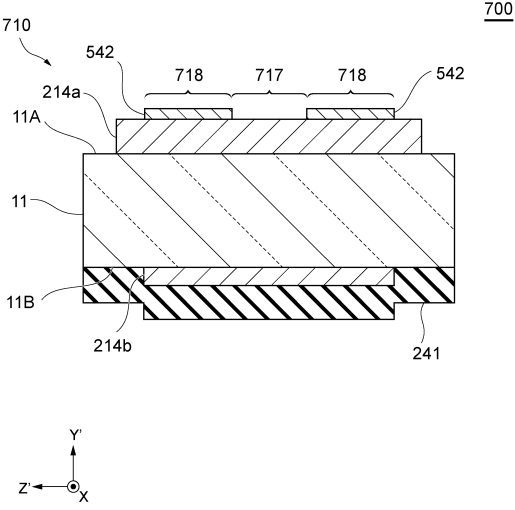


図 3 4

10

20

30

40

50

【図 3 5】

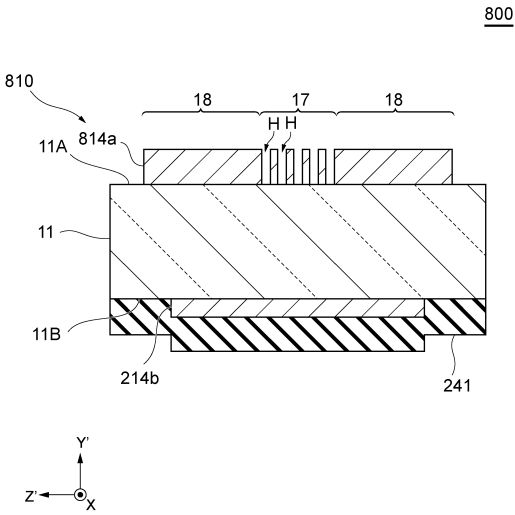


図 3 5

フロントページの続き

株式会社村田製作所内

審査官 石田 昌敏

- (56)参考文献 特開 2022-153702 (JP, A)
特開 2013-207338 (JP, A)
特開 2015-065554 (JP, A)
国際公開第 2021/045094 (WO, A1)
国際公開第 2019/054349 (WO, A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H03H 9/00- 9/74