

明 細 書

発明の名称：振動装置及びその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、支持部に振動腕が接続されている振動装置及びその製造方法に関し、より詳細には、振動腕が屈曲振動モードで振動するように励振部が構成されている振動装置及びその製造方法に関する。

背景技術

[0002] 従来、S i 半導体層上に圧電薄膜を含む励振部が構成されているMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 構造が知られている。例えば下記の特許文献1には、複数の振動腕の各一端が支持部に接続されている振動装置が開示されている。この振動装置では、振動腕はS i 半導体層を有する。S i 半導体層上に、S i O₂膜が設けられている。そして、S i O₂膜上に、順に、第1の電極、圧電薄膜及び第2の電極が積層されている。すなわち、S i 半導体層上に圧電薄膜を含む励振部が構成されている。特許文献1に記載の振動装置は、バルク波を利用した振動装置である。

[0003] 上記S i 半導体層上に励振部が構成されていることにより、Q値の高い振動子を構成することができる。もっとも、特許文献1に記載の振動装置では、温度特性を改善するために、2 μm以上の比較的厚いS i O₂膜が設けられている。

[0004] 他方、下記の特許文献2には、Pがドーピングされているn型S i基板を用いた表面音響波半導体装置が開示されている。Pがドーピングされているn型S i基板を用いることにより、弾性定数や表面音響波の速度を変化させ、温度特性を改善できるとされている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：USP 8, 098, 002

特許文献2：特開昭57-162513号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0006] 特許文献1に記載のバルク波を利用した振動装置では、温度特性を改善するために、上記のように $2\mu\text{m}$ 以上の比較的厚い SiO_2 膜を設けなければならなかった。特許文献1には SiO_2 膜が熱酸化法により形成されることが記載されているが、熱酸化法では、ある一定の厚み以上に SiO_2 膜を成膜しようとする、 SiO_2 膜の成長速度が著しく遅くなる。従って、厚みが $2\mu\text{m}$ 以上の SiO_2 膜の形成は困難であった。
- [0007] 他方、スパッタリング法やCVD法によれば、厚い SiO_2 膜を容易に形成することは可能である。しかしながら、これらの方法で形成された SiO_2 膜では、膜の機械的損失 Q_m が悪かった。よって、振動子の Q 値が低下するという問題があった。
- [0008] なお、特許文献1では Si 半導体層に不純物をドーピングすることについては特に言及されていない。
- [0009] 他方、特許文献2に記載の表面音響波半導体装置は、表面波を励振させる構造に関するものであり、特許文献1に記載のようなバルク波を利用した振動装置とは異なるものである。また、特許文献2には P がドーピングされている n 型 Si 基板を用いることにより、弾性定数や表面音響波の速度が変化し、それによって温度特性が変化することが示唆されているだけである。
- [0010] 本発明の目的は、温度特性に優れ、かつ Q 値の劣化が生じ難い、振動装置及びその製造方法を提供することにある。

課題を解決するための手段

- [0011] 本発明に係る振動装置は、支持部と、支持部に接続されている振動腕とを備える。本発明において、振動腕は、縮退半導体である n 型 Si 層と、 n 型 Si 層上に設けられた励振部とを有する。励振部は、圧電薄膜と、圧電薄膜を挟むように設けられた第1、第2の電極とを有し、励振部により振動腕を屈曲振動させる。

- [0012] また、本発明の別の広い局面では、振動腕は、 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上のドーピング濃度を有するn型S！層と、n型S！層上に設けられた励振部とを有し、該励振部が、圧電薄膜と、圧電薄膜を挟むように設けられた第1、第2の電極とを有し、励振部により振動腕を屈曲振動させる。
- [0013] 本発明の振動装置のある特定の局面では、奇数本の振動腕を備え、前記励振部が前記振動腕を面外屈曲振動させるように構成されている。
- [0014] 本発明に係る振動装置の他の特定の局面では、偶数本の振動腕を備え、励振部が振動腕を面内屈曲振動させるように構成されている。
- [0015] 本発明に係る振動装置のさらに別の特定の局面では、振動腕の支持部に接続されている側とは反対側の端部に質量付加部が設けられている。
- [0016] 本発明に係る振動装置のさらに他の特定の局面では、n型S！層と、励振部との間に酸化シリコン膜が配置されている。
- [0017] 本発明に係る振動装置のさらに他の特定の局面では、酸化シリコン膜が熱酸化法により形成された膜である。
- [0018] 本発明に係る振動装置のさらに他の広い局面では、本発明に従って構成されている振動装置の製造方法が提供される。本発明の製造方法は、支持部に接続されているn型S！層を用意する工程と、n型S！層上に、第1の電極を形成する工程と、第1の電極上に圧電薄膜を形成する工程と、圧電薄膜上に第2の電極を構成する工程とを備える。
- [0019] 本発明に係る振動装置の製造方法のある特定の局面では、前記支持部にn型S！層が接続されている構造を用意する工程が、1つの面に凹部をし、S！からなる支持基板を用意する工程と、前記支持基板の凹部を覆うようにn型S！層を積層する工程とを有する。
- 発明の効果**
- [0020] 本発明に係る振動装置では、縮退半導体、すなわち $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上のドーピング濃度を有するn型S！層上に、圧電薄膜を挟むように設けられた第1、第2の電極を有する励振部が設けられているため、温度特性が優れている。従って、厚いS！O₂膜のようなQ値の劣化を引き起こす温度特性改

善膜を必ずしも設けずともよいため、Q値の劣化も生じ難い。

図面の簡単な説明

[0021] [図1]図1は、本発明の第1の実施形態に係る振動装置の外観を示す斜視図である。

[図2]図2は、図1中のA-A線に沿う部分の断面図である。

[図3]図3(a)及び図3(b)は、本発明の第1の実施形態に係る振動装置の振動姿態を説明するための各模式的斜視図である。

[図4]図4は、図1中のB-B線に沿う部分の断面図である。

[図5]図5(a)は、本発明の第2の実施形態に係る振動装置の要部を示す略図的平面図であり、図5(b)は(a)中のC-C線に沿う部分の断面図である。

[図6]図6は、本発明の第2の実施形態に係る振動装置の振動姿態を説明するための模式的斜視図である。

[図7]図7(a)は、本発明の第3の実施形態に係る振動装置における質量付加部が設けられている位置における横断面図であり、図7(b)は、複数の振動腕が設けられている位置における横断面図である。

[図8]図8(a)～図8(d)は、本発明の第1の実施形態に係る振動装置の製造方法を説明するための各断面図である。

[図9]図9(a)～図9(d)は、本発明の第1の実施形態に係る振動装置の製造方法を説明するための各断面図である。

[図10]図10は、本発明の第1の実施形態に係る振動装置における、振動腕の長手方向とn型Si層のSi結晶軸の方向との関係を示す回転角と、周波数温度係数TCFと、n型Si層におけるn型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。

[図11]図11は、本発明の第1の実施形態に係る振動装置における、温度と、共振周波数変化率と、n型Si層におけるn型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。

[図12]図12は、本発明の第2の実施形態に係る振動装置における、振動腕

の長手方向と n 型 Si 層の Si 結晶軸の方向との関係を示す回転角と、周波数温度係数 TCF と、 n 型 Si 層における n 型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。

[図13] 図 13 は、本発明の第 2 の実施形態に係る振動装置における、温度と、共振周波数変化率と、 n 型 Si 層における n 型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。

[図14] 図 14 は、本発明の第 1 の実施形態の変形例に係る振動装置の模式的平面図である。

[図15] 図 15 は、図 14 中の $X-X$ 線に沿う部分の断面図である。

発明を実施するための形態

[0022] 以下、図面を参照しつつ、本発明の具体的な実施形態を説明することにより、本発明を明らかにする。

[0023] 図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係る振動装置 1 の外観を示す斜視図である。振動装置 1 は、支持部 2 と、奇数本の振動腕 3 a, 3 b, 3 c と、質量付加部 4 とを備える共振型振動子である。振動腕 3 a ~ 3 c の各一端は、支持部 2 に接続されている。振動腕 3 a ~ 3 c の各他端には質量付加部 4 が設けられている。

[0024] 振動腕 3 a ~ 3 c は、一端が固定端として支持部 2 に接続されており、他端が自由端として変位可能とされている。すなわち、振動腕 3 a ~ 3 c は、支持部 2 によって片持ち梁で支持されている。奇数本の振動腕 3 a ~ 3 c は互いに平行に延ばされている。

[0025] なお、支持部 2 の両端には、振動腕 3 a ~ 3 c と平行に延びるように側枠 5, 6 が接続されている。支持部 2 及び側枠 5, 6 は一体に形成されている。支持部 2 及び側枠 5, 6 を有する構造、並びに振動腕 3 a ~ 3 c の主要部分の構造については、後ほど製造方法を説明することにより明らかにする。

[0026] 図 2 は、図 1 中の $A-A$ 線に沿う部分の断面図である。図 2 に示すように、振動腕 3 a ~ 3 c は、 SiO_2 膜 12、 n 型 Si 層 11、 SiO_2 膜 13、励振部 14 により構成されている。

- [0027] n型Si層11は縮退半導体であるn型Si半導体からなる。従って、n型ドーパントのドーピング濃度は $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である。上記n型ドーパントとしては、P、AsまたはSbなどの第15属元素を挙げることができる。
- [0028] n型Si層11の下面にはSiO₂膜12が設けられており、上面にもSiO₂膜13が設けられている。SiO₂膜12、13の厚みは0.4 μmである。SiO₂膜12、13は温度特性をさらに改善するために設けられている。もっとも、本発明においては、後述する本発明の第3の実施形態から明らかのようにSiO₂膜12、13は設けられずともよい。
- [0029] SiO₂膜13上面には励振部14が設けられている。励振部14は、圧電薄膜15と、第1の電極16と、第2の電極17とを有する。第1の電極16と第2の電極17とは、圧電薄膜15を挟むように設けられている。なお、SiO₂膜13の上面には圧電薄膜15aが設けられており、圧電薄膜15と第2の電極17との上面には圧電薄膜15bが設けられている。圧電薄膜15aはシード層、圧電薄膜15bは保護層であり、いずれも励振部14を構成するものではない。圧電薄膜15a、15bは設けられなくてもよい。
- [0030] 上記圧電薄膜15を構成する圧電材料は特に限定されないが、バルク波を利用した振動装置では、Q値が高いことが好ましい。従って、電気機械結合係数 k^2 は小さいが、Q値が高い、AlNが好適に用いられる。もっとも、ZnO、Sc置換AlN、PZT、KNNなどを用いてもよい。Sc置換AlN膜(ScAlN)は、ScとAlの原子濃度を100 at %とした場合、Sc濃度が0.5 at %から50 at %程度であることが望ましい。ScAlNはAlNよりも電気機械結合係数 k^2 が大きく、PZTやKNNよりも機械的なQ_mが大きいため、本発明のような共振型振動子に適用することで次のメリットがある。共振型振動子の用途として発振器がある。例えばTCXO(温度補償型発振器)では内蔵する温度センサの信号を、振動子と直列接続された可変容量素子にフィードバックし、可変容量素子の容量値を変化させることで発振周波数を調整することができる。この時、圧電薄膜としてA

I Nの代わりにS c A I Nを用いると、共振型振動子の比帯域が広がるため、発振周波数の調整範囲が広がる。同様にS c A I NをV C X O（電圧制御発振器）に用いる場合は、発振周波数の調整範囲が広がるため、共振型振動子の初期の周波数ばらつきを可変容量素子で調整することができ、周波数調整工程のコストが大幅に削減できる。

[0031] 第1、第2の電極16、17は、Mo、Ru、Pt、Ti、Cr、Al、Cu、Ag、またはこれらの合金などの適宜の金属により形成することができる。

[0032] 圧電薄膜15は、厚み方向に分極している。従って、第1、第2の電極16、17間に交番電界を印加することにより、励振部14が圧電効果により励振される。その結果、振動腕3a～3cは、図3（a）及び（b）に示す振動姿態をとるように屈曲振動する。なお、図3（a）及び（b）から明らかのように、中央の振動腕3bと、両側の振動腕3a、3cとは逆相で変位している。これは、中央の振動腕3bに印加される交番電界の位相と両側の振動腕3a、3cに印加される交番電界の位相を逆位相とすることにより達成し得る。あるいは、圧電薄膜15における分極方向を、中央の振動腕3bと、両側の振動腕3a、3cとで逆方向としてもよい。

[0033] 側枠5、6は、SiO₂膜22、Si基板21、SiO₂膜12、n型Si層11、SiO₂膜13、圧電薄膜15により構成されている。支持部2も、側枠5、6と同様に構成されている。Si基板21の上面には凹部21aが形成されており、凹部21aの側壁の一部が支持部2及び側枠5、6を構成している。振動腕3a～3cは凹部21a上に配置されている。Si基板21は支持部2及び側枠5、6を構成している支持基板である。SiO₂膜22は、保護膜であり、Si基板21の下面に設けられている。

[0034] 質量付加部4は、振動腕3a～3cの各先端に設けられている。本実施形態では、質量付加部4は振動腕3a～3cよりも幅方向の寸法が大きい矩形板状とされている。

[0035] 図4は、図1中のB－B線に沿う部分の断面図である。図4に示すように

、質量付加部4は、 SiO_2 膜12、 n 型 Si 層11、 SiO_2 膜13、圧電薄膜15、質量付加膜18が積層されて構成されている。質量付加膜18は、 Au からなり、質量付加部4の上面側すなわち圧電薄膜15の上面に設けられている。質量付加膜18は、 Au 以外に、 W 、 Mo 、 Pt などの密度の高い適宜の金属もしくは合金からなるものであってもよい。さらに、質量付加膜18は、質量付加部4の下面側すなわち SiO_2 膜12の下面にも設けられていてもよい。

[0036] もっとも、後述の製造工程から明らかなように、質量付加部4は、側枠5、6と同様に、 SiO_2 膜12、 n 型 Si 層11、 SiO_2 膜13、圧電薄膜15からなる積層構造を有するため、本実施形態のように、上面側にのみ質量付加膜18が設けられていることが望ましい。さらに、質量付加部4は振動腕3a～3cの先端に質量を付加する機能を有するものであるため、上記のように、振動腕3a～3cよりも幅方向の寸法が大きいものであれば、その機能を有することになる。従って、質量付加膜18は必ずしも設けられずともよい。

[0037] 本実施形態の振動装置1によれば、周波数温度係数 TCF の絶対値を小さくすることができる。これを、図10及び図11を参照して説明する。図10は、上記振動装置1における、 n 型 Si 層11の回転角と、 TCF と、 n 型 Si 層11における n 型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。

[0038] 図10の横軸の回転角は、振動腕3a～3cの長手方向と n 型 Si 層11の Si 結晶軸の方向との関係を示す。例えば、 $\text{Si}(100)$ の場合に回転角は0度となり、 $\text{Si}(110)$ の場合に回転角は45度となり、 $\text{Si}(010) = \text{Si}(100)$ の場合に回転角は90度となる。すなわち、 $\text{Si}(010)$ である90度の場合と、 $\text{Si}(100)$ である0度の場合とでは、等価となる。

[0039] また、図11は、上記振動装置1における、温度と、共振周波数変化率 ΔF_r と、 n 型 Si 層11における n 型ドーパントのドーピング濃度との関係

を示す図である。なお、図 11 は、回転角が 0 度の場合の結果を示す。

[0040] 図 10 及び図 11 では、本実施形態の振動装置 1 において n 型ドーパントのドーピング濃度を $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ とした場合と、 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ とした場合とを示すとともに、n 型 Si 層における n 型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ である点を除いては本実施形態の振動装置 1 と同じ構成を有する比較例 1 の場合も示している。

[0041] 図 10 から明らかなように、n 型 Si 層における n 型ドーパントのドーピング濃度を高めることにより TCF が改善されることがわかる。加えて、図 10 より TCF は回転角によっても変化することがわかる。もっとも、ドーピング濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ である比較例 1 の場合には、n 型 Si 層が縮退半導体ではないため、TCF の絶対値が大きく、さらに回転角が変化しても TCF はほとんど変化していない。これに対して、ドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である振動装置 1 であれば、回転角を選択することにより TCF の絶対値をより効果的に小さくし得ることがわかる。

[0042] また、図 11 から明らかなように、ドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である振動装置 1 であれば、温度変化による共振周波数変化率 ΔF_r が小さくなっていることがわかる。

[0043] 従って、本実施形態では、上記のように、n 型 Si 層 11 における n 型ドーパントのドーピング濃度は $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上であることが必要である。言い換えれば、n 型 Si 層 11 は、縮退半導体としてふるまう半導体層であることが必要である。

[0044] 上記のように、本実施形態の振動装置 1 によれば、上記縮退半導体である、すなわち n 型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である n 型 Si 半導体を用いているため、TCF の絶対値を効果的に小さくすることができる。

[0045] なお、本実施形態では、 SiO_2 膜 12, 13 が設けられているが、これらの厚みは $0.4 \mu\text{m}$ と非常に薄い。にも関わらず、上記の通り、TCF の絶対値を効果的に小さくすることができる。よって、Q 値の劣化も生じ難い。

[0046] 上記振動装置 1 の製造法は特に限定されないが、一例を図 8 (a) ~ (d) 及び図 9 (a) ~ (d) を参照して説明する。

[0047] まず、図 8 (a) に示すように、Si 基板 21 を用意する。Si 基板 21 の上面にエッチングにより凹部 21a を形成する。凹部 21a の深さは $10\ \mu\text{m}$ ~ $30\ \mu\text{m}$ 程度とすればよい。

[0048] 次に、図 8 (b) に示すように、ドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上で P がドーピングされた n 型 Si 層 11 を用意し、n 型 Si 層 11 の上面及び下面に SiO_2 膜 12, 13A を形成する。 SiO_2 膜 12, 13A は熱酸化法により形成する。熱酸化法により形成された SiO_2 膜は Q 値の劣化が生じ難いため好ましい。 SiO_2 膜 12, 13A の厚みは、 $0.4\ \mu\text{m}$ とする。

[0049] 次に、図 8 (c) に示すように、Si 基板 21 上に、 SiO_2 膜 12, 13A が形成されている n 型 Si 層 11 を積層する。積層に際しては、Si 基板 21 の凹部 21a が設けられている側の面に、 SiO_2 膜 12 を接触させる。

[0050] 次に、図 8 (d) に示すように、研磨により、 SiO_2 膜 13A を除去し、さらに n 型 Si 層 11 の厚みを薄くする。それによって、n 型 Si 層 11 の厚みを、 $10\ \mu\text{m}$ 程度とする。

[0051] 次に、図 9 (a) に示すように、熱酸化法により、n 型 Si 層 11 の上面に SiO_2 膜 13 を形成するとともに、Si 基板 21 の下面に SiO_2 膜 22 を形成する。 SiO_2 膜 13 の厚みは $0.4\ \mu\text{m}$ とする。

[0052] 次に、図 9 (b) に示すように、 SiO_2 膜 13 の上面に、 $30\ \text{nm}$ ~ $100\ \text{nm}$ 程度の厚みで AlN からなる圧電薄膜 15a を形成した後に、圧電薄膜 15a の上面に第 1 の電極 16 を形成する。第 1 の電極 16 は、Mo からなる第 1 の層と Al からなる第 2 の層とが積層された積層電極である。圧電薄膜 15a はシード層であり、圧電薄膜 15a が設けられていることにより、第 1 の電極 16 における Mo からなる第 1 の層が高い配向性で形成される。そして、図 9 (c) に示すように、圧電薄膜 15a と第 1 の電極 16 との上面に AlN からなる圧電薄膜 15 を形成した後に、圧電薄膜 15 の上面に第 2 の電極 17 を形成する。第 2 の電極 17 は、Mo からなる第 1 の層と Al

1 からなる第2の層とが積層された積層電極である。第1の電極16と第2の電極17とは、例えば、スパッタリング法を用いたリフトオフ・プロセスにより形成する。

[0053] しかる後、図9(d)に示すように、圧電薄膜15と第2の電極17との上面に、30nm～100nm程度の厚みでAlNからなる圧電薄膜15bを形成する。そして、圧電薄膜15の上面であって質量付加部4が形成される領域に、Auからなる質量付加膜18を形成する。

[0054] 最後に、ドライエッチングまたはウェットエッチングにより、図1に示した複数の振動腕3a～3c及び質量付加部分4が残存するように加工する。このようにして、振動装置1を得ることができる。

[0055] 図5(a)は、本発明の第2の実施形態に係る振動装置41の要部を示す略図的平面図であり、図5(b)は図5(a)中のC-C線に沿う部分の断面図である。振動装置41は、支持部42と、偶数本の振動腕43a、43bと、質量付加部44とを備える共振型振動子である。支持部42の両端には、振動腕43a、43bと平行に延びるように図示されていない側枠が接続されている。

[0056] 図5(a)に示すように、振動腕43a、43bの各一端は、支持部42に接続されている。振動腕43a、43bの各他端には質量付加部44が設けられている。振動腕43a、43bは、一端が固定端として支持部42に接続されており、他端が自由端として変位可能とされている。すなわち、振動腕43a、43bは、支持部42によって片持ち梁で支持されている。偶数本の振動腕振動腕43a、43bは互いに平行に延ばされている。

[0057] 図5(a)、(b)に示すように、振動腕43a、43bには、それぞれ、複数の貫通孔43cが形成されている。貫通孔43cは、平面視して振動腕43a、43bの長さ方向を長手方向とする矩形状であり、振動腕43a、43bの長さ方向に沿って設けられている。

[0058] 図5(b)では、振動腕43aにおける貫通孔43cが設けられている部分の横断面が示されている。振動腕43aは、貫通孔43cに隣接する両側

の部分に設けられている、 n 型 Si 層51と励振部55により構成されている。励振部55は、第1の電極52と、圧電薄膜53と、第2の電極54とを有する。第1の電極52と第2の電極54とは、圧電薄膜53を挟むように設けられている。振動腕43bも同様に構成されている。

[0059] 本実施形態では貫通孔43cを設けることにより、振動腕43a, 43bの変位が円滑化されている。貫通孔43cは必ずしも設けられずともよい。

[0060] 図5では図示されていないが、振動装置41は、第1の実施形態と同様に、 Si 基板と、 Si 基板の下面に設けられている SiO_2 膜とを有する。本実施形態においては、支持部42と図示されていない側枠とは、 SiO_2 膜と、 Si 基板と、 n 型 Si 層51と、圧電薄膜53により構成されている。また、質量付加部44は、振動腕43a, 43bの各先端に設けられている。本実施形態では、質量付加部44は振動腕43a, 43bよりも幅方向の寸法が大きい矩形板状とされている。質量付加部44は、 n 型 Si 層51、圧電薄膜53、質量付加膜45が積層されて構成されている。質量付加膜45は、質量付加部44の上面側すなわち圧電薄膜53の上面に設けられている。

[0061] n 型 Si 層51は、第1の実施形態と同様に、縮退半導体である、 n 型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である n 型 Si 半導体からなる。そして、第1, 第2の電極52, 54及び圧電薄膜53は第1の実施形態と同様の材料で構成されている。もっとも、本実施形態では、 n 型 Si 層51の上面及び下面に SiO_2 膜が設けられていない。

[0062] 本実施形態の振動装置41では、圧電薄膜53は、厚み方向に分極している。従って、第1, 第2の電極52, 54間に交番電界を印加することにより、励振部55が圧電効果により励振される。その結果、振動腕43a, 43bは、図6に示す振動姿態をとるように屈曲振動する。振動腕43aに印加される交番電界の位相と振動腕43bに印加される交番電界の位相を逆位相とすることにより、振動腕43aと振動腕43bとは逆相で変位する。振動腕43a, 43bは、音叉型面内屈曲振動モードで振動する。

[0063] 本実施形態の振動装置41においても、振動腕43a, 43bを構成する

n型Si層51が、縮退半導体であるn型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上であるn型Si半導体からなるため、周波数温度係数TCFの絶対値を小さくすることができる。すなわち、SiO₂膜を形成せずとも、優れた温度特性を実現することができる。これを図12及び図13を参照して説明する。

[0064] 図12は、上記振動装置41における、n型Si層51の回転角と、周波数温度係数TCFと、n型Si層51におけるn型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。図12の横軸の回転角は、図10と同様に、振動腕43a、43bの長手方向とn型Si層51のSi結晶軸の方向との関係を示す。図13は、上記振動装置41における、温度と、共振周波数変化率 ΔF_r と、n型Si層51におけるn型ドーパントのドーピング濃度との関係を示す図である。なお、図13は、回転角が0度の場合の結果を示す。

[0065] 図12及び図13では、本実施形態の振動装置41においてn型ドーパントのドーピング濃度を $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ とした場合と、 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ とした場合とを示すとともに、n型Si層におけるn型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ である点を除いては本実施形態の振動装置41と同じ構成を有する比較例2の場合も示している。

[0066] 図12から明らかなように、本実施形態においても、n型Si層におけるn型ドーパントのドーピング濃度を高めることによりTCFが改善されることができ、TCFが回転角によっても変化することがわかる。もっとも、ドーピング濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ である比較例2の場合には、n型Si層が縮退半導体ではないため、TCFの絶対値が大きく、さらに回転角が変化してもTCFはほとんど変化していない。これに対して、ドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である振動装置41であれば、回転角を選択することによりTCFの絶対値をより効果的に小さくし得ることがわかる。

[0067] さらに、図13から明らかなように、ドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である振動装置41であれば、温度変化による共振周波数変化率 ΔF_r

が小さくなっていることがわかる。

[0068] 第2の実施形態の振動装置41から明らかなように、本発明の振動装置は、偶数本の振動腕が音叉型面内屈曲振動モードで振動する振動装置であってもよい。また、第2の実施形態から明らかなように、 n 型Si層の上面及び下面にSiO₂膜を必要に応じて設ければよく、その場合においても、TCFの絶対値をより効果的に小さくし得ることがわかる。

[0069] 図7(a)及び(b)は、本発明の第3の実施形態に係る振動装置の各横断面図である。第3の実施形態では、第1の実施形態の変形例である。図7(a)は、本発明の第3の実施形態に係る振動装置における質量付加部が設けられている位置における横断面図であり、図7(b)は、複数の振動腕が設けられている位置における横断面図である。

[0070] 図7(a)及び(b)から明らかなように、本実施形態に係る振動装置は、 n 型Si層11の上面及び下面にSiO₂膜が設けられていない点で第1の実施形態の振動装置1と異なっており、その他の構造は同じである。従って、第1の実施形態の説明を援用することによりその説明を省略する。

[0071] 第3の実施形態に係る振動装置のように、 n 型Si層11の上面及び下面にSiO₂膜が設けられていなくても、 n 型Si層11が縮退半導体であるため、すなわちドーピング濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である n 型Si半導体であるため、周波数温度係数TCFの絶対値を効果的に小さくすることができる。また、本実施形態では、 n 型Si層11の上面及び下面にSiO₂膜が設けられていないため、Q値の劣化が生じ難い。

[0072] なお、第1の実施形態及び第3の実施形態では、振動腕は3本であったが、奇数本である限りその数は特に限定されるものではない。同様に、第2の実施形態では、振動腕は2本であったが、偶数本である限りその数は特に限定されるものではない。

[0073] また、第1及び第2の実施形態から明らかなように、本発明においてはバルク波の屈曲振動モードを利用する限り、面外屈曲振動モードであってもよく、面内屈曲振動モードのいずれを用いてもよい。

[0074] (追加実施例)

図14及び図15は、上述した第1の実施形態の振動装置1の変形例に係る振動装置70を説明するための図である。図14は本変形例に係る振動装置70の模式的平面図であり、図15は図14中のX-X線に沿う部分の断面図である。本変形例の振動装置70では、以下に述べるマイクロローディング効果抑制パターン71、71が設けられている点と、n型Si層の上面及び下面にSiO₂膜が設けられていない点と、シード層である圧電薄膜が設けられていない点、Si基板の下面にSiO₂膜が設けられていない点とが第1の実施形態の振動装置1と異なっており、その他の構造は同じである。

[0075] 図1及び図5に示した構造体を形成する際に、Siを加工するためにドライエッチング加工を行う。ドライエッチング加工では、エッチングで除去される部分の開口幅が狭い箇所ほどエッチングレートが速くなる。これは、マイクロローディング効果といわれる。そのため、ドライエッチング加工を行う領域内に異なる開口幅の部分が混在すると、エッチング量のばらつきが生じ、振動装置における周波数ばらつきの原因となる。そのため、本発明では、図14及び図15に示す変形例のようにマイクロローディング効果抑制パターン71、71を配置し、エッチングで除去される部分の開口幅W1を均一にすることが好ましい。それによって、エッチング量のばらつきを抑制することができる。なお、マイクロローディング効果抑制パターン71、71は側枠5、6と同様の積層構造を有する。

[0076] さらに、マイクロローディング効果抑制パターン71、71は、製品の落下衝撃時に振動腕が大きく変位し、破損することを防ぐためのストッパとしても機能する。

符号の説明

[0077] 1…振動装置
2…支持部
3a, 3b, 3c…振動腕
4…質量付加部

5, 6…側枠

11…n型Si層

12, 13, 13A…SiO₂膜

14…励振部

15…圧電薄膜

15a, 15b…圧電薄膜

16…第1の電極

17…第2の電極

18…質量付加膜

21…Si基板

21a…凹部

22…SiO₂膜

41…振動装置

42…支持部

43a, 43b…振動腕

43c…貫通孔

44…質量付加部

45…質量付加膜

51…n型Si層

52…第1の電極

53…圧電薄膜

54…第2の電極

55…励振部

70…振動装置

71…マイクロローディング効果抑制パターン

請求の範囲

- [請求項1] 支持部と、
 前記支持部に接続されている振動腕とを備え、
 前記振動腕が、縮退半導体であるn型Si層と、前記n型Si層上に設けられた励振部とを有し、該励振部が、圧電薄膜と、圧電薄膜を挟むように設けられた第1、第2の電極とを有し、前記励振部により前記振動腕を屈曲振動させる、振動装置。
- [請求項2] 支持部と、
 前記支持部に接続されている振動腕とを備え、
 前記振動腕が、 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上のドーピング濃度を有するn型Si層と、前記n型Si層上に設けられた励振部とを有し、該励振部が、圧電薄膜と、圧電薄膜を挟むように設けられた第1、第2の電極とを有し、前記励振部により前記振動腕を屈曲振動させる、振動装置。
- [請求項3] 奇数本の前記振動腕を備え、前記励振部が前記振動腕を面外屈曲振動させるように構成されている、請求項1または2に記載の振動装置。
- [請求項4] 偶数本の前記振動腕を備え、前記励振部が前記振動腕を面内屈曲振動させるように構成されている、請求項1または2に記載の振動装置。
- [請求項5] 前記振動腕の前記支持部に接続されている側とは反対側の端部に質量付加部が設けられている、請求項1～4のいずれか1項に記載の振動装置。
- [請求項6] 前記n型Si層と、前記励振部との間に酸化シリコン膜が配置されている、請求項1～5のいずれか1項に記載の振動装置。
- [請求項7] 前記酸化シリコン膜が熱酸化法により形成された膜である、請求項6に記載の振動装置。
- [請求項8] 請求項1～7のいずれか1項に記載の振動装置の製造方法であって

、

支持部に接続されている n 型 S ！層を用意する工程と、
 前記 n 型 S ！層上に、第1の電極を形成する工程と、
 前記第1の電極上に圧電薄膜を形成する工程と、
 前記圧電薄膜上に第2の電極を構成する工程とを備える、振動装置
 の製造方法。

[請求項9]
 前記支持部に n 型 S ！層が接続されている構造を用意する工程が、
 1つの面に凹部を有し、 S ！からなる支持基板を用意する工程と、
 前記支持基板の前記凹部を覆うように n 型 S ！層を積層する工程と
 を有する、請求項8に記載の振動装置の製造方法。