

明 細 書

発明の名称：圧電共振子及びその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、圧電共振子及び該圧電共振子の製造方法に関する。

背景技術

[0002] 従来、単結晶Si上に圧電薄膜を含む励振部が構成されている圧電MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 振動子が知られている。

[0003] 例えば、下記の特許文献1には、Si単結晶上に、スカンジウム含有窒化アルミニウムからなる圧電体薄膜が設けられている、圧電MEMS振動子が開示されている。上記圧電MEMS振動子は、Si単結晶にキャビティ部が設けられている、いわゆる、Cavity SOI (Silicon on insulator) 構造を有している。

[0004] また、下記の特許文献2や非特許文献1, 2においても、SOI基板上に窒化アルミニウムからなる圧電膜層が設けられている、圧電MEMS振動子が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2009-10926号公報

特許文献2：US2010/0013360A1

非特許文献

[0006] 非特許文献1：Procedia Chemistry1 (2009) 1395-1398

非特許文献2：Frequency Control Symposium, 2007, IEEE International 1210-1213

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] しかしながら、特許文献 1, 2 や非特許文献 1, 2 に記載の圧電 MEMS 振動子では、Si 層の厚みばらつきが大きかった。他方、共振周波数は Si 層の厚みに依存する。従って、特許文献 1, 2 や、非特許文献 1, 2 に記載の圧電共振子では、周波数にばらつきが生じがちであった。そのため、トリミング工程を設け、周波数を調整しなければならなかった。

[0008] 本発明の目的は、Si の厚みばらつきに基づく、共振周波数のばらつきを抑制することができる、圧電共振子及び該圧電共振子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

[0009] 本発明に係る圧電共振子は、単結晶 Si と、上記単結晶 Si 上に設けられた窒化アルミニウムからなる圧電薄膜と、上記圧電薄膜を挟むように設けられた第 1, 第 2 の電極とを備える。上記窒化アルミニウムからなる圧電薄膜において、窒素及びアルミニウムを除いた元素がドーピングされている。上記単結晶 Si を除く部分の音速の合成音速は、上記単結晶 Si の音速と実質的に一致されている。

[0010] 本発明に係る圧電共振子のある特定の局面では、上記ドーピングが、上記単結晶 Si を除く部分の音速の合成音速と、上記単結晶 Si の音速とを実質的に一致させるようになされている。

[0011] 本発明に係る圧電共振子の他の特定の局面では、上記ドーピングが、スカンジウム、イットリウム、ルテチウム及びジスプロシウムからなる群から選択された少なくとも 1 種の元素によりなされている。

[0012] 本発明に係る圧電共振子のさらに別の特定の局面では、上記単結晶 Si が、n 型ドーパントによりドーピングされており、該 n 型ドーパントの濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上である。

[0013] 本発明に係る圧電共振子は、好ましくは、上記第 1, 第 2 の電極に接するように、シリコン酸化膜層が配置されている。

[0014] 本発明に係る圧電共振子では、好ましくは、上記窒素及びアルミニウムを除いた元素がドーピングされている窒化アルミニウムからなる圧電薄膜よりも高

音速な誘電体膜が、上記第 1、第 2 の電極に接するように配置されている。

上記高音速な誘電体膜は、好ましくは、ホウ素と炭素のうち少なくとも一方の元素がドーピングされた窒化アルミニウムからなる。

[0015] 本発明に係る圧電共振子は、好ましくは、振動モードが、幅広がり振動又は面内屈曲振動である。

[0016] 本発明に係る圧電共振子の製造方法では、単結晶 Si を用意する工程と、上記単結晶 Si 上に第 1 の電極を形成する工程と、上記第 1 の電極上に窒化アルミニウムからなる圧電薄膜を形成する工程と、上記圧電薄膜上に第 2 の電極を形成する工程とを備える。上記圧電薄膜を形成する工程は、上記単結晶 Si を除く部分の音速の合成音速を、上記単結晶 Si の音速と実質的に一致させるように、窒素及びアルミニウムを除いた元素を、予め窒化アルミニウムにドーピングする工程を含む。

発明の効果

[0017] 本発明に係る圧電共振子では、単結晶 Si を除く部分の音速の合成音速が、単結晶 Si の音速と実質的に一致されている。その結果、共振周波数が厚みに依存しなくなる。よって、厚みばらつきに基づく、共振周波数ばらつきを抑制することができる。

[0018] 本発明に係る圧電共振子の製造方法では、Si の厚みばらつきに基づく、共振周波数のばらつきを抑制することができる圧電共振子を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0019] [図1]図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係る圧電共振子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 は、窒化アルミニウム (AlN) に対する Sc 濃度と音速の関係を示す図である。

[図4]図 4 は、窒化アルミニウム (AlN) に対する Sc、Y、Dy 及び Lu のドーパント濃度と音速の関係を示す図である。

[図5]図5は、第1の実施形態の第1の変形例を説明するための断面図である。

[図6]図6は、Sc濃度が15at%のScAlNを用いたときの、ScAlN膜厚比($\text{ScAlN} / \text{ScAlN} + \text{SiO}_2$)と、合成音速(ScAlNの音速と SiO_2 の音速の合成音速)との関係を示す図である。

[図7]図7は、スカンジウム(Sc)濃度と圧電定数(d_{33})の関係を示す図である。

[図8]図8は、第1の実施形態の第2の変形例を説明するための断面図である。

[図9]図9は、第1の実施形態の第3の変形例を説明するための断面図である。

[図10]図10は、窒化アルミニウムに対するB及びCのドーパント濃度と音速の関係を示す図である。

[図11]図11は、本発明の第2の実施形態に係る圧電共振子の外観を示す斜視図である。

[図12]図12は、図11中のB-B線に沿う部分の断面図である。

[図13]図13は、実施例1に係る幅拡がり振動子のSiの厚みと周波数ばらつきの関係を示す図である。

[図14]図14は、実施例2に係る面内屈曲振動子のSiの厚みと周波数ばらつきの関係を示す図である。

[図15]図15は、実施例3に係る幅拡がり振動子のSiの厚みと周波数ばらつきの関係を示す図である。

[図16]図16は、実施例4に係る幅拡がり振動子のSiの厚みと周波数ばらつきの関係を示す図である。

[図17]図17は、第2の実施形態の変形例を説明するための断面図である。

発明を実施するための形態

[0020] 以下、本発明の実施形態について、図面を参照しつつ説明する。

[0021] 図1は、本発明の第1の実施形態に係る圧電共振子1の外観を示す斜視図

である。圧電共振子 1 は、支持部 2 a, 2 b と、振動板 3 と、連結部 4 a, 4 b とを備える、幅拡がり振動を利用している共振子である。

[0022] 振動板 3 は矩形板状であり、長さ方向と幅方向とを有している。振動板 3 は、連結部 4 a, 4 b を介して、支持部 2 a, 2 b に接続されている。すなわち、振動板 3 は、支持部 2 a, 2 b により支持されている。振動板 3 は、交番電界が印加されると、幅拡がり振動モードで幅方向に振動する振動体である。

[0023] 連結部 4 a, 4 b の一端は、振動板 3 の短辺側の側面中央に接続されている。上記振動板 3 の短辺側の側面中央は、幅拡がり振動のノードとなっている。

[0024] 支持部 2 a, 2 b は、連結部 4 a, 4 b の他端に接続されている。支持部 2 a, 2 b は、連結部 4 a, 4 b の両側に延びている。支持部 2 a, 2 b の長さは、特に限定されないが、本実施形態においては、振動板 3 の短辺と同じ長さである。

[0025] 支持部 2 a, 2 b 及び連結部 4 a, 4 b は、それぞれ、振動板 3 と同じ材料で構成されていてもよいし、別の材料で構成されていてもよい。

[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、振動板 3 は、単結晶 Si 5、第 1, 第 2 の電極 6, 7、圧電薄膜 8 により構成されている。

[0027] より具体的には、単結晶 Si 5 上に、圧電薄膜 8 が設けられている。第 1, 第 2 の電極 6, 7 は、圧電薄膜 8 を挟むように設けられている。なお、本実施形態においては、図示を省略しているが、単結晶 Si 5 の上面 5 a にシード層を設けてもよいし、第 2 の電極 7 の上面に保護層を設けてもよい。もっとも、上記シード層及び上記保護層は設けなくともよい。上記シード層及び上記保護層としては、圧電薄膜 8 と同じ材料を用いることができる。

[0028] 上記単結晶 Si は、特に限定されないが、縮退半導体である n 型半導体であり、n 型ドーパントのドーパント濃度が、 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上であることが好ましい。高濃度にドーパされた n 型半導体を用いた場合、温度による

共振周波数変動をより一層改善させることができるためである。なお、上記 n 型ドーパントとしては、P、As 又は Sb 等の第 15 属元素を挙げることができる。

[0029] 第 1, 第 2 の電極 6, 7 の材料としては、特に限定されず、Mo、Ru、Pt、Ti、Cr、Al、Cu、Ag、W 又はこれらの合金などの適宜の金属を用いることができる。共振子の Q 値を向上させるためには、電極材料にも Q 値が高い材料を用いることが有効であるため、Mo や W を用いることが好ましい。

[0030] 圧電薄膜 8 は、窒素及びアルミニウムを除いた元素がドーピングされている窒化アルミニウムにより構成されている。上記ドーピングされる元素としては、スカンジウム (Sc)、イットリウム (Y)、ルテチウム (Lu) 及びジスプロシウム (Dy) からなる群から選択された少なくとも 1 種の元素が好ましい。添加濃度に対して音速の変化率が小さく、濃度のばらつきに比較的強い Sc を用いることがより好ましい。

[0031] 本実施形態の圧電共振子 1 では、単結晶 Si 5 を除く部分の音速の合成音速が、上記単結晶 Si 5 の音速と実質的に一致されている。なお、本明細書における音速とは、縦波音速を意味する。また、音速は、完全に一致されていることが好ましいが、実質的に一致されていればよい。

[0032] 上記単結晶 Si 5 を除く部分の音速の合成音速は、例えば、本実施形態では、第 1, 第 2 の電極 6, 7 の音速と圧電薄膜 8 の音速との合成音速である。通常、第 1, 第 2 の電極 6, 7 の厚みは、他の層と比較して、例えば、圧電薄膜 8 の $1/20 \sim 1/4$ と薄く、音速への寄与が小さい。そこで、本明細書においては、第 1, 第 2 の電極 6, 7 の音速は無視するものとする。

[0033] この場合、上記単結晶 Si 5 を除いた圧電共振子 1 の合成音速は、圧電薄膜 8 の音速となる。よって、本実施形態において、圧電薄膜 8 の音速と単結晶 Si 5 の音速とを一致させることが必要となる。

[0034] 圧電薄膜 8 の音速と単結晶 Si 5 の音速を一致させる方法としては、圧電薄膜 8 を構成する窒化アルミニウムに対する、上記窒素及びアルミニウムを

除いた元素のドーパント濃度を調節する方法が挙げられる。より具体的には、以下、図3を参照して説明する。

[0035] 図3は、窒化アルミニウム（AlN）に対するScのドーパント濃度と音速の関係を示す図である。図3より、図の実線で示すSc含有窒化アルミニウム（ScAlN）の音速は、Sc濃度の増加とともに低下していることが分かる。これは、Scを添加することで、ScとAlが置換し、a軸方向の格子間隔が広がり、c軸方向にScやAl原子が動きやすくなり、ヤング率が急激に低下するためである。一方、破線で示す単結晶Si5は、Sc濃度に関わらず、音速が一定である。そこで、窒化アルミニウムに対するScのドーパント濃度を増加させていくと、図中X点において、ScAlNの音速と単結晶Si5の音速が一致する。このように、Scのドーパント濃度を調整することによって、ScAlNの音速（圧電薄膜8の音速）と、上記単結晶Si5の音速とを一致させることが可能となる。

[0036] 本実施形態の圧電共振子1の共振周波数（ f_r ）は、以下の式（1）で表される。

[0037] [数1]

$$\text{数1} \quad f_r = \frac{1}{2w} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{33}^E}} = \frac{1}{2w} v_{total} \quad \dots \text{式(1)}$$

（ f_r : 共振周波数、 w : 幅、 ρ : 密度、 s^E : 弾性コンプライアンス、 v_{total} : 圧電共振子の音速）

[0038] 式（1）により、厚みに依存するのは、以下の式（2）で表される v_{total} のみであることがわかる。

[0039] [数2]

$$\text{数2} \quad v_{total} = \frac{t_1 v_1 + t_2 v_2}{t_{total}} \quad \dots \text{式(2)}$$

（ v_{total} : 圧電共振子の音速、 t_{total} : 圧電共振子の厚み、 v_1 : 単結晶Siの音速、 t_1 : 単結晶Siの厚み、 v_2 : 圧電薄膜の音速、 t_2 : 圧電薄膜の厚み）

[0040] 本発明においては、Scのドーパント濃度を調整することにより、圧電薄膜8の音速と、上記単結晶Si5の音速を一致させているので、 $v_1 = v_2$ となる。この場合、 v_{total} は、下記の式（3）で示すように、 $v_{total} = v_1$ と

なる。

[0041] [数3]

$$\text{数3} \quad v_{total} = \frac{t_1 v_1 + t_2 v_2}{t_{total}} = \frac{t_1 v_1 + t_2 v_1}{t_{total}} = v_1 \quad \dots \text{式 (3)}$$

(v_{total} : 圧電共振子の音速、 t_{total} : 圧電共振子の厚み、 v_1 : 単結晶S i の音速、 t_1 : 単結晶S i の厚み、 v_2 : 圧電薄膜の音速、 t_2 : 圧電薄膜の厚み)

[0042] 式(3)で示されるように、 v_{total} は、厚みに依存しないこととなるので、式(1)の共振周波数(f_r)も、厚みに依存しないこととなる。よって、厚みばらつきに基づく、共振周波数のばらつきが抑制される。

[0043] 図4は、窒化アルミニウム(A l N)に対するS c、Y、D y及びL uのドーパント濃度と音速の関係を示す図である。図4から、S cの代わりに、Y、D y、L uを用いた場合も、ドーパント濃度を高めることにより、音速を低下させ、かつ単結晶S i 5の音速と一致させることができることがわかる。

[0044] 図5は、第1の実施形態の第1の変形例を説明するための断面図である。本変形例では、単結晶S i 5の上面に、さらにシリコン酸化膜9が配置されている。また、本変形例においても、第1、第2の電極6、7の音速は無視する。よって、本変形例においては、上記単結晶S i 5を除く部分の音速の合成音速は、圧電薄膜8の音速とシリコン酸化膜9の音速との合成音速となる。ここで、シリコン酸化膜9の音速は、単結晶S i 5の音速よりも遅い。従って、膜厚比(圧電薄膜8の膜厚/圧電薄膜8とシリコン酸化膜9の膜厚の和)を変化させることにより、上記合成音速と単結晶S i 5の音速とを一致させることができる。より具体的には、図6を参照して、これを説明する。

[0045] 図6は、S c濃度が15at%のS c A l Nを用いたときの、S c A l N膜厚比(S c A l N/S c A l N+S i O₂)と、合成音速(S c A l Nの音速とS i O₂の音速の合成音速)との関係を示す図である。図6より、S c A l N膜厚比の増加に伴い、上記合成音速が速くなり、図中Y点において、単結晶S i 5の音速と一致していることがわかる。すなわち、図中Y点におい

ては、単結晶S i 5の音速 (v_1) は、S c A l N (圧電薄膜8) の音速 (v_2) とS i O₂ (シリコン酸化膜9) の音速 (v_3) との合成音速 ($t_2 v_2 + t_3 v_3$) / ($t_2 + t_3$) と一致する。よって、圧電共振子1の音速 (v_{total}) は下記の式(4)で表すことができる。

[0046] [数4]

$$\text{数4} \quad v_{total} = \frac{t_1 v_1 + t_2 v_2 + t_3 v_3}{t_{total}} = \frac{t_1 v_1 + (t_2 + t_3) v_1}{t_{total}} = v_1 \quad \dots \text{式(4)}$$

(v_{total} : 圧電共振子の音速、 t_{total} : 圧電共振子の厚み、 v_1 : 単結晶S iの音速、 t_1 : 単結晶S iの厚み、 v_2 : 圧電薄膜の音速、 t_2 : 圧電薄膜の厚み、 v_3 : S i O₂の音速、 t_3 : S i O₂の厚み)

[0047] 式(4)に示すように、圧電共振子の音速 (v_{total}) は、本変形例においても、 $v_{total} = v_1$ となるので、厚みに依存しない。よって、式(1)の共振周波数も、厚みに依存しないので、厚みばらつきに基づく、共振周波数のばらつきが生じ難くなる。

[0048] このように、スカンジウム濃度や、スカンジウムとシリコン酸化膜9との膜厚比の調整により、上記単結晶S iを除く部分の音速の合成音速と単結晶S i 5の合成音速を一致させることができる。その結果、共振周波数が厚みに依存しなくなる。すなわち、厚みばらつきによる共振周波数のばらつきが抑制される。

[0049] 図7は、スカンジウム(S c)濃度と圧電定数(d_{33})の関係を示す図である。図7より、圧電定数(d_{33})は、S c濃度が、約40at%の時、最大値を示すことがわかる。この場合、広帯域な共振子を安定して得ることができる。他方、S c濃度が高いと、図3に示すように、S c A l N (圧電薄膜8)の音速が低くなるため、単結晶S i 5の音速と一致させることができないおそれがある。

[0050] そこで、例えば、図8に示す、第1の実施形態の第2の変形例のように、第2の電極7の上面に、さらにドーピングされていない高音速の窒化アルミニウム層10を配置してもよい。それによって、上記単結晶S i 5を除く部分の音速の合成音速を単結晶S i 5の音速と一致させてもよい。

- [0051] また、図9に示す第1の実施形態の第3の変形例のように、第2の電極7の上面に、さらにホウ素（B）含有窒化アルミニウム層11を配置することにより、上記単結晶Si5を除く部分の音速の合成音速を単結晶Si5の音速と一致させることができる。Bでドーピングした場合、図10に示すように、ドーパント濃度の増加とともに、音速が速くなるからである。
- [0052] 加えて、上記B含有窒化アルミニウム（BAIN）の温度特性は良好であるため、圧電共振子1の温度特性を改善することもできる。
- [0053] なお、本実施形態では、ドーパントとしてBを用いたが、窒化アルミニウムの音速を速くすることができる元素であれば、特に限定されない。このような元素としては、例えば、炭素を例示することができる。図10で示されているように、炭素（C）をドーパントとした場合にも、ドーパント濃度の増加とともに、音速が速くなることがわかる。
- [0054] 本発明の第1の実施形態に係る圧電共振子1は、幅広がり振動を利用してゐる共振子であったが、図11に示す第2の実施形態の圧電共振子21のように、面内屈曲振動を利用している共振子であってもよい。上記圧電共振子21は、支持部22と偶数本の振動腕を備える。なお、本実施形態においては、2本の振動腕23a、23bが備えられている。
- [0055] 振動腕23a、23bは、平面形状が細長い矩形であり、長さ方向と幅方向を有している。振動腕23a、23bは、それぞれ、一端が支持部22に接続されて固定端とされており、他端が自由端として変位可能とされている。2本の振動腕23a、23bは互いに平行に延びており、同じ長さである。振動腕23a、23bは、交番電界が印加されると、面内屈曲振動モードで屈曲振動する振動体である。
- [0056] 支持部22は、振動腕23a、23bの短辺に接続されている。支持部22は、振動腕23a、23bの幅方向に延びている。支持部22は、振動腕23a、23bを、片持ち梁で支持している。
- [0057] 図12は、図11中のB-B線に沿う部分の断面図である。図12に示すように、振動腕23a、23bは、単結晶Si5、第1の電極6a、6b、

第2の電極7 a, 7 b及び圧電薄膜8により構成されている。より具体的には、単結晶S i 5上に第1の電極6 a, 6 bが形成されている。第1の電極6 aと第1の電極6 bとは幅方向においてギャップを隔てて対向している。第1の電極6 a, 6 bを覆うように、単結晶S i 5上に、圧電薄膜8が形成されている。圧電薄膜8上に第2の電極7 a, 7 bが形成されている。第2の電極7 aと第2の電極7 bとは幅方向においてギャップを隔てて対向している。

[0058] 電極材料にはM o、T i、A l、R uまたはP tなどを用いることができる。第1, 第2の電極6 a, 6 b, 7 a, 7 bは、上記電極材料の単層膜であっても積層膜であってもよい。第1の電極6 a, 6 bと単結晶S i 5との間にシード層を挟んでも良い。それによって、第1の電極6 a, 6 bの結晶性を高めることができる。シード層材料にはA l N、T iまたはS c A l Nなどを用いることができる。

[0059] 第2の実施形態においても、第1の実施形態と同様の方法で、上記単結晶S iを除く部分の音速の合成音速と単結晶S iの音速を一致させることができる。すなわち、合成音速を厚みに依存しないものとすることができる。

[0060] また、第2の実施形態である面内屈曲振動子の共振周波数は、下記に示す式(5)で表される。

[0061] [数5]

$$\text{数5} \quad f_r = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \frac{a}{l^2} \sqrt{\frac{2}{1+\sigma}} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{33}^E}} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \frac{a}{l^2} \sqrt{\frac{2}{1+\sigma}} v_{total} \quad \dots \text{式(5)}$$

(f_r : 共振周波数、 l : 長さ、 a : 幅、 σ : ポアソン比、 ρ : 密度、 s^E : 弾性コンプライアンス、 v_{total} : 圧電共振子の音速)

[0062] 式(5)より、面内屈曲振動子の共振周波数においても、合成音速が厚みに依存しない場合、共振周波数は厚みに依存しないことがわかる。よって、面内屈曲振動子においても、上記単結晶S i 5を除く部分の音速の合成音速と単結晶S i 5の音速を一致させることで、厚みばらつきに基づく、共振周波数のばらつきを抑制することができる。

[0063] 本発明に係る圧電共振子の製造方法では、単結晶S i 5を用意する工程と

、上記単結晶Si5上に第1の電極6を形成する工程と、上記第1の電極6上に窒化アルミニウムからなる圧電薄膜8を形成する工程と、上記圧電薄膜8上に第2の電極7を形成する工程とを備える。そして、本発明に係る圧電共振子の製造方法では、上記圧電薄膜8を形成する工程において、上記単結晶Si5を除く部分の音速の合成音速を、上記単結晶Si5の音速と一致させるように、窒素及びアルミニウムを除いた元素を、予め窒化アルミニウムにドーピングする。

[0064] 図17に示す第2の実施形態の変形例のように、単結晶Si5上にシリコン酸化膜9を介して圧電薄膜8が形成されていてもよい。この場合も、第1の実施形態の第1の変形例と同様の方法で、上記単結晶Si5を除く部分の音速の合成音速と単結晶Si5の音速を一致させることができる。なお、シリコン酸化膜9に代えて、シリコン窒化膜が形成されていてもよい。

[0065] 図17に示す第2の実施形態の変形例の圧電共振子の製造方法では、用意した単結晶Si5上にCVD法やスパッタリング法により導電膜を形成する。次に、エッチングなどにより上記導電膜のパターニングを行う。それによって、単結晶Si5上においてギャップを隔てて対向している第1の電極6a、6bを形成する。次に、スパッタリング法やCVD法などを用いてシリコン酸化膜9を成膜する。次に、エッチング法やCMP法などによりシリコン酸化膜9を除去し、第1の電極6a、6bを露出させる。しかる後に、第1の電極6a、6b上及びシリコン酸化膜9上に圧電薄膜8を形成する。

[0066] それによって、第1の電極6a、6bと単結晶Si5との段差をシリコン酸化膜9により埋めることができるため、圧電薄膜8に段差を生じ難くすることができる。よって、圧電薄膜8にクラックやボイドを生じ難くすることができる。従って、弾性損失を小さくすることができ、かつQ値及び電気機械結合係数を高めることができる。

[0067] 次に、具体的な実施例につき説明する。なお、本発明は以下の実施例に限定されるものではない。

[0068] (実施例1)

下記の条件で、上記第1の実施形態の第1の変形例に係る圧電共振子1とほぼ同様の構成を有する幅広がり振動子を作製した。

[0069] 単結晶Si層：抵抗率 $1\text{ m}\Omega\text{ cm}$ 、n型（濃度： $7\times 10^{19}/\text{cm}^3$ ）、厚み： $10\text{ }\mu\text{m}$

SiO₂層： 400 nm

シード層AlN（下部電極とSiO₂の間）： 20 nm

下部電極Mo： 100 nm

圧電ScAlNのSc濃度： $25\text{ at}\%$

上部電極Mo： 100 nm

[0070] （実施例2）

幅広がり振動子ではなく、面内屈曲振動子としたこと、SiO₂層を設けなかったこと、圧電ScAlNのSc濃度を $38\text{ at}\%$ としたこと以外は実施例1と同様の要領でサンプルを作製した。

[0071] （実施例3）

厚み 350 nm の高音速層AlNを上部電極の上に積層したことから、圧電ScAlNのSc濃度を $38\text{ at}\%$ としたこと以外は実施例1と同様の要領でサンプルを作製した。

[0072] （実施例4）

Bを $15\text{ at}\%$ の濃度でドーピングした厚み 250 nm のAlNを上部電極の上に積層したことから、圧電ScAlNのSc濃度を $38\text{ at}\%$ としたこと以外は実施例1と同様の要領でサンプルを作製した。

[0073] （実施例の評価）

作製したサンプルの周波数ばらつきは、インピーダンスアナライザを用いて、共振周波数により評価を行った。また、単結晶Siの厚みは、光学式厚み測定装置により測定した。

[0074] 以下に評価結果を示す。

[0075] （実施例1）

図13は、実施例1の幅広がり振動子のSiの厚みと共振周波数ばらつき

の関係を示す図である。共振周波数ばらつきは、S c ドーピング前が、 $\Delta f_r = 156 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ だったのに対し、 $\Delta f_r = 6 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ と大幅に改善されていた。また、高濃度にドーピングした n 型 S i を用いたため、温度による周波数変動も大幅に改善されていた。

[0076] (実施例 2)

図 14 は、実施例 2 の面内屈曲振動子の S i の厚みと共振周波数ばらつきの関係を示す図である。共振周波数ばらつきは、S c ドーピング前が、 $\Delta f_r = 317 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ だったのに対し、 $\Delta f_r = 6 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ と大幅に改善されていた。また、高濃度にドーピングした n 型 S i を用いたため、温度による周波数変動も大幅に改善されていた。

[0077] (実施例 3)

図 15 は、実施例 3 の幅広がり振動子の S i の厚みと共振周波数ばらつきの関係を示す図である。共振周波数ばらつきは、S c ドーピング前が、 $\Delta f_r = 156 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ だったのに対し、 $\Delta f_r = 0.2 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ と大幅に改善されていた。また、実施例 3 では、高濃度の S c をドーピングしているので、実施例 1 の比帯域が 0.78% であることと比較して、比帯域が 1.32% と広帯域化されていた。

[0078] (実施例 4)

図 16 は、実施例 4 の幅広がり振動子の S i の厚みと共振周波数ばらつきの関係を示す図である。共振周波数ばらつきは、S c ドーピング前が、 $\Delta f_r = 156 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ だったのに対し、 $\Delta f_r = 1 \text{ ppm} / \Delta S_i = 0.1 \mu\text{m}$ と大幅に改善されていた。実施例 4 では、B で A l N をドーピングしているので、実施例 3 と比較して、温度特性が良好であり、振動子の温度特性が改善された。

符号の説明

[0079] 1 … 圧電共振子

2 a、2 b … 支持部

3 … 振動板

4 a、4 b…連結部

5…単結晶S i

5 a…上面

6, 6 a, 6 b…第1の電極

7, 7 a, 7 b…第2の電極

8…圧電薄膜

9…シリコン酸化膜

10…窒化アルミニウム層

11…B含有窒化アルミニウム層

21…圧電共振子

22…支持部

23 a、23 b…振動腕

請求の範囲

- [請求項1] 単結晶 Si と、
前記単結晶 Si 上に設けられた窒化アルミニウムからなる圧電薄膜と、
前記圧電薄膜を挟むように設けられた第 1, 第 2 の電極とを備える圧電共振子であって、
前記窒化アルミニウムからなる圧電薄膜に、窒素及びアルミニウムを除いた元素がドーピングされており、
前記単結晶 Si を除く部分の音速の合成音速が、前記単結晶 Si の音速と実質的に一致されている、圧電共振子。
- [請求項2] 前記ドーピングが、前記単結晶 Si を除く部分の音速の合成音速と、前記単結晶 Si の音速とを実質的に一致させるようになされている、請求項 1 に記載の圧電共振子。
- [請求項3] 前記ドーピングが、スカンジウム、イットリウム、ルテチウム及びジスプロシウムからなる群から選択された少なくとも 1 種の元素によりなされている、請求項 1 又は 2 に記載の圧電共振子。
- [請求項4] 前記単結晶 Si が、n 型ドーパントによりドーピングされており、該 n 型ドーパントの濃度が $1 \times 10^9 / \text{cm}^3$ 以上である、請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の圧電共振子。
- [請求項5] 前記第 1, 第 2 の電極に接するように、シリコン酸化膜層が配置されている、請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の圧電共振子。
- [請求項6] 前記窒素及びアルミニウムを除いた元素がドーピングされている窒化アルミニウムからなる圧電薄膜よりも高音速な誘電体膜が、前記第 1, 第 2 の電極に接するように配置されている、請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載の圧電共振子。
- [請求項7] 前記高音速な誘電体膜が、ホウ素と炭素のうち少なくとも一方の元素がドーピングされた窒化アルミニウムからなる、請求項 6 に記載の圧電共振子。

- [請求項8] 振動モードが、幅広がり振動又は面内屈曲振動である、請求項 1 ～ 7 のいずれか 1 項に記載の圧電共振子。
- [請求項9] 請求項 1 ～ 8 に記載の圧電共振子の製造方法であって、
単結晶 S i を用意する工程と、
前記単結晶 S i 上に第 1 の電極を形成する工程と、
前記第 1 の電極上に窒化アルミニウムからなる圧電薄膜を形成する工程と、
前記圧電薄膜上に第 2 の電極を形成する工程とを備え、
前記圧電薄膜を形成する工程が、前記単結晶 S i を除く部分の音速の合成音速を、前記単結晶 S i の音速と実質的に一致させるように、窒素及びアルミニウムを除いた元素を、予め窒化アルミニウムにドーピングする工程を含む、圧電共振子の製造方法。