

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4756461号
(P4756461)

(45) 発行日 平成23年8月24日 (2011.8.24)

(24) 登録日 平成23年6月10日 (2011.6.10)

(51) Int.Cl.	F I	
HO3H 9/17 (2006.01)	HO3H 9/17	F
HO1L 41/09 (2006.01)	HO1L 41/08	C
HO1L 41/083 (2006.01)	HO1L 41/08	L
HO1L 41/18 (2006.01)	HO1L 41/08	S
HO1L 41/22 (2006.01)	HO1L 41/08	Q

請求項の数 11 (全 25 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2005-297192 (P2005-297192)	(73) 特許権者	000000206
(22) 出願日	平成17年10月12日 (2005.10.12)		宇部興産株式会社
(65) 公開番号	特開2007-110281 (P2007-110281A)		山口県宇部市大字小串1978番地の96
(43) 公開日	平成19年4月26日 (2007.4.26)	(74) 代理人	100130029
審査請求日	平成20年7月23日 (2008.7.23)		弁理士 永井 道雄
		(72) 発明者	山田 哲夫
			山口県宇部市大字小串1978番地の5
			宇部興産株式会社 宇部研究所内
		(72) 発明者	長尾 圭吾
			山口県宇部市大字小串1978番地の5
			宇部興産株式会社 宇部研究所内
		(72) 発明者	升井 英治
			山口県宇部市大字小串1978番地の5
			宇部興産株式会社 宇部研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化アルミニウム薄膜およびそれを用いた圧電薄膜共振子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

振動空間を有する半導体あるいは絶縁体からなる基板と、該基板の該振動空間に面する位置に、順に配置された下部電極、窒化アルミニウム薄膜および上部電極とを少なくとも有する圧電薄膜共振子において、

前記窒化アルミニウム薄膜は、(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅(FWHM)が2.0°以下であるc軸配向性結晶膜であり、

前記下部電極は、ルテニウムを主成分とする層を含む厚さ150nm~450nmの金属薄膜であり、

ルテニウムの(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅(FWHM)が3.0°以下であり、

前記下部電極が、ルテニウムを主成分とする厚さd2の金属薄膜と、モリブデンまたはタングステンを主成分とする厚さd1の金属薄膜との積層体であり、 $1.1 \leq d2/d1 \leq 1.5$ かつ $150 \text{ nm} < (d1 + d2) < 450 \text{ nm}$ であることを特徴とする圧電薄膜共振子。

【請求項2】

振動空間を有する半導体あるいは絶縁体からなる基板と、該基板の該振動空間に面する位置に、順に配置された下部電極、窒化アルミニウム薄膜および上部電極とを少なくとも有する圧電薄膜共振子において、

前記窒化アルミニウム薄膜は、(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅(

F W H M) が 2 . 0 ° 以下である c 軸配向性結晶膜であり、

前記上部電極は、ルテニウムを主成分とする層を含む厚さ 1 5 0 n m ~ 4 5 0 n m の金属薄膜であり、

ルテニウムの (0 0 0 2) 回折ピークのロッキング・カーブ半値幅 (F W H M) が 3 . 0 ° 以下であり、

前記上部電極が、ルテニウムを主成分とする厚さ d 4 の金属薄膜と、モリブデンまたはタングステンを主成分とする厚さ d 3 の金属薄膜との積層体であり、 $1 . 1 < d 4 / d 3 < 1 . 4$ かつ $1 5 0 n m < (d 3 + d 4) < 4 5 0 n m$ であることを特徴とする圧電薄膜共振子。

【請求項 3】

前記下部電極の厚さと前記上部電極の厚さとの比率 (上部電極の厚さ) / (下部電極の厚さ) が、0 . 6 より大きく 1 . 5 より小さい請求項 1 から 2 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 4】

前記圧電薄膜共振子は、更に、窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材料を主成分とする絶縁体層を有しており、前記絶縁体層が前記下部電極の下面に接して形成されている請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 5】

前記絶縁体層の厚さ d 5 が 2 5 ~ 3 0 0 n m である請求項 4 に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 6】

前記圧電薄膜共振子は、更に、窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材料を主成分とする絶縁体層を有しており、前記絶縁体層が前記上部電極の上面に接して形成されている請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 7】

前記絶縁体層の厚さ d 6 が 4 0 ~ 6 0 0 n m である請求項 6 に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 8】

インピーダンス曲線における反共振ピークの音響品質係数 (Q 値) が 1 0 0 0 以上である請求項 1 から 7 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 9】

電気機械結合係数 ($K t ^ 2$) が 5 . 4 7 % 以上である請求項 1 から 8 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 1 0】

挿入損失が 0 . 1 4 d B 以下である請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子。

【請求項 1 1】

請求項 1 から 1 0 のいずれか 1 項に記載の圧電薄膜共振子を有する圧電薄膜デバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、移動体通信機等に利用される薄膜共振器、薄膜 V C O (電圧制御発振器)、薄膜フィルタ、送受信切替器や各種センサーなど、広範な分野で用いられる圧電体薄膜とそれを応用した素子に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

圧電現象を応用した素子は広範な分野で用いられている。携帯機器の小型化と省力化が進む中で、R F 用および I F 用フィルタとして弾性表面波 (S u r f a c e A c o u s

10

20

30

40

50

t i c W a v e : S A W) 素子の使用が拡大している。S A W フィルタは設計および生産技術の向上によりユーザーの厳しい要求仕様に対応してきたが、利用周波数の高周波数化と共に特性向上の限界に近づき、電極形成の微細化と安定した出力確保の両面で大きな技術革新が必要となってきた。一方、圧電体薄膜の厚み振動を利用した薄膜バルク弾性波共振子 (T h i n F i l m B u l k A c o u s t i c R e s o n a t o r : 以下 F B A R)、積層型薄膜バルク弾性波共振器およびフィルタ (S t a c k e d T h i n F i l m B u l k W a v e A c o u s t i c R e s o n a t o r s a n d F i l t e r s : 以下 S B A R) は、基板に設けられた薄い支持膜の上に、主として圧電体より成る薄膜と、これを駆動する電極を形成したものであり、ギガヘルツ帯での基本共振が可能である。F B A R または S B A R でフィルタを構成すれば、著しく小型化でき、かつ低損失・広帯域動作が可能なる上に、半導体集積回路と一体化することができるので、将来の超小型携帯機器への応用が期待されている。

10

【 0 0 0 3 】

弾性波を利用した共振器、フィルタ等に応用される F B A R、S B A R などの圧電体薄膜素子は、以下のようにして製造される。シリコンなどの半導体単結晶、シリコンウエハ上に形成した多結晶ダイヤモンドなどの基板上に、種々の薄膜形成方法によって、誘電体薄膜、導電体薄膜、またはこれらを積層した下地膜を形成する。この下地膜上に圧電体薄膜を形成し、さらに必要に応じた上部構造を形成する。各層の形成後に、または全層を形成した後に、各々の膜に物理的処理または化学的処理を施すことにより、微細加工、パターンニングを行う。異方性エッチングにより基板から振動部の下に位置する部分を除去した浮き構造を作製した後、最後に1素子単位に分離することにより圧電体薄膜素子を得る。

20

【 0 0 0 4 】

例えば、特許文献1に記載された圧電薄膜素子は、基板上に下地膜、下部電極、圧電体薄膜、上部電極を形成した後に、基板裏面から振動部となる部分の下にある基板部分を除去して、ビアホールを形成することにより製造されている。圧電薄膜素子用の圧電材料としては、窒化アルミニウム (A l N)、酸化亜鉛 (Z n O)、硫化カドミウム (C d S)、チタン酸鉛 (P T (P b T i O ₃))、チタン酸ジルコン酸鉛 (P Z T (P b (Z r、T i) O ₃)) などが用いられている。特に A l N は、弾性波の伝播速度が速く、高周波帯域で動作する薄膜共振器、薄膜フィルタ用の圧電材料として適している。

30

【 0 0 0 5 】

特許文献2には、導電体薄膜として、チタン並びに白金、イリジウム、ルテニウムおよび酸化ルテニウムのなかの少なくとも1つを主成分とすることを特徴とする圧電薄膜素子が開示されている。しかしながら、得られる圧電薄膜素子の性能については全く記載されていない。

【 0 0 0 6 】

特許文献3には、上部電極または下部電極にルテニウムまたはルテニウム合金の層を含んだ圧電薄膜共振器が開示されている。しかしながら、高性能な圧電薄膜共振器を作製する上で必要となる、上部電極および下部電極への要求特性については明らかにされていない。

40

【 0 0 0 7 】

【特許文献1】特開昭60-142607号公報

【特許文献2】特開2000-244030号公報

【特許文献3】特開2005-073175号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 8 】

これまで、A l N 薄膜を F B A R または S B A R に適用するために、種々の検討が行われてきた。しかしながら、未だ、ギガヘルツ帯域で十分な性能を発揮する圧電薄膜共振器、圧電薄膜フィルタは得られておらず、A l N 薄膜の音響的品質係数 (Q 値)、周波数温

50

度係数および挿入損失の改善が望まれている。特に、インピーダンス特性における反共振ピークの音響的品質係数（Q値）の改善が切望されている。音響的品質係数（Q値）、広帯域動作、周波数温度特性の全てに優れ、高性能な共振特性を示す圧電薄膜素子は提案されていない。電気機械結合係数は共振器やフィルタを構成する上での性能を左右する重要なパラメーターであり、使用する圧電体薄膜の膜品質に大きく依存する。そこで、本発明は、弾性波の伝播速度が速いというA1N薄膜の特長を活かしつつ、電気機械結合係数が大きく、共振・反共振両方の音響的品質係数（Q値）、周波数温度特性に優れ、帯域幅、挿入損失などの特性面で従来に比べて著しく高性能な圧電薄膜共振子を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

10

【0009】

本発明者らは、FBARまたはSBARの共振特性に大きく影響を与える窒化アルミニウム薄膜の結晶性、配向性が、下部電極の材質や結晶性によってどのように影響を受けるか鋭意検討を行った。その結果、下部電極として、ルテニウムを主成分とする金属薄膜を使用し、この金属薄膜上に窒化アルミニウム薄膜を形成することにより、(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 2.0° 以下である高配向性、高結晶性のc軸配向窒化アルミニウム薄膜が得られることを突き止めた。さらに、該金属薄膜を特定の結晶相または結晶化度に調製することにより、ロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が $0.8 \sim 1.6^\circ$ の、さらに配向性、結晶性に優れたc軸配向窒化アルミニウム薄膜が得られることを見出した。そして、これらの高配向性、高結晶性のc軸配向窒化アルミニウム薄膜を使用することにより、低損失で、帯域幅、周波数温度特性に優れた高性能なFBARまたはSBARを実現できることを見出し、本発明に到達した。

20

【0010】

本発明によれば、上記の目的を達成するものとして、半導体または絶縁体上に形成されたルテニウムを主成分とする層を含む金属薄膜に接して形成されたc軸配向を示す窒化アルミニウム薄膜であって、前記ルテニウムを主成分とする金属薄膜は、ルテニウムの(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 3.0° 以下であり、前記窒化アルミニウム薄膜は、(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 2.0° 以下であることを特徴とする窒化アルミニウム薄膜、が提供される。

【0011】

30

本発明の一態様においては、前記半導体または絶縁体上に形成されたルテニウムを主成分とする層を含む金属薄膜の厚さが $150 \text{ nm} \sim 450 \text{ nm}$ であることを特徴とする前記窒化アルミニウム薄膜、が提供される。

【0012】

本発明の一態様においては、窒化アルミニウム薄膜の(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が $0.8 \sim 1.6^\circ$ であることを特徴とする前記窒化アルミニウム薄膜、が提供される。

【0013】

さらに、本発明によれば、振動空間を有する半導体あるいは絶縁体からなる基板と、該基板の該振動空間に面する位置に、順に配置された下部電極、窒化アルミニウム薄膜および上部電極とを少なくとも有する圧電薄膜共振子において、前記窒化アルミニウム薄膜は、(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 2.0° 以下であるc軸配向性結晶膜であり、前記下部電極および上部電極のうち少なくとも一方の電極は、ルテニウムを主成分とする層を含む厚さ $150 \text{ nm} \sim 450 \text{ nm}$ の金属薄膜であり、ルテニウムの(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 3.0° 以下であることを特徴とする圧電薄膜共振子、が提供される。

40

【0014】

本発明の一態様においては、前記下部電極がルテニウムを主成分とする厚さ d_2 の金属薄膜とモリブデンまたはタングステンを主成分とする厚さ d_1 の金属薄膜との積層体であり、 $d_2 / d_1 > 1$ かつ $150 \text{ nm} < (d_1 + d_2) < 450 \text{ nm}$ であることを特徴とす

50

る前記圧電薄膜共振子、が提供される。ここで、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜が密着層を有している場合には、厚さ d_1 は密着層の厚さを含んだ値である。

【0015】

本発明の一態様においては、前記上部電極がルテニウムを主成分とする厚さ d_4 の金属薄膜とモリブデンまたはタングステンを主成分とする厚さ d_3 の金属薄膜との積層体であり、 $d_4 / d_3 > 1$ かつ $150 \text{ nm} < (d_3 + d_4) < 450 \text{ nm}$ であることを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

【0016】

本発明の一態様においては、RMSで表わされる前記下部電極上面の表面粗さを R_B [nm] と標記した場合に、前記下部電極端部における金属薄膜と前記窒化アルミニウム薄膜とが接する面の前記基板に対する傾斜角が $5 / R_B^\circ$ 以上かつ $30 / R_B^\circ$ 以下であることを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

10

【0017】

本発明の一態様においては、前記下部電極の厚さと前記上部電極の厚さとの比率（上部電極の厚さ）／（下部電極の厚さ）が、0.6より大きく1.5より小さいことを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

【0018】

本発明の一態様においては、圧電薄膜共振子の振動部位に窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材料を主成分とする絶縁体層を有することを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

20

【0019】

本発明の一態様においては、前記絶縁体層が前記下部電極の下面に接して形成されていることを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

【0020】

本発明の一態様においては、前記絶縁体層が前記上部電極の上面に接して形成されていることを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

【0021】

本発明の一態様においては、前記下部電極の下面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_5 が $25 \sim 300 \text{ nm}$ であることを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

30

【0022】

本発明の一態様においては、前記上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 が $40 \sim 600 \text{ nm}$ であることを特徴とする前記圧電薄膜共振子、が提供される。

【0023】

本発明の一態様においては、振動空間を有する半導体あるいは絶縁体からなる基板と、該基板の該振動空間に面する位置に、順に配置された下部電極、第1の窒化アルミニウム薄膜、内部電極、第2の窒化アルミニウム薄膜、および上部電極とを有する積層型圧電薄膜共振子において、前記第1および第2の窒化アルミニウム薄膜は、(0002)回折ピークのロックン・カーブ半値幅(FWHM)が 2.0° 以下であるc軸配向性結晶膜あり、下部電極、内部電極および上部電極のうち少なくとも一つの金属電極がルテニウムを主成分とする厚さ $150 \text{ nm} \sim 450 \text{ nm}$ の金属薄膜であることを特徴とする積層型圧電薄膜共振子、が提供される。

40

【0024】

本発明の一態様においては、積層型圧電薄膜共振子の振動部位に窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材料を主成分とする絶縁体層を有することを特徴とする前記積層型圧電薄膜共振子、が提供される。

【0025】

50

本発明の一態様においては、前記絶縁体層が前記下部電極の下面に接して形成されていることを特徴とする前記積層型圧電薄膜共振子、が提供される。また、本発明の一態様においては、前記絶縁体層が前記上部電極の上面に接して形成されていることを特徴とする前記積層型圧電薄膜共振子、が提供される。

【0026】

本発明の一態様においては、前記下部電極の下面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_5 が $25 \sim 300 \text{ nm}$ であることを特徴とする前記積層型圧電薄膜共振子、が提供される。また、前記上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 が $40 \sim 600 \text{ nm}$ であることを特徴とする前記積層型圧電薄膜共振子が提供される。さらに、圧電薄膜共振子を構成する上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 と下部電極の下面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_5 との比率、 d_6 / d_5 は、

$$1 < d_6 / d_5 < 4$$

であることが好ましい。

【0027】

さらに本発明は、インピーダンス曲線における反共振ピークの音響品質係数（Q値）が1000以上であることを特徴とする前記圧電薄膜共振子および前記積層型圧電薄膜共振子に関する。

【0028】

さらに、本発明は、前記圧電薄膜共振子を有する圧電薄膜デバイスに関する。前記圧電薄膜共振子は、積層型圧電薄膜共振子も含む。圧電薄膜デバイスとしては、以上のような圧電薄膜共振子や積層型圧電薄膜共振子を用いて構成されるVCO（電圧制御発振器）、フィルタおよび送受切替器などが挙げられるがこれに限定されるものではない。このような圧電薄膜デバイスでは、1GHz以上の高い周波数での特性を著しく向上させることができる。

【発明の効果】

【0029】

ルテニウムを主成分とする金属薄膜を用いて下部電極を構成し、下部電極の結晶配向性、下部電極の厚さ、あるいは、絶縁体層も含めた構成を特定のものにすることにより、その上に形成したc軸配向窒化アルミニウム薄膜の配向性、結晶性が著しく向上し、(0002)回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 2.0° 以下である高配向性、高結晶性のc軸配向窒化アルミニウム薄膜を形成できる。さらに、下部電極パターン端面の傾斜角を所定の範囲にすることにより、良好な圧電体薄膜を形成できる。その結果、従来の電極構成で問題となっていたインピーダンス特性における反共振ピークの音響品質係数（Q値）を改善でき、電気機械結合係数 k_t^2 と音響品質係数（Q値）が優れた圧電薄膜共振子が提供できる。したがって、それを用いて構成されるVCO（電圧制御発振器）、フィルタおよび送受切替器において1GHz以上の高い周波数での特性を著しく向上させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0030】

以下に、本発明の実施の形態について詳細に説明する。図1は本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図であり、図2はそのX-X断面図である。これらの図において、圧電薄膜共振子10は基板11、該基板11の上面上に形成された絶縁体層13および該絶縁体層13の上面上に形成された圧電積層構造体14を有する。圧電積層構造体14は絶縁体層13の上面上に形成された下部電極15、該下部電極15の一部を覆うようにして絶縁体層13の上面上に形成された圧電体膜16および該圧電体膜16の上面上に形成された上部電極17からなる。基板11には、空隙を形成するビアホール20が形成されている。絶縁体層13の一部はビアホール20に向けて露出している。この絶縁体層13の露出部分、およびこれに対応する圧電積層構造体14の部分が振動部（振動ダイヤフラム）21を構成する。また、下部電極15および上部電極17は、振動部21に対応する領域内に形成された主体部15a、17aと、該主体部15a、17aと外部

10

20

30

40

50

回路との接続のための端子部 15b、17bを有する。端子部 15b、17bは振動部 21に対応する領域外に位置する。

【0031】

基板 11としては、Si(100)単結晶などの単結晶、またはSi単結晶などの基材の表面にシリコン、ダイヤモンドその他の多結晶膜を形成したものをを用いることができる。基板 11としては、その他の半導体さらには絶縁体を用いることも可能である。基板 11のビアホール 20の形成方法としては、基板下面側からの深掘りエッチング(Deep RIE)法が例示される。なお、基板 11に形成される空隙は、ビアホール 20によるものには限定されず、振動部 21の振動を許容するものであればよく、該振動部 21に対応する基板上面領域に形成した凹部であってもよい。

10

【0032】

絶縁体層 13としては、例えば窒化シリコン(SiNx)を主成分とする誘電体膜、窒化アルミニウムを主成分とする誘電体膜、酸化アルミニウムを主成分とする誘電体膜、ムライトを主成分とする誘電体膜、フォルステライトを主成分とする誘電体膜、酸化ジルコニウムを主成分とする誘電体膜、酸化ハフニウムを主成分とする誘電体膜、酸化ニオブを主成分とする誘電体膜、酸化タンタルを主成分とする誘電体膜、およびこれらの誘電体膜を重ね合わせた積層膜を用いることができる。この絶縁体層 13の材質について、主成分とは、誘電体膜中の含有量が50当量%以上である成分を指す。誘電体膜は単相からなるものであっても良いし、積層体であっても良い。さらに、密着性を高めるための層などを付加した複数層からなるものであってもよい。絶縁体層 13の厚さd5は、25~300nm、好ましくは、30~200nmである。前記の絶縁体層 13の厚さが25nm未満になると、その上に堆積するルテニウム、モリブデン、タングステンなどを主成分とする金属層の結晶配向性が悪化し、対応するX線回折ピークのロッキング・カーブ半値幅が広がるので好ましくない。絶縁体層 13の厚さが300nmを超えると、得られる圧電薄膜共振子の電気機械結合係数が低下し、特性が悪化するので好ましくない。

20

【0033】

シリコンからなる基板 11の表面に絶縁体層 13を形成する方法としては、スパッタリング法、真空蒸着法、CVD法などが例示される。また、本発明においては、エッチングにより、振動部 21に対応する領域の絶縁体層 13を総て除去して、下部電極 15がビアホール 20に向けて露出した構造の圧電薄膜共振子も採用することができる。このように、振動部 21に対応する領域の絶縁体層 13を総て除去することにより、共振周波数の温度特性は若干悪化するものの、電気機械結合係数が向上するという利点がある。

30

【0034】

下部電極 15は、ルテニウムを主成分とする金属薄膜、モリブデンを主成分とする金属薄膜、タングステンを主成分とする金属薄膜、及び必要に応じて該金属薄膜と絶縁体層 13との間に形成される密着金属層を積層することにより構成され、その厚さは、150~450nmが好ましい。また、本発明においては、下部電極 15として、ルテニウムを主成分とする厚さd2の金属薄膜とモリブデンまたはタングステンを主成分とする厚さd1の金属薄膜との積層体を用いることができる。ここで、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜が密着層を有している場合には、厚さd1は密着層の厚さを含んだ値である。ルテニウムを主成分とする金属薄膜の厚さd2とモリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜の厚さd1との関係として、 $d2/d1 > 1$ かつ $150\text{nm} < (d1 + d2) < 450\text{nm}$ となるような膜厚構成を採用することで、得られる圧電薄膜共振子の音響品質係数(Q値)を向上させることができる。特に、インピーダンス特性における反共振ピークの音響品質係数(Q値)が改善され、複数の圧電薄膜共振子を組合わせて作製される圧電薄膜フィルタの通過帯域の高域側におけるロール・オフ特性が向上する。

40

【0035】

圧電体膜 16は窒化アルミニウム(AlN)から成り、その厚さは、例えば0.5~3.0μmである。1GHz程度の周波数で使用する場合には膜厚を厚くし、5GHz付近

50

の高周波数で使用する場合には膜厚を薄くする。

【 0 0 3 6 】

上部電極は、下部電極と同様に、ルテニウムを主成分とする金属薄膜の他に、モリブデンを主成分とする金属、タングステンを主成分とする金属、イリジウムを主成分とする金属、アルミニウムを主成分とする金属、白金を主成分とする金属、タンタルを主成分とする金属などの材質から選別された金属薄膜、及びルテニウムを主成分とする金属薄膜とモリブデンを主成分とする金属、タングステンを主成分とする金属、イリジウムを主成分とする金属、アルミニウムを主成分とする金属、白金を主成分とする金属などの材質から選別された金属薄膜との積層体を用いることができる。また、必要に応じて該金属薄膜と圧電体膜 1 6 の間に形成される密着金属層を積層することにより構成される。特に、ルテニウムを主成分とする金属薄膜とモリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜との積層体を用いることで、得られる圧電薄膜共振子の音響品質係数 (Q 値) が向上する。上部電極の厚さは、例えば 1 5 0 ~ 4 5 0 nm である。ここで、ルテニウムを主成分とする金属薄膜とは、90%以上のルテニウムを含有していることを意味する。モリブデンを主成分とする金属、タングステンを主成分とする金属、イリジウムを主成分とする金属、アルミニウムを主成分とする金属、白金を主成分とする金属などについても同様である。ルテニウムを主成分とする金属薄膜の厚さ d_4 とモリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜の厚さ d_3 との関係として、 $d_4 / d_3 > 1$ かつ $150 \text{ nm} < (d_3 + d_4) < 450 \text{ nm}$ となるような膜厚構成を採用することで、得られる圧電薄膜共振子の音響品質係数 (Q 値) を向上させることができる。特に、インピーダンス特性における反共振ピークの音響品質係数 (Q 値) が改善され、複数の圧電薄膜共振子を組合わせて作製される圧電薄膜フィルタの通過帯域の高域側におけるロール・オフ特性が向上する。ここで、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜が密着層を有している場合には、厚さ d_4 は密着層の厚さを含んだ値である。

【 0 0 3 7 】

一般に圧電材料の圧電特性は、結晶性や配向性などの結晶性状に強く依存する。本発明で用いる圧電薄膜においても、その圧電性は薄膜を構成する結晶の粒子サイズ、配向性、結晶性などの結晶性状に依存すると考えられる。本明細書において単一配向膜とは、基板表面と平行に目的とする結晶面が揃っている結晶化膜のことを意味する。例えば、(0 0 0 1) 単一配向膜は、膜面と平行に (0 0 0 1) 面が成長している膜を意味する。具体的には、ディフラクトメーター法による X 線回折測定を行った場合に、AlN 結晶に起因した目的とする回折面以外の反射ピークがほとんど検出できないものを意味する。例えば、(0 0 0 L) 単一配向膜、即ち、c 面単一配向膜は、- 2 回転の X 線回折測定で (0 0 0 L) 面以外の反射強度が (0 0 0 L) 面反射の最大ピーク強度の 5 % 未満、好ましくは 2 % 未満、さらに好ましくは検出限界以下のものである。なお、(0 0 0 L) 面は、(0 0 0 1) 系列の面、即ち、(0 0 0 1) 面、(0 0 0 2) 面、(0 0 0 4) 面などの等価な面を総称する表示である。

【 0 0 3 8 】

本発明者らは、図 1、2 に示す構成の圧電薄膜共振子において、その共振特性が、下部電極の材質や結晶性と AlN 薄膜の配向性、結晶性などの性状との両方にどのように依存するかについて検討した。図示する圧電薄膜共振子は、ビアホール 2 0 が形成された基板 1 1 を有し、該基板上に窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォスファイト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材料を主成分とする絶縁体層 1 3、必要に応じてルテニウムを主成分とする金属薄膜と絶縁体層 1 3 との間に形成される密着金属層、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜、およびルテニウムを主成分とした金属薄膜から構成される下部電極 1 5、AlN 薄膜 1 6、必要に応じて AlN 薄膜 1 6 とモリブデンまたはタングステンを主成分とする金属層との間に形成される密着金属薄膜、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜およびルテニウムを主成分とする金属薄膜から構成された上部電極 1 7 をこの順に積層したものである。さらに、必要に

応じて、上部電極 17 の上に窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材料を主成分とする絶縁体層 23 を積層する。

【0039】

下部電極の下面に接して形成される絶縁体層 13 の厚さ d_5 は、25 ~ 300 nm、好ましくは、30 ~ 200 nm であることが望ましい。前記の絶縁体層 13 の厚さが 25 nm 未満になると、その上に堆積するルテニウム、モリブデン、タングステンなどを主成分とする金属薄膜の結晶配向性が悪化し、対応する X 線回折ピークのロッキング・カーブ半値幅が広がるので好ましくない。下部電極となる金属薄膜のロッキング・カーブ半値幅の広がり、その上面に堆積する AlN 薄膜の結晶配向性の低下をもたらす。絶縁体層 13 の厚さが 300 nm を超えると、得られる圧電薄膜共振子の電気機械結合係数が低下し、圧電特性が悪化するので好ましくない。

10

【0040】

また、上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 は、40 ~ 600 nm であることが好ましい。さらに、下部電極の下面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_5 と上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 との比率、 d_6 / d_5 が、 $1 < d_6 / d_5 < 4$ という関係を満足するように、厚さ d_5 および厚さ d_6 を制御することが好ましい。

【0041】

上部電極の上面に接した絶縁体層を形成することにより、得られる圧電薄膜共振子の共振ピーク付近におけるスプリアスが減少する。特に、 d_6 / d_5 が、 $1 < d_6 / d_5 < 4$ という関係を満足する場合に、スプリアスの低減効果が大きい。上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 が 40 nm 未満になると、スプリアス抑制効果が著しく低下するので好ましくない。逆に、上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の厚さ d_6 が 600 nm を超えると、得られる圧電薄膜共振子の電気機械結合係数、音響品質係数 (Q 値) などの圧電特性が悪化するので好ましくない。また、上部電極の上面に接して形成された絶縁体層は化学的に安定な材質で構成されており、得られる圧電薄膜共振子の耐環境性が向上するという効果もある。以上のようなスプリアス低減効果および耐環境性改善効果を高めるには、上部電極の上面に接して形成される絶縁体層の結晶配向性を向上させることが重要である。本発明においては、上部電極を構成するルテニウムなどの金属薄膜のロッキング・カーブ半値幅を 3° 以下となるように制御することにより、高配向性の上部絶縁体層を形成して、良好なスプリアス低減効果と優れた耐環境性を実現することができる。

20

30

【0042】

ビアホール 20 は、図中の下面側から Si を深掘りエッチング (Deep RIE (Reactive Ion Etching)) することにより形成したものであり、このビアホール 20 の上に積層された薄膜がダイヤフラムを構成している。この圧電薄膜共振子において、ビアホール 20 上の AlN 薄膜 16 と、これを挟む下部電極 15 および上部電極 17 とが、圧電積層構造体 14 を構成し、前記のように、圧電積層構造体 14 の少なくとも一方には、窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルから選ばれる少なくとも一種の材質を主成分とする絶縁体層が存在している。

40

【0043】

下部電極 15 および上部電極 17 を形成する方法としては、スパッタリング法、真空蒸着法などが例示される。

【0044】

下部電極 15 は、必要に応じて堆積される密着金属層、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜、ルテニウムを主成分とした金属薄膜をこの順に形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いて、これらの金属薄膜層を所定の形状にパターンニングする。

50

本発明においては、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜とルテニウムを主成分とする金属薄膜との位置関係を入れ替えて、ルテニウムを主成分とする金属薄膜を下層側に配置することも可能である。AlN薄膜16は、下部電極15を形成した基板11の上面に反応性スパッタリング法により膜形成できる。上部電極17として、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜、ルテニウムを主成分とした金属薄膜をこの順に形成した後、下部電極15と同様にフォトリソグラフィ技術を用いて、これらの金属薄膜層を所定の形状（例えば、円形に近い形状）にパターンニングする。上部電極についても、モリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜とルテニウムを主成分とする金属薄膜との位置関係を入れ替えて、ルテニウムを主成分とする金属薄膜を下層側に配置することが可能である。上部電極のパターンニング後に、フォトリソグラフィ技術を用いて、AlN薄膜16のピアホール20上の部分を除く領域の一部分をエッチング除去することにより、AlN薄膜16を所定の形状にパターンニングする。

10

【0045】

本発明者らは、下部電極15の材質としてルテニウムを主成分とする金属薄膜とモリブデンまたはタングステンを主成分とする金属薄膜との積層体を使用し、この金属薄膜積層体上に窒化アルミニウム薄膜を形成することにより、(0002)回折ピークのロックンク・カーブ半値幅(FWHM)が 2.0° 以下である高配向性、高結晶性のc軸配向窒化アルミニウム薄膜が得られることを見出した。さらに、この金属薄膜を特定の結晶相または結晶化度に調製することにより、ロックンク・カーブ半値幅(FWHM)が $0.8 \sim 1.6^\circ$ のさらに配向性、結晶性に優れたc軸配向窒化アルミニウム薄膜が得られることを見出した。

20

【0046】

即ち、本発明の窒化アルミニウム薄膜は、半導体または絶縁体上に形成されたルテニウムを主成分とする金属薄膜を含む厚さ150nm~450nmの金属薄膜に接して形成されたc軸配向を示す窒化アルミニウム薄膜であって、(0002)回折ピークのロックンク・カーブ半値幅(FWHM)が 2.0° 以下であることを特徴とする。このような窒化アルミニウム薄膜は圧電特性に優れており、これを使用した圧電薄膜共振子は、低損失の優れた周波数特性を有する。さらに、ルテニウムを主成分とする金属薄膜は、ルテニウムの(0002)回折ピークのロックンク・カーブ半値幅(FWHM)が 3.0° 以下であることが好ましい。これによりさらにc軸配向に優れた窒化アルミニウム薄膜を形成することができる。

30

【0047】

また、本発明の圧電薄膜共振子は、上記のような共振子であり、振動空間を有する半導体あるいは絶縁体からなる基板と、該基板の該振動空間に面する位置に、順に配置された下部電極、窒化アルミニウム薄膜および上部電極とを少なくとも有する圧電薄膜共振子において、前記窒化アルミニウム薄膜は、(0002)回折ピークのロックンク・カーブ半値幅(FWHM)が 2.0° 以下であるc軸配向性結晶膜であり、前記下部電極および上部電極のうち少なくとも一方の電極は、ルテニウムを主成分とする金属薄膜を含む厚さ150nm~450nmの金属薄膜であることを特徴とする。

40

【0048】

下部電極15に使用されるルテニウムを主成分とする金属薄膜、モリブデンを主成分とする金属薄膜、タングステンを主成分とする金属薄膜は、スパッタリング法や真空蒸着法で形成される。これらの金属を主成分とした薄膜は、通常はDCマグネトロンスパッタ法やRFマグネトロンスパッタ法により容易に形成できるが、真空蒸着法を用いる場合は融点が高いため(ルテニウム2310、モリブデン2620、タングステン3410)、抵抗加熱蒸着法では作製が困難で、電子ビーム蒸着法を用いることが必要である。結晶相としては、ルテニウムは六方晶系、モリブデンおよびタングステンは立方晶系であることが知られている。これらの金属結晶相の薄膜を形成した場合、ルテニウムの(0002)面やモリブデンおよびタングステンの(110)面が基板面と平行に成長しやすい。しかしながら、従来技術では、X線回折ピークのロックンク・カーブ半値幅(FWHM)

50

が 3.0° 以下というような高配向性の金属結晶膜を堆積させることは困難であった。本発明においては、下地層となる絶縁膜の厚さと微細構造（結晶配向性、表面粗さ）を制御すると共に、超高真空のスputtering装置（到達真空度： 10^{-6} Pa以下、好ましくは 4×10^{-7} Pa以下）を使用し、成膜圧力、成膜温度、DC出力またはRF出力などの成膜条件を最適化することにより、前記のような高配向性の金属結晶膜を堆積させることが可能となる。この他に、金属薄膜の結晶配向性の制御には、ルテニウムを主成分とする金属層と絶縁体層との間に介在させる密着層の材質を変えることも有効である。密着層の材質としては、チタン、クロム、ニッケルなどが一般的に利用される。さらには、成膜前の熱処理やソフトエッチングなどの前処理を施すことによりその結晶配向性を向上させることも可能である。

10

【0049】

下部電極および上部電極の抵抗は、共振特性の損失に影響する。このため、本発明においては、入力信号の損失の要因となる下部電極および上部電極の比抵抗を十分に小さな値となるように金属薄膜の形成条件を制御する。例えば、電極の比抵抗を $5 \sim 20 \mu \cdot \text{cm}$ となるように制御した。比抵抗がこの範囲の値となるようにすることで、入力される高周波信号の損失を低減し、良好な共振特性を実現することができる。

【0050】

本発明において、下部電極の材質、厚さ、電気伝導度、音響インピーダンス及び結晶配向性に着目し、該金属薄膜上に形成した窒化アルミニウム薄膜の結晶配向性と、圧電薄膜共振子を構成した場合の電気機械結合係数 k_t^2 、音響品質係数（Q値）、特にインピーダンス特性における半共振ピークの音響品質係数（Q値）との関係を詳細に検討した。すなわち、下部電極としてルテニウムを主成分とする層を含む厚さ $150 \text{ nm} \sim 450 \text{ nm}$ の金属薄膜を使用することにより、該金属薄膜上に形成されたc軸配向の窒化アルミニウム薄膜のX線回折により測定した（0002）回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）は 2.0° 以下が得られ、これにより電気機械結合係数 k_t^2 と音響品質係数（Q値）が大きく、高性能の圧電薄膜共振子が作製できる。

20

【0051】

さらに、ルテニウムを主成分とする金属薄膜のX線回折測定において、ルテニウムの（0002）回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）を 3.0° 以下に制御することにより、該金属膜上に形成されたc軸配向の窒化アルミニウム薄膜のX線回折により測定した（0002）回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）は 2.0° 以下が得られ、これにより電気機械結合係数 k_t^2 と音響品質係数（Q値）がさらに大きく、高性能の圧電薄膜共振子が作製できる。さらに好ましくは、上記ルテニウムの（0002）回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）を 2.0° 以下に制御することにより、該金属膜上に形成されたc軸配向の窒化アルミニウム薄膜のX線回折により測定した（0002）回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）は $0.8 \sim 1.6^\circ$ 、さらに電気機械結合係数 k_t^2 と音響品質係数（Q値）が大きく、高性能の圧電薄膜共振子を作製できる。

30

【0052】

本発明では、RMSで表わされる下部電極上面の表面粗さを R_B [nm]と表記し、下部電極のパターニング時において、下部電極端部における金属薄膜と窒化アルミニウム薄膜とが接する面の基板に対する傾斜角が $5/R_B^\circ$ 以上かつ $30/R_B^\circ$ 以下となるように、下部電極端部の形状を制御する。表面粗さを R_B は通常 $1 \sim 4 \text{ nm}$ である。下部電極端部の傾斜角が $30/R_B^\circ$ を超えて急峻になると、図7に示したように下部電極端のエッジ部でAlNの異常成長が起こり、隣り合う柱状のAlN粒子間に深いクレータ状の欠陥を生ずる。このクレータはAlN膜の破壊の原因となり、圧電薄膜共振子としての信頼性を損なうこととなる。このため、図8に示したように、下部電極端部における金属薄膜と窒化アルミニウム薄膜とが接する面の基板に対する傾斜角を $30/R_B^\circ$ 以下に制御して、クレータ状分離成長を防止する必要がある。逆に、下部電極端部の傾斜角が $5/R_B^\circ$ 未満の緩やかなものになると、傾斜部の水平距離が長くなり過ぎて、圧電薄膜共振子の音

40

50

響品質係数（Q値）が著しく低下する。また、インピーダンス特性における共振ピーク付近に数多くのノイズが発生するようになるので、好ましくない。

【0053】

図1、2に示す構成の圧電薄膜共振子では、圧電体膜の上下の電極に電界を印加することでバルク弾性波を励振させている。この為、下部電極を端子電極とすべく、下部電極を露出させることが必要である。この構成は共振器としてしか利用できず、フィルタにするには、2個以上の共振子を組み合わせる必要がある。このため、金属薄膜の電気抵抗が大きい場合には、配線に起因する損失が多くなるという欠点がある。このため、本発明においては、入力信号の損失の要因となる下部電極および上部電極の比抵抗を十分に小さな値となるように金属薄膜の形成条件を制御する。例えば、電極の比抵抗を $5 \sim 20 \mu \cdot \text{cm}$ となるように制御することで、入力される高周波信号の損失を低減し、良好なフィルタ性能を実現することができる。

10

【0054】

図3は本発明による圧電薄膜共振子の別の実施形態を示す模式的平面図であり、図4はそのX-X断面図である。これらの図においては、上記図1および図2におけると同様の機能を有する部材には同一の符号が付されている。

【0055】

本実施形態では、圧電薄膜共振子10は基板11、該基板11の上面上に形成された絶縁体層12、13および該絶縁体層12の一部を除去して形成した振動空間20を跨ぐよう形成された圧電積層構造体14を有する。圧電積層構造体14は絶縁体層13の上面上に形成された下部電極15、該下部電極15の一部を覆うようにして絶縁体層13の上面上に形成された圧電体膜16および該圧電体膜16の上面上に形成された上部電極17からなる。下部電極15は矩形に近い形状をなしており、主体部15a（図示せず）と該主体部15aと外部回路との接続のための端子部15b（図示せず）を有する。

20

【0056】

上部電極17は、振動空間20に対応する領域内に形成された主体部17a（図示せず）と、該主体部17aと外部回路との接続のための端子部17b（図示せず）を有する。端子部15b、17bは振動空間20に対応する領域外に位置する。下部電極15と上部電極17の少なくとも一方はルテニウムを主成分とする層を含む厚さ $150 \text{ nm} \sim 450 \text{ nm}$ の金属薄膜で形成されている。例えば、下部電極15は、ルテニウムを主成分とする金属薄膜で構成され、その厚さは $150 \sim 450 \text{ nm}$ である。上部電極17は、モリブデンを主成分とする厚さ $d3$ の金属薄膜とルテニウムを主成分とする厚さ $d4$ の金属薄膜との積層体であり、それぞれの金属薄膜の厚さ $d3$ 、 $d4$ は、 $d4 / d3 > 1$ かつ $150 \text{ nm} < (d3 + d4) < 450 \text{ nm}$ という関係を満足している。また、窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材質を主成分とする絶縁体層13が下部電極の下面に接して形成され、同様に、必要に応じて、窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、窒化シリコン、ムライト、フォルステライト、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、酸化ニオブおよび酸化タンタルからなる群から選ばれる少なくとも一種の材質を主成分とする絶縁体層23が上部電極の上面に接して形成されている。

30

40

【0057】

本発明の圧電薄膜共振子の構成を利用して、本発明の圧電薄膜共振子を有する積層型圧電薄膜共振子を作製することができる。即ち、本発明の積層型圧電薄膜共振子は、振動空間を有する半導体あるいは絶縁体からなる基板と、該基板の該振動空間に面する位置に、順に配置された下部電極、第1の窒化アルミニウム薄膜、内部電極、第2の窒化アルミニウム薄膜、および上部電極とを有する積層型圧電薄膜共振子において、前記第1および第2の窒化アルミニウム薄膜は、 (0002) 回折ピークのロッキング・カーブ半値幅（FWHM）が 2.0° 以下であるc軸配向性結晶膜あり、下部電極、内部電極および上部電極のうち少なくとも一つの金属電極がルテニウムを主成分とする厚さ $150 \text{ nm} \sim 450$

50

nmの金属薄膜であることを特徴とする。

【0058】

図5は本発明による圧電薄膜共振子のさらに別の実施形態を示す模式的平面図であり、図6はそのX-X断面図である。これらの図においては、上記図1～図4における同様の機能を有する部材には同一の符号が付されている。

【0059】

本実施形態は、図1および図2に記載の実施形態の圧電積層構造体を2つ積層したものに相当する圧電積層構造体を有するSBARである。即ち、絶縁体層13上に下部電極15、第1の圧電体膜16-1、内部電極17'、第2の圧電体膜16-2および上部電極18がこの順に形成されている。内部電極17'は、第1の圧電体膜16-1に対する上部電極としての機能と第2の圧電体膜16-2に対する下部電極としての機能を有する。即ち、本発明の積層型圧電薄膜共振子(SBAR)は、本発明の下部電極、圧電体層、および上部電極の構成を含む構造を有しているとともに、本発明の圧電薄膜共振子の一実施形態である。

【0060】

本実施形態では、下部電極15と内部電極17'との間に入力電圧を印加し、該内部電極17'と上部電極18との間の電圧を出力電圧として取り出すことができるので、これ自体を多極型フィルタとして使用することができる。このような構成の多極型フィルタを通過帯域フィルタの構成要素として使用することにより、阻止帯域の減衰特性が良好となり、フィルタとしての周波数応答性が向上する。

【0061】

以上のような圧電薄膜共振子において、マイクロ波プローバを使用して測定したインピーダンス特性における共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a と電気機械結合係数 k_t^2 との間には、以下の関係がある。

$$k_t^2 = \frac{r}{T \tan(\theta)}$$

$$r = \left(\frac{Z}{2} \right) \left(\frac{f_r}{f_a} \right)$$

簡単のため、電気機械結合係数 k_t^2 は、次式から算出した。

$$k_t^2 = 4.8 \left(\frac{f_a - f_r}{f_a + f_r} \right)$$

図1、2、図3、4および図5、6に示した構成の圧電薄膜共振子または積層型圧電薄膜共振子において、1.5～2.5GHzの範囲における共振周波数と反共振周波数の測定値から求めた電気機械結合係数 k_t^2 は5.4～6.9%である。電気機械結合係数 k_t^2 が5.4%未満になると、これらの圧電薄膜共振子を組み合わせることで作製した圧電薄膜フィルタの帯域幅が小さくなり、高周波域で使用する圧電薄膜デバイスとして実用に供することが難しくなる傾向にある。

【0062】

本発明によれば、本発明の圧電薄膜共振子およびその一形態である、積層型圧電薄膜共振子を使用して、VCO(電圧制御発振器)、フィルタおよび送受切替器などの圧電薄膜共振子を有する優れた圧電薄膜デバイスを提供することができる。本発明の圧電薄膜デバイスは、圧電薄膜共振子およびその一形態である積層型圧電薄膜共振子を有していれば特に上記のデバイスに限定されない。

【実施例】

【0063】

以下に実施例および比較例を示し、本発明をさらに詳細に説明する。

【0064】

(実施例1)

本実施例では、以下のようにして、図1、2に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。

【0065】

即ち、熱酸化法により、厚さ300 μ mの(100)Si基板の両面に厚さ1000nmのSiO₂層を形成した後、第二面(下面)側にピアホール20の形状に対応したマス

10

20

30

40

50

クパターンを形成し、パターンに対応した SiO_2 層をエッチングして、除去した。同時に、第一面（上面）側の SiO_2 層を総てエッチングして、除去した。次に、反応性スパッタリング法により、第一面側に厚さ 220nm の Al_2O_3 薄膜を形成した。この Si 基板の第一表面に、DCマグネトロンスパッタ法にて、厚さ 90nm の Mo 薄膜、厚さ 100nm の Ru 薄膜を順番に堆積して下部電極層を形成し、さらに、フォトリソグラフィによりパターン化した。パターン形成に際しては、意図的にデフォーカスさせた紫外光でレジストを露光、現像して、レジストの形状をなだらかな蒲鋒型形状にした。レジスト端面になだらかな傾斜を持たすことで、電極パターン端面の傾斜角を制御することに注力した。X線回折装置により下部電極の結晶配向性を評価した結果、表1に示すごとく $\text{Mo}(110)$ 面のロックンク・カーブFWHMは 2.0deg 、 $\text{Ru}(0002)$ 面のロックンク・カーブFWHMは 2.0deg であった。この Ru/Mo 積層下部電極上に、純度 99.999% の Al ターゲットを用い、反応性RFマグネトロンスパッタ法により、表2に記載の条件で、厚さ $1.0\mu\text{m}$ の AlN 薄膜を形成した。X線回折法により AlN 薄膜の結晶性を評価した結果、 (0002) 面を初めとする c 面に対応したピークのみ観測され、表2に示すごとくそのロックンク・カーブ半値幅(FWHM)は 1.7° であった。次に、DCマグネトロンスパッタ法により、厚さ 265nm の Mo 薄膜を形成し、フォトリソグラフィにより、図1に示すごとく平面寸法 $140 \times 160\mu\text{m}$ の矩形に近い形状にパターン化した。次に、熱燐酸を使用した湿式エッチングにより、 AlN 薄膜を所定の形状にパターン化した。さらに、反応性スパッタリング法により、圧電積層体上に厚さ 440nm の Al_2O_3 薄膜を形成し、リフトオフ法によってパターンングした。上下部電極、 AlN 薄膜および上部絶縁体層を形成した Si 基板表面をプロテクトワックスで被覆し、 Si 基板の第二表面に形成された厚さ 1000nm の SiO_2 層をマスクとして、 SF_6 ガスと C_4F_8 ガスを交互に用いて深堀エッチングを行うDeep RIE(Reactive Ion Etching)法により、振動部位にあたる Si 基板をエッチングして、ビアホールを形成し、図1及び図2に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、 Ru/Mo 積層下部電極のロックンク・カーブ半値幅(FWHM)を、表3に AlN 薄膜のロックンク・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0066】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバーとネットワークアナライザーを使用して、上記圧電薄膜共振子の電極端子 $15b$ 、 $17b$ 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形(ピークトップから 3dB 離れた位置におけるピーク幅)から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、 85RH の高温高湿条件下に 200 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表4に示す通りであった。

【0067】

(実施例2)

本実施例では、以下のようにして、図1、2に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、 Ru/Mo 積層下部電極の形成条件と厚さ、および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例1と同様な方法を用い、図1及び図2に記載の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、 Ru/Mo 積層下部電極のロックンク・カーブ半値幅(FWHM)を、表3に AlN 薄膜のロックンク・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0068】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバーとネットワークアナライザーを使用して、上記圧電薄膜共振子の電極端子 $15b$ 、 $17b$ 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合

10

20

30

40

50

係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形（ピークトップから 3 dB 離れた位置におけるピーク幅）から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85% の高温高湿条件下に 200 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響的品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

【 0 0 6 9 】

【表 1】

	下部絶縁体層				下部電極の材質、厚さ、性状										
	材質	厚さ d5 (nm)	厚さ d1+d2 (nm)	比率 d2/d1	密着層		第1層（下側）			第2層（上側）			表面粗さ RMS (nm)	端面の 傾斜角 θ (deg)	積 θ *RMS
					材質	厚さ (nm)	材質	厚さ d1 (nm)	FWHM (deg)	材質	厚さ d2 (nm)	FWHM (deg)			
実施例 1	Al2O3	220	190	1.11	-	-	Mo	90	2.0	Ru	100	2.0	1.0	21.8	22.0
実施例 2	AlN	150	250	1.50	-	-	Mo	100	1.8	Ru	150	1.8	1.5	13.7	20.0
実施例 3	AlN	100	270	1.35	-	-	Mo	115	1.4	Ru	155	1.3	1.7	8.3	10.7
実施例 4	AlN	30	350	1.33	-	-	Mo	150	1.7	Ru	200	1.6	2.1	4.7	9.9
実施例 5	AlN	50	400	1.16	-	-	Mo	185	1.4	Ru	215	1.2	1.7	4.8	8.0
実施例 6	Al2O3	70	270	-	-	-	-	-	-	Ru	270	1.4	1.6	5.0	8.0
実施例 7	Si3N4	60	315	-	-	-	-	-	-	Ru	315	2.2	1.9	5.7	11.0
実施例 8	Si3N4	90	280	-	-	-	Mo	260	2.3	-	-	-	1.5	12.7	19.4
実施例 9	AlN	80	255	1.44	Ti	35	Mo	90	1.2	Ru	130	1.2	1.5	14.0	20.8
実施例 10	3Al2O3·2SiO2	40	360	-	Cr	30	-	-	-	Ru	330	1.8	2.0	5.2	10.1
実施例 11	Al2O3	20	270	1.08	-	-	Mo	130	2.5	Ru	140	2.4	2.6	8.5	21.9
実施例 12	3Al2O3·2SiO2	380	220	-	Ti	50	W	220	2.7	-	-	-	2.7	7.4	19.8
実施例 13	MgSiO3	100	230	0.77	-	-	Mo	130	2.2	Ru	100	2.7	2.3	9.0	20.3
実施例 14	MgSiO3	50	220	1.10	-	-	Mo	105	2.0	Ru	115	2.5	2.2	9.4	20.6
実施例 15	AlN	50	400	1.11	-	-	Mo	190	1.4	Ru	210	1.2	1.7	2.4	4.0
比較例 1	SiO2	280	170	0	Cr	45	Mo	125	3.4	-	-	-	3.5	13.9	48.6
比較例 2	AlN	40	185	-	-	-	Mo	185	3.0	-	-	-	3.1	9.3	28.6
比較例 3	Al2O3	30	170	-	-	-	-	-	-	Ru	170	4.7	3.3	6.5	21.4
比較例 4	AlN	40	142	-	-	-	Mo	142	3.2	-	-	-	3.2	9.7	31.4
比較例 5	SiO2	290	375	-	Ti	35	W	340	4.1	-	-	-	4.1	12.6	51.4
比較例 6	無し	0	140	-	Al	40	Mo	100	3.6	-	-	-	3.1	14.8	46.4

* ダイアフラム部における絶縁体層の厚さを記載

【 0 0 7 0 】

10

20

【表 2】

	上部電極の材質、厚さ、性状							上下部電極 厚さの比率 (d3+d4) (d1+d2)	上部絶縁体層		上下の絶縁体層 厚さの比率 d6/d5
	厚さ d3+d4 (nm)	比率 d4/d3	第3層 (下側)		第4層 (上側)		Ruの FWHM (deg)		材質	厚さ d6 (nm)	
			材質	厚さ d3 (nm)	材質	厚さ d4 (nm)					
実施例 1	265	—	Mo	265	—	—	—	1.39	Al2O3	440	2.00
実施例 2	275	—	—	—	Ru	275	2.4	1.10	AlN	270	1.80
実施例 3	195	1.3	Ru	110	W	85	1.9	0.72	AlN	220	2.20
実施例 4	230	1.1	Mo	111	Ru	119	2.3	0.66	AlN	120	4.00
実施例 5	300	1.4	W	125	Ru	175	1.9	0.75	AlN	85	1.70
実施例 6	270	1.3	Mo	120	Ru	150	2.1	1.00	Al2O3	160	2.29
実施例 7	220	1.1	W	105	Ru	115	2.7	0.70	Si3N4	150	2.50
実施例 8	390	1.2	Mo	180	Ru	210	2.7	1.50	Si3N4	170	1.89
実施例 9	280	—	Mo	280	—	—	—	1.10	AlN	170	2.13
実施例 10	245	1.1	Mo	115	Ru	130	2.3	0.68	3Al2O3・2SiO2	100	2.50
実施例 11	160	—	W	160	—	—	—	0.59	Al2O3	200	10.00
実施例 12	240	0.8	Mo	135	Ru	105	2.8	1.09	3Al2O3・2SiO2	120	0.32
実施例 13	255	—	Mo	255	—	—	—	1.11	MgSiO3	30	0.30
実施例 14	385	—	Mo	385	—	—	—	1.75	MgSiO3	660	13.20
実施例 15	300	1.3	W	130	Ru	170	2.0	0.75	AlN	85	1.70
比較例 1	300	—	Mo	145	Au	155	—	1.76	SiO2	200	0.71
比較例 2	200	—	Mo	200	—	—	—	1.08	Al2O3	120	3.00
比較例 3	190	—	Mo	190	—	—	—	1.12	無し	0	0.00
比較例 4	138	—	—	—	Ru	138	5.2	0.97	SiO2	150	3.75
比較例 5	270	—	W	125	Au	145	—	0.72	無し	0	0.00
比較例 6	475	—	Ti	25	Pt	450	—	3.39	無し	0	0.00

* ダイアフラム部における絶縁体層の厚さを記載

【 0 0 7 1 】

【表 3】

	Ru電極層の形成条件					圧電体薄膜の作製条件と特性					
	成膜条件		比抵抗値		薄膜形成条件	XPS分光	結晶配向性	X線回折	電極端部の		
	堆積速度 (nm/s)	基板温度 (°C)	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$							窒素濃度	基板温度
			下部電極	上部電極	(vol%)	(°C)	(Atm%)				
実施例 1	1.2	260	10.4	9.3	30	350	< 0.5	1.7	0.49785	無し	
実施例 2	1.2	280	9.8	12.3	35	300	< 0.5	1.2	0.49813	無し	
実施例 3	1.2	350	8.6	10.4	25	325	< 0.5	1.0	0.49758	無し	
実施例 4	2.0	330	9.6	10.8	35	340	< 0.5	1.4	0.49813	無し	
実施例 5	1.2	370	8.3	10.3	50	315	< 0.5	1.1	0.49895	無し	
実施例 6	1.2	340	9.9	10.6	50	305	< 0.5	0.9	0.49905	無し	
実施例 7	1.2	250	11.0	11.4	25	250	< 0.5	1.8	0.49758	無し	
実施例 8	—	—	9.3	11.4	25	240	< 0.5	1.5	0.49758	無し	
実施例 9	1.2	380	7.3	9.3	45	340	< 0.5	1.2	0.49868	無し	
実施例 10	2.0	300	10.1	10.9	35	280	< 0.5	1.3	0.49813	無し	
実施例 11	2.0	250	11.6	9.6	45	370	< 0.5	1.9	0.49868	無し	
実施例 12	—	—	9.9	11.4	30	250	< 0.5	1.8	0.49785	無し	
実施例 13	2.0	230	11.2	9.9	50	270	< 0.5	1.7	0.49895	無し	
実施例 14	2.0	240	11.2	9.9	30	270	< 0.5	1.7	0.49785	無し	
実施例 15	1.2	370	8.3	10.3	50	315	< 0.5	1.2	0.49890	無し	
比較例 1	—	—	11.3	10.8	45	345	1.2	2.6	0.49868	有り	
比較例 2	—	—	13.8	12.1	55	270	1	2.3	0.49913	無し	
比較例 3	2.0	140	22.6	12.1	45	240	1.9	3.6	0.49858	無し	
比較例 4	—	—	14.3	23.3	50	290	1.6	2.4	0.49885	やや有り	
比較例 5	—	—	14.1	10.8	45	260	1.7	3.2	0.49878	無し	
比較例 6	—	—	20.8	27.4	55	260	< 0.5	2.8	0.49923	有り	

【 0 0 7 2 】

【表 4】

	薄膜圧電共振器の構造		薄膜圧電共振器の特性							
	構造 図面	圧電薄膜 の厚さ (μm)	共振 周波数 (GHz)	反共振 周波数 (GHz)	電気機械 結合係数 K_t^2 (%)	音響的品質係数 Q値		挿入損失 I.L. (dB)	共振特性 スプリアスの 有無	耐環境性 周波数シフト (MHz)
						共振 \downarrow ノック	反共振 \downarrow ノック			
実施例 1	図 1, 2	1.00	1.964	2.016	6.27	1350	1180	0.09	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 2	図 1, 2	1.32	1.897	1.950	6.65	1700	1250	0.09	無し	<0.5MHz
実施例 3	図 3, 4	1.50	1.940	1.990	6.12	1600	1700	0.09	無し	<0.5MHz
実施例 4	図 3, 4	1.15	2.125	2.188	7.05	1700	1380	0.09	無し	<0.5MHz
実施例 5	図 3, 4	1.40	1.856	1.909	6.73	1800	1290	0.07	かなり弱い	0.8MHz
実施例 6	図 3, 4	1.30	2.064	2.124	6.88	1800	1450	0.08	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 7	図 3, 4	1.25	2.128	2.186	6.49	1450	1140	0.09	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 8	図 1, 2	0.98	2.044	2.100	6.52	1500	1220	0.07	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 9	図 3, 4	1.20	2.021	2.076	6.41	1900	1470	0.07	無し	<0.5MHz
実施例 10	図 3, 4	1.40	1.911	1.964	6.68	1500	1140	0.08	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 11	図 3, 4	1.40	2.117	2.171	6.00	1080	950	0.14	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 12	図 3, 4	0.95	1.934	1.978	5.47	1160	740	0.13	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 13	図 3, 4	1.30	2.096	2.151	6.17	1300	770	0.12	中程度	1.2MHz
実施例 14	図 3, 4	0.85	1.593	1.631	5.58	1110	970	0.11	かなり弱い	<0.5MHz
実施例 15	図 3, 4	1.40	1.861	1.910	6.23	1100	880	0.10	中程度	0.8MHz
比較例 1	図 1, 2	0.90	1.829	1.870	5.28	900	280	0.18	中程度	<0.5MHz
比較例 2	図 3, 4	1.55	1.997	2.042	5.40	990	350	0.22	かなり弱い	<0.5MHz
比較例 3	図 3, 4	1.75	2.030	2.072	5.10	950	330	0.27	強い	>2MHz
比較例 4	図 3, 4	1.75	2.002	2.046	5.25	970	460	0.37	中程度	<0.5MHz
比較例 5	図 1, 2	0.95	1.838	1.877	5.20	860	300	0.15	強い	>2MHz
比較例 6	図 1, 2	1.40	1.790	1.830	0.00	795	320	0.28	強い	>2MHz

10

20

【 0 0 7 3 】

(実施例 3)

本実施例では、以下のようにして、図 3、4 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、熱酸化法により、厚さ 625 μm の Si ウェハの両面に、厚さ 1500 nm の SiO₂ 層を形成した後、Si ウェハの第一面（上面）に犠牲層となる厚さ 50 nm の Ti 薄膜を堆積して、フォトリソグラフィにより、所望のエアブリッジ形状にパターン形成した。次に、反応性スパッタリング法により、第一面側に厚さ 100 nm の AlN 薄膜を形成した。この Si 基板の第一表面に、DC マグネトロンスパッタ法にて、表 1 に記載した厚さの Mo 薄膜と Ru 薄膜を順番に堆積して下部電極層を形成し、さらに、フォトリソグラフィによりパターン化した。パターン形成に際しては、意図的にデフォーカスさせた紫外光でレジストを露光、現像して、レジストの形状をなだらかな蒲鉾型形状にした。レジスト端面になだらかな傾斜を持たすことで、電極パターン端面の傾斜角を制御することに注力した。X 線回折装置により下部電極の結晶配向性を評価した結果、表 1 に示すごとく Mo (110) 面のロッキング・カーブ FWHM は 1.4 deg、Ru (002) 面のロッキング・カーブ FWHM は 1.3 deg であった。この Ru/Mo 積層下部電極上に、純度 99.999% の Al ターゲットを用い、反応性 RF マグネトロンスパッタ法により、表 2 に記載の条件で、厚さ 1.5 μm の AlN 薄膜を形成した。X 線回折法により AlN 薄膜の結晶性を評価した結果、(002) 面を初めとする c 面に対応したピークのみ観測され、表 2 に示すごとくそのロッキング・カーブ半値幅 (FWHM) は 1.0° であった。次に、DC マグネトロンスパッタ法により、表 1 に記載した厚さの Ru 薄膜と W 薄膜を順番に堆積して上部電極層を形成し、フォトリソグラフィにより、図 3 に示すごとく平面寸法 140 × 160 μm の矩形に近い形状にパターン化した。次に、熱燐酸を使用した湿式エッチングにより、AlN 薄膜を所定の形状にパターン化した。上下部電極と AlN 薄膜を形成した Si ウェハ上面に、上部絶縁体層となる表 1 に記載した厚さの AlN 薄膜を堆積して、パターン形成した。次に、Si ウェハ上面にフォトレジストを塗布し、図 3 に示した振動空間を形成するためのピアホールパターンを形成して、Cl₂ と Ar の混合ガスを用いたドライエッチングにより、ピアホールを開けた。フォトレジス

30

40

50

トを剥離することなく、Siウエハ下面もフォトリソで被覆して、希釈フッ酸溶液に浸漬し、ピアホールを通じた液の循環により、Ti犠牲層とその下方に位置する厚さ1500nmのSiO₂層とをエッチング除去した。酸素プラズマ中でのアッシングによりレジストを除去して、図4に示した振動空間20を作製した、以上の製造工程により、図3及び4に記載の構造の薄膜圧電共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、Ru/Mo積層下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0074】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバとネットワークアナライザを使用して、上記圧電薄膜共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形(ピークトップから3dB離れた位置におけるピーク幅)から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数Qを求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数Qは表4に示す通りであった。

【0075】

(実施例4)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、Ru/Mo積層下部電極の形成条件と厚さ、および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例3と同様な方法を用い、図3及び図4に記載の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、Ru/Mo積層下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0076】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバとネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形(ピークトップから3dB離れた位置におけるピーク幅)から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数Qを求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数Qは表4に示す通りであった。

【0077】

(実施例5)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、Ru/Mo積層下部電極の形成条件と厚さ、および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例3と同様な方法を用い、図3及び図4に記載の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、Ru/Mo積層下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0078】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバとネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形(ピークトップから3dB離れた位置におけるピーク幅)から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数Qを求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の

10

20

30

40

50

高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表4に示す通りであった。

【0079】

(実施例6)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、Ru下部電極の形成条件と厚さ、および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例3と同様な方法を用い、図3及び図4に記載の圧電薄膜共振子を作製した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、Ru下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

10

【0080】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバとネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形(ピークトップから3dB離れた位置におけるピーク幅)から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表4に示す通りであった。

20

【0081】

(実施例7)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、絶縁体層として低圧CVD法によるSiNx層を使用し、上下部絶縁体層の材質と厚さ、Ru下部電極の形成条件と厚さ、および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例3と同様な方法を用い、図3及び図4に記載の圧電薄膜共振子を作製した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、Ru下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

30

【0082】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロプローバとネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形(ピークトップから3dB離れた位置におけるピーク幅)から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表4に示す通りであった。

40

【0083】

(実施例8)

本実施例では、以下のようにして、図1、2に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例1と同様な方法を用い、図1及び図2に記載の構造の圧電薄膜共振子を作製した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、Mo下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0084】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバとネットワークアナライザ

50

ーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響的品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響的品質係数 Q は表4に示す通りであった。

【0085】

(実施例9)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の厚さ、Ru/Mo/Ti積層下部電極の形成条件と厚さ、および上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例3と同様な方法を用い、図3及び図4に記載の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚みを、Ru/Mo/Ti積層下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0086】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバーとネットワークアナライザーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響的品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表4に示す通りであった。

【0087】

(実施例10)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、実施例3と同様な方法で、下部絶縁体層、下部電極及びAlN薄膜を形成しパターン化した後、上部電極を形成することにより図3及び図4に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚みを、Ru/Cr積層下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0088】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバーとネットワークアナライザーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響的品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85%の高温高湿条件下に200時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表4に示す通りであった。

【0089】

(実施例11~14)

本実施例では、以下のようにして、図3、4に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極の材質、形成条件および厚さ、ならびに上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例3と同様な方法を用い、図3及び図4に記載の圧電薄膜共振子を製造した。表1および表2に振動部位の各層の材質と厚み、下部電極のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を、表3にAlN薄膜のロッキング・カーブ半値幅(FWHM)を記載した。

【0090】

また、カスケード・マイクロテック製GSGマイクロ波プローバーとネットワークアナライザーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子15b、17b間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合

10

20

30

40

50

係数 k_t^2 を、インピーダンス特性における共振ピークおよび反共振ピークのピーク波形（ピークトップから 3 dB 離れた位置におけるピーク幅）から共振ピークおよび反共振ピークの音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85% の高温高湿条件下に 200 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

【0091】

（実施例 15）

本実施例では、以下のようにして、図 3、4 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部電極端部の傾斜角を変えた以外は、実施例 5 と同様な方法を用い、図 3 及び図 4 に記載の圧電薄膜共振子を製造した。表 1 および表 2 に振動部位の各層の材質と厚み、下部電極のロッキング・カーブ半値幅（FWHM）を、表 3 に AlN 薄膜のロッキング・カーブ半値幅（FWHM）を記載した。また、実施例 5 と同様な圧電特性の評価を行った。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

【0092】

（比較例 1）

本比較例では、以下のようにして、図 1、2 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層として熱酸化による SiO_2 層を、下部電極密着層として Cr を、下部電極として Mo を使用するなど、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極の材質と厚さおよび上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例 1 記載の方法で図 1 及び図 2 に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表 1 および表 2 に振動部位の各層の材質と厚みを、表 3 に AlN 薄膜の結晶性を記載した。

【0093】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバとネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子 15 b、17 b 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85% の高温高湿条件下に 200 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

【0094】

（比較例 2）

本比較例では、以下のようにして、図 3、4 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極の材質と厚さおよび上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例 3 記載の方法で図 3 及び図 4 に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表 1 および表 2 に振動部位の各層の材質と厚みを、表 3 に AlN 薄膜の結晶性を記載した。

【0095】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバとネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子 15 b、17 b 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、85 R.H. 85% の高温高湿条件下に 200 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

【0096】

（比較例 3）

本比較例では、以下のようにして、図 3、4 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極の材質と厚さおよび上部電極の材質

10

20

30

40

50

と厚さを変え、上部絶縁体層を形成しなかった以外は、実施例 3 記載の方法で図 3 及び図 4 に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表 1 および表 2 に振動部位の各層の材質と厚みを、表 3 に A l N 薄膜の結晶性を記載した。

【 0 0 9 7 】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバとネットワークアナライザーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子 1 5 b、1 7 b 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、8 5 R . H . 8 5 % の高温高湿条件下に 2 0 0 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

10

【 0 0 9 8 】

(比較例 4)

本比較例では、以下のようにして、図 3、4 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層および上部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極の材質と厚さおよび上部電極の材質と厚さを変えた以外は、実施例 3 記載の方法で図 3 及び図 4 に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表 1 および表 2 に振動部位の各層の材質と厚みを、表 3 に A l N 薄膜の結晶性を記載した。

【 0 0 9 9 】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバとネットワークアナライザーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子 1 5 b、1 7 b 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、8 5 R . H . 8 5 % の高温高湿条件下に 2 0 0 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

20

【 0 1 0 0 】

(比較例 5 , 6)

本比較例では、以下のようにして、図 1、2 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。即ち、下部絶縁体層の材質と厚さ、下部電極の材質と厚さおよび上部電極の材質と厚さを変え、上部絶縁体層を形成しなかった以外は、比較例 1 記載の方法で図 1 及び図 2 に記載の構造の圧電薄膜共振子を製造した。表 1 および表 2 に振動部位の各層の材質と厚みを、表 3 に A l N 薄膜の結晶性を記載した。

30

【 0 1 0 1 】

また、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバとネットワークアナライザーを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子 1 5 b、1 7 b 間のインピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数 f_r および反共振周波数 f_a の測定値から、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q を求めた。また、耐環境性評価のために、8 5 R . H . 8 5 % の高温高湿条件下に 2 0 0 時間保持した後の周波数シフトを測定した。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 k_t^2 、および音響品質係数 Q は表 4 に示す通りであった。

40

【 図面の簡単な説明 】

【 0 1 0 2 】

【 図 1 】 本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

【 図 2 】 図 1 の X - X 断面図である。

【 図 3 】 本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

【 図 4 】 図 3 の X - X 断面図である。

【 図 5 】 本発明による積層型圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

【 図 6 】 図 5 の X - X 断面図である。

【 図 7 】 従来技術において、下部電極端面に発生する A l N のクレータ状分離成長を示す

50

図である。

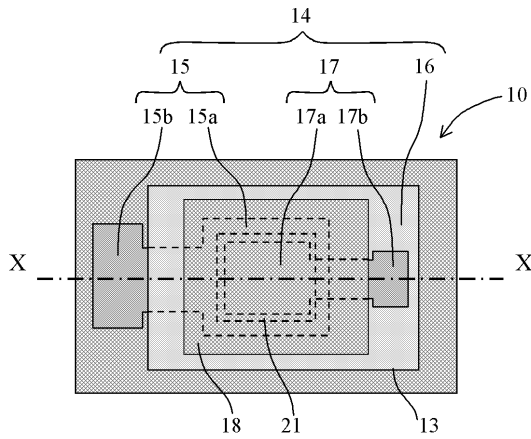
【図8】本発明における下部電極端面の傾斜角を示す図である。

【符号の説明】

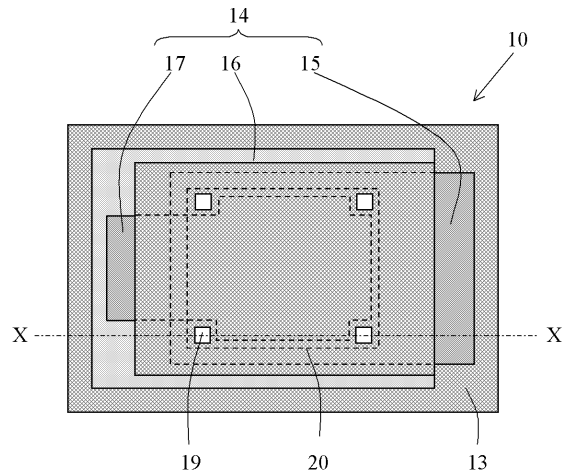
【0103】

- 10 圧電薄膜共振子
- 11 単結晶または多結晶からなる基板
- 12 下部絶縁体層
- 13 下部絶縁体層
- 14 圧電積層構造体
- 15 下部電極
- 15 a 下部電極主体部
- 15 b 下部電極端子部
- 16 圧電体薄膜
- 17 上部電極
- 17 a 上部電極主体部
- 17 b 上部電極端子部
- 17' 内部電極
- 18 積層型圧電薄膜共振子における上部電極
- 18 a 積層型圧電薄膜共振子における上部電極の主体部
- 18 b 積層型圧電薄膜共振子における上部電極の端子部
- 19 エッチング用のピアホール
- 20 エッチングによって基板に形成した振動空間
- 21 振動部
- 23 上部絶縁体層

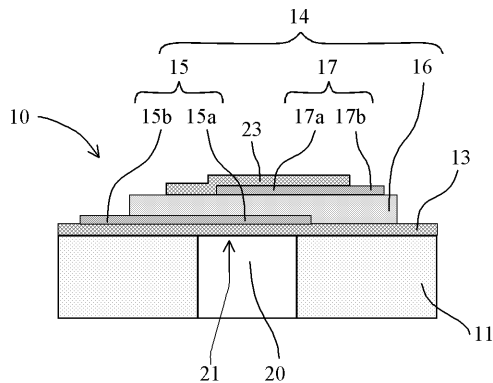
【図1】



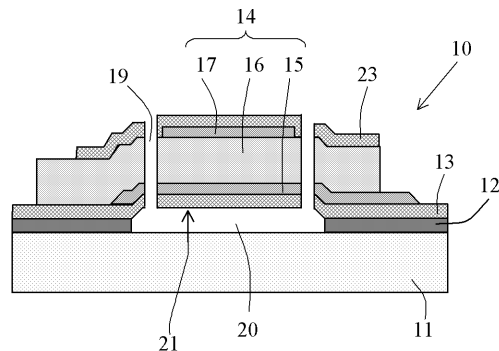
【図3】



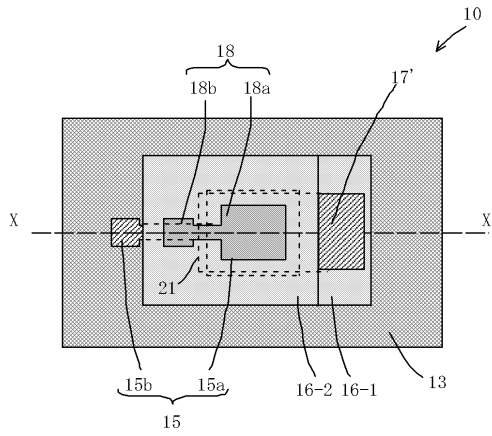
【図2】



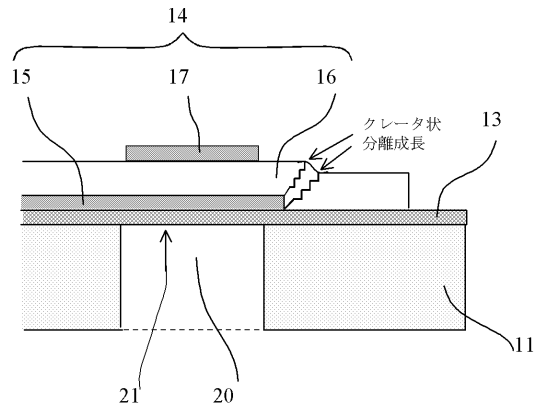
【図4】



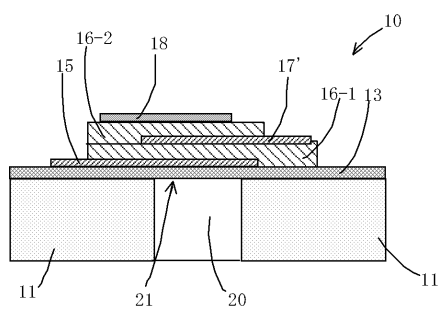
【図5】



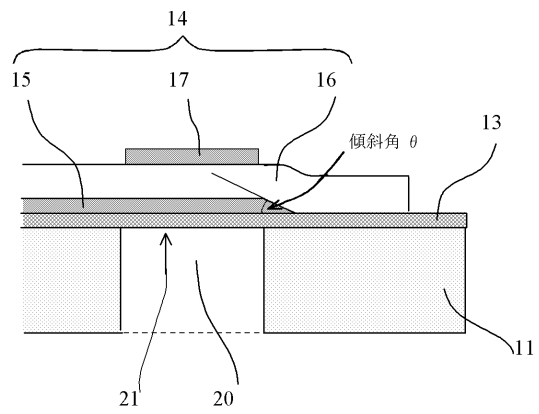
【図7】



【図6】



【図8】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 41/18 1 0 1 Z
H 0 1 L 41/22 Z

審査官 橋本 和志

(56)参考文献 特開2004-095843(JP,A)
特開2000-244030(JP,A)
国際公開第2005/060091(WO,A1)
米国特許出願公開第2004/0263287(US,A1)
特開2005-124107(JP,A)
特開2003-347883(JP,A)
国際公開第02/093740(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H03H3/007-H03H3/10, H03H9/00-9/76, H01L41/083
, H01L41/09, H01L41/18, H01L41/22