

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4086023号  
(P4086023)

(45) 発行日 平成20年5月14日(2008.5.14)

(24) 登録日 平成20年2月29日(2008.2.29)

(51) Int.Cl.	F 1
B 8 1 B 3/00	(2006.01) B 8 1 B 3/00
B 8 1 C 3/00	(2006.01) B 8 1 C 3/00
H 02 N 1/00	(2006.01) H 02 N 1/00
H 02 N 2/00	(2006.01) H 02 N 2/00
H 03 H 3/007	(2006.01) H 03 H 3/007

請求項の数 10 (全 33 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2004-244835 (P2004-244835)	(73) 特許権者	000002369 セイコーエプソン株式会社 東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(22) 出願日	平成16年8月25日 (2004.8.25)	(74) 代理人	100095728 弁理士 上柳 雅善
(65) 公開番号	特開2005-271191 (P2005-271191A)	(74) 代理人	100107076 弁理士 藤綱 英吉
(43) 公開日	平成17年10月6日 (2005.10.6)	(74) 代理人	100107261 弁理士 須澤 修
審査請求日	平成17年6月7日 (2005.6.7)	(72) 発明者	木原 龍児 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願2003-405839 (P2003-405839)	(72) 発明者	中島 卓哉 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
(32) 優先日	平成15年12月4日 (2003.12.4)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		
(31) 優先権主張番号	特願2004-38468 (P2004-38468)		
(32) 優先日	平成16年2月16日 (2004.2.16)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		
(31) 優先権主張番号	特願2004-54180 (P2004-54180)		
(32) 優先日	平成16年2月27日 (2004.2.27)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】マイクロメカニカル静電振動子

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

板状の振動体と、該振動体の両側に前記振動体の外周部に対し空隙を介してそれぞれ対向配置される一対の加振電極と、該一対の加振電極に同相の交流電力を印加するための給電手段と、前記振動体と前記加振電極との間の静電容量の変化に対応した出力を得るための検出手段とを有するマイクロメカニカル静電振動子において、

前記振動体の平面形状の輪郭は、円弧部と、該円弧部に両端が滑らかに連結されたくびれ部とからなり、

前記振動体の平面形状は、少なくとも 2 つの円がお互いに重なった形状の輪郭を備え、前記少なくとも 2 つの円がお互いに重なった形状であることによって形成される前記くびれ部を備えた曲線状の輪郭を有する形状であることを特徴とするマイクロメカニカル静電振動子。

## 【請求項 2】

前記振動体は、基板上に形成された支持部により支持され、前記支持部の周囲に広がる形状に構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

## 【請求項 3】

前記振動体は、前記基板であるシリコン基板上に構成されたシリコン層若しくはシリコン化合物層で構成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

**【請求項 4】**

前記振動体又は前記加振電極に導電接続された配線層を有し、該配線層と前記基板の距離が前記振動体又は前記加振電極と前記基板の距離よりも大きいことを特徴とする請求項2又は3に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

**【請求項 5】**

前記配線層は、前記振動体又は前記加振電極の形成表面よりも前記基板から離れた表面を備えた絶縁層上に形成されていることを特徴とする請求項4に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

**【請求項 6】**

前記振動体又は前記加振電極は前記基板上に形成された絶縁体の表面上に構成され、前記絶縁層は前記絶縁体よりも低い誘電率を有することを特徴とする請求項5に記載のマイクロメカニカル静電振動子。 10

**【請求項 7】**

前記絶縁層は多孔質膜であることを特徴とする請求項5又は6に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

**【請求項 8】**

前記配線層と前記基板との間には空間が設けられていることを特徴とする請求項4乃至7のいずれか一項に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

**【請求項 9】**

前記基板は絶縁体からなる基板であることを特徴とする請求項2又は3に記載のマイクロメカニカル静電振動子。 20

**【請求項 10】**

前記基板は、ガラスからなることを特徴とする請求項9に記載のマイクロメカニカル静電振動子。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明はマイクロメカニカル静電振動子に係り、特に、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて基板上に形成された振動体を有する高周波振動子として好適なマイクロメカニカル静電振動子の構造に関する。 30

**【背景技術】****【0002】**

近年、世界的な高度情報化社会の到来により、パーソナルユースの携帯電話の普及やインターネットを媒体とした新しいビジネスの誕生など、通信・マルチメディア市場は飛躍的な発展を遂げている。その中でも情報化時代の牽引役とも言える携帯電話の機能は単純な電話としての機能だけでなくなってきた。例えば、音声、文字、静止画に加え、高品質な音楽、カラー動画像などの高速・大容量データの送受信のように従来の機能から大きく進化している。このようなこれまでにない機能を携帯電話などに搭載するには、スペースの制約から電子部品の「小型化・軽量化」が一段と求められる。また、携帯電話の筐体の小型化傾向は、操作上の制限から限界が現れ始めているが、今後は「薄型化」への要求も高まるものと考えられる。一方、無線LANの普及の本格化、ブルートゥース製品の登場、米国でのUWB (Ultra Wide Band) の民間利用認可など情報の大容量化に伴った「高周波化」の市場要求が近年顕著に現れ始めている。さらに通信機器の用途は車載用センサやノートパソコンなど幅広い分野で使われるようになった。このような様々な環境下で高い特性を維持するこれまでにない「高信頼性」が必要とされている。 40

**【0003】**

上記のような各種の要求を達成する手段としてMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) テクノロジーが挙げられる。このMEMS、すなわち微小な電気機械システムは、半導体の微細加工技術を基本とした「マイクロマシニング」で作る高付加価値の部品である。回路を始め、微細構造体やセンサ、さらにアクチュエータやエネルギー源などを小 50

型に集積化できる。携帯電話や無線 LAN、無線機能付きセンサなど、ワイヤレス機器の需要が増大していることから、この分野で RF (Radio Frequency) MEMS の研究が盛んである。この RF MEMS は、RF 回路の小型化を実現する技術として高い注目を集めている。すなわち、RF 回路の受動部品、例えば、アンテナ切換スイッチ、RF フィルタ、共振器などを RF MEMS 技術によって製作することで、通信機器全体の小型化、高性能化につながるものと期待されている。

#### 【0004】

従来の RF MEMS 技術を用いた高周波振動子には、交流電力に基づく静電力により振動体の機械的振動を励起し、この振動体の機械的振動に起因する静電容量の変化を用いるマイクロメカニカル静電振動子がある。このマイクロメカニカル静電振動子としては、櫛歯構造を有する電極が噛み合うように対向配置された櫛歯型振動子が知られている（例えば、以下の非特許文献 1 参照）。この振動子は、電極部が櫛歯構造であるため表面積が広く比較的低電圧で駆動できるとともに、変位とキャパシタ変化が線形であるため、線形応答が得られるという利点がある。

10

#### 【0005】

また、現在提案されているものとしては、梁部左右若しくは上下に電極を設け、この電極に交流電力を供給することで梁部にて両端が支持された振動部を振動させるものが知られている（例えば、以下の非特許文献 2 参照）。

#### 【0006】

さらに、中央部を支持してなる円盤の外周部の両側に一対の電極を対向配置し、これらの電極に交流電力を印加することで円盤を高次モードで伸縮振動させるものが知られている（例えば、以下の非特許文献 3 参照）。

20

#### 【0007】

上記の各種のマイクロメカニカル静電振動子のうち、上記の梁部にて両端が支持された櫛歯電極構造その他の可動部を備えたマイクロメカニカル静電振動子においては、梁部の屈曲によって振動が生ずるので屈曲モード（屈曲振動）の振動子とよばれる。また、上記の円盤の両側に一対の電極を対向配置してなるマイクロメカニカル静電振動子は円盤の伸縮振動を利用して伸縮モード（伸縮振動）の振動子と呼ばれる。

【非特許文献 1】WILLIAM C. TANG、他三名 "Laterally Driven Resonant Microstructures" Sensors and Actuators , 20 ( 1989 ) P. 25 - 32

30

【非特許文献 2】W. -T. Hsu、他二名 "Q-optimized lateral free-free beam micromechanical resonators," Digest of Technical Papers, the 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors & Actuators (Transducers'01), Munich, Germany, June 10-14, 2001, pp. 1110-1113.

【非特許文献 3】J. R. Clark、他二名 "High-Q VHF micromechanical contour-mode disk resonators," Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting, San Francisco, California, Dec. 11-13, 2000, pp. 399-402.

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0008】

40

ところで、上記の屈曲モードのマイクロメカニカル静電振動子においては、振動時の変位を大きくとることが可能であり、比較的低い駆動電圧でも、大きな出力信号を得ることができる。しかしながら、実現可能な振動周波数が通常数十 kHz ~ 数百 kHz 程度であり、高々数 MHz と低いため、振動子（共振子）の高周波化が困難であるという問題点がある。

#### 【0009】

また、上記従来の櫛歯状構造を備えたマイクロメカニカル静電振動子では、櫛歯状構造を採用することにより駆動電極と可動電極との間の静電容量が大きくなる。また、櫛歯状構造を採用することにより駆動電極及び可動電極の平面投影面積が大きくなることにより、上記の電極と基板との間の静電容量も大きくなる。

50

**【 0 0 1 0 】**

さらに、櫛歯状構造を備えた振動子に限られるものではないが、上記電極に導電接続された配線部分や接続端子（ボンディングパッド）と基板との間にも静電容量が存在する。この静電容量は、配線抵抗の増大や導電接続処理の要請から微細化することが困難であるので、マイクロメカニカル静電振動子の電極構造が微細化されればされるほど、相対的に大きくなる。

**【 0 0 1 1 】**

上記の静電容量はいずれも可動電極の動作に依存しない定常成分であるが、可動電極の平面スライド動作に起因する静電容量の変動成分は、上記の静電容量の定常成分に較べてかなり小さい。すなわち、静電振動子の出力動作に寄与するのは可動電極によって変動する静電容量の変動成分であるが、この静電容量の変動成分の割合が小さい。したがって、静電振動子から充分な信号出力を得るために駆動電圧を高くする必要があることから、低電圧化を図ることが難しく、省電力化が困難であるという点が実用化、製品化の大きな障害となっている。

10

**【 0 0 1 2 】**

一方、高周波化を図る上では伸縮モードの静電振動子が最も好ましく、前述の円盤型振動子は高周波振動子を構成する上で有効である。しかし、この伸縮モードの振動子は振動時の変位（振幅）が小さいため、出力信号も小さくなる。振動変位を大きくしようとすると、静電力を大きくする必要があるので、電極に供給される入力電圧も高くする必要がある。すなわち、上記と同様に、入力電圧に対する出力電圧の比を高めることが困難であり、低電圧化を図ることが難しく、省電力化が困難であるという問題点がある。

20

**【 0 0 1 3 】**

また、この振動子では、高周波化を図るために円盤状の振動体の厚みを大きくするか、或いは、円盤形状の半径を小さくする必要がある。振動体の厚みを大きくするには、製造時に長いプロセス時間が必要になるから振動体の厚みを増やすことにも限界がある。また、円盤形状を小さくすることによって静電容量の変化量を検出することがさらに難しくなるので、出力を取り出すことが難しく、また駆動電圧が大きくなるとともに、振動子に対して支持部を占める割合が大きくなることから損失も大きくなるという問題点がある。

**【 0 0 1 4 】**

そこで、本発明は上記課題を解決するものであり、その目的は、マイクロメカニカル静電振動子において、従来よりも容易に高周波化を図ることのできる方法或いは構造を提供することにある。また、他の目的は、従来よりも入力電圧に対する出力電圧の比を大きくすることができ、低駆動電圧化や省電力化を図ることのできるマイクロメカニカル静電振動子を提供することにある。

30

**【課題を解決するための手段】****【 0 0 1 5 】**

本発明のマイクロメカニカル静電振動子は、板状の振動体と、該振動体の両側に前記振動体の外周部に対し空隙を介してそれぞれ対向配置される一対の加振電極と、該一対の加振電極に同相の交流電力を印加するための給電手段と、前記振動体と前記電極との間の静電容量の変化に対応した出力を得るための検出手段とを有するマイクロメカニカル静電振動子において、前記振動体の平面形状は、少なくとも2つの円があわいに重なった形状の輪郭を備え、前記振動体の平面形状の輪郭は、円弧部と、該円弧部に両端が滑らかに連結されたくびれ部とからなり、少なくとも2つの円があわいに重なった形状であることによって形成される前記くびれ部を備えた曲線状の輪郭を有する形状であることを特徴とする。

40

**【 0 0 1 6 】**

本願発明者が鋭意検討した結果、板状の振動体の平面形状を、くびれを備えた曲線状の輪郭を有する形状としたことにより、従来の円形の平面形状を備えた振動体を用いる場合よりも高い周波数を得ることができることが判明した。これによって、振動体の厚みを増

50

大きせたり、振動体の半径を減少させたりすることなしに高周波化を図ることができるの  
で、製造時間の増大、検出レベルの減少などを招くことなく、高周波振動子を容易に実現  
できる。

#### 【 0 0 1 7 】

本発明においては、前記振動体の平面形状の輪郭は、円弧部と、該円弧部に対し両端が  
滑らかに連結されたくびれ部とからなる。これによれば、振動体の輪郭に角部が存在しな  
いので、上記のように高周波化を容易に実現しつつ、安定した固有振動を得ることができ  
るとともに、損失を低減することができる。この場合、円弧部は、厳密に円弧となっ  
ていい必要はなく、全体として弧状に構成されているのであれば、橢円弧であっても、曲率が  
徐々に変化するものであっても構わない。ただし、この振動体の平面形状は、一対の電極  
に対して対称な形状（例えば、一対の電極の中心部を結ぶ線分の垂直二等分線を対称軸と  
する線対称）であることが好ましい。  
10

#### 【 0 0 1 8 】

本発明において、前記振動体は、基板上に形成された支持部により支持され、前記支持  
部の周囲に広がる形状に構成されていることが好ましい。これによれば、基板上に形成さ  
れた支持部により振動体が支持され、振動体が支持部の周囲に広がる形状に構成されてい  
ることにより、伸縮振動時において支持部の影響が低減され、振動体の平面形状に応じた  
高い周波数を容易に実現できる。ここで、上記基板は絶縁体で構成されることが好ましい  
。これによって振動子構造体と基板との間の寄生容量による影響を回避できる。  
20

#### 【 0 0 1 9 】

本発明において、前記振動体は、前記基板であるシリコン基板上に構成されたシリコン  
層若しくはシリコン化合物層（ICプロセスで用いられる膜：例えばPoly-Si、SiNなど）で  
構成されていることが好ましい。これによれば、シリコン基板上にシリコン層で構成され  
た振動体を有することにより、通常のシリコン半導体の製造プロセスにより容易に振動子  
を形成できる。  
20

#### 【 0 0 3 6 】

本各発明において、前記振動体又は前記加振電極に導電接続された配線層を有し、前記  
配線層と前記基板の距離が前記振動体又は前記加振電極と前記基板の距離よりも大きいこ  
とが好ましい。この発明によれば、配線層と基板との距離が振動体又は加振電極と基板との  
距離よりも大きいことにより、配線層と基板との間に発生する静電容量を低減するこ  
ができるので、静電容量の定常成分が小さくなり、その分、振動に起因する静電容量の変  
動成分の割合を高めることができることが可能になるため、静電振動子の出力特性を向上させ  
ることができ、駆動電圧の低減を図ることが可能になる。  
30

#### 【 0 0 3 7 】

ここで、上記配線層とは、上記の振動体や加振電極に電位を供給し、或いは、上記振動  
体や加振電極から信号を取り出すための導電経路を構成するもの、例えば、以下の実施形  
態における配線部や接続端子（ボンディングパッド）などを言う。上記の振動体や加振電  
極は、相互間に静電力を生じさせることによって少なくとも振動体が可動に構成されたも  
のであればよい。  
40

#### 【 0 0 3 8 】

本発明において、前記配線層は、前記振動体又は前記加振電極の形成表面よりも前記基  
板から離れた表面を備えた絶縁層上に形成されていることが好ましい。これによれば、配  
線層が絶縁層上に形成されることによって、振動体又は加振電極よりも基板から離  
れた位置に配線層を容易かつ確実に設けることができる。

#### 【 0 0 3 9 】

この場合において、前記振動体又は前記加振電極は前記基板上に形成された絶縁体の表  
面上に構成され、前記絶縁層は前記絶縁体よりも低い誘電率を有することが望ましい。こ  
のようになると、絶縁層を絶縁体と同じ誘電率を有するものとした場合（同一の絶縁層で  
構成した場合）や、絶縁体よりも高い誘電率を有するものとした場合に比べて、配線層と  
基板との間の静電容量をさらに低減することができる。  
50

**【0040】**

また、前記絶縁層は多孔質膜であることが好ましい。これによれば、絶縁層を多孔質膜とすることで、絶縁層の誘電率を低下させることができるために、配線層と基板との間の静電容量をさらに低減することができる。

**【0042】**

本発明において、前記配線層と前記基板との間には空間が設けられていることが好ましい。これによれば、配線層と基板との間に空間が設けられていることによって配線層と基板との間の実質的な誘電率をさらに低下させることができるために、配線層と基板との間の静電容量をさらに低減することができる。

**【0043】**

10

上記各発明においては、前記基板はシリコン基板であることが好ましい。これによれば、シリコン基板に半導体集積回路などを適宜に形成することができるので、半導体集積回路などの回路構造と静電振動子とを一体に構成することができる。この場合には、上述のように、シリコン基板上に絶縁層を介して圧電体薄膜、電極及び配線層を形成することができる。また、基板はSiGeやGaAsといったIC作成可能な半導体基板であっても良い。

**【0044】**

また、前記基板と前記振動体又は前記加振電極との間に絶縁層が形成されていることが好ましい。これによって振動子構造体と基板との間の寄生容量を全体として低減することができる。

20

**【0045】**

また、前記振動体又は前記加振電極としては、ポリシリコンやアモルファスシリコンなどで構成されることが好ましい。これらの素材は半導体製造技術によって容易に形成することができ、特に、シリコン基板上に静電振動子を構成する場合にプロセス上有利である。

**【0046】**

また、上記各発明において、前記基板は絶縁体からなる基板であることが好ましい。これによれば、絶縁体からなる基板を用いてマイクロメカニカル静電振動子が形成されているため、基板上に形成される振動子構造体と基板との間の寄生容量を低減することができる。この結果として、寄生容量を介して流れる電流が大幅に減少されるため、振動子の性能を向上させることができる。

30

**【0047】**

また、基板がガラスからなることにより、基板の材料コストを低減することができるとともに、ガラス基板に対する微細加工に際して例えば液晶表示素子の製造において確立された技術を用いることができるため、製造コストを低減しつつ高性能のマイクロメカニカル振動子を得ることができる。

**【発明を実施するための最良の形態】****【0055】****[第1実施形態]**

次に、添付図面を参照して本発明の第1実施形態について詳細に説明する。図1は、本発明に係る第1実施形態のマイクロメカニカル静電振動子100の構造を回路構成とともに示す概略平面図(a)及び縦断面図(b)である。

40

**【0056】**

このマイクロメカニカル静電振動子100においては、シリコン基板などで構成される基板101の表面上に、振動子構造体を絶縁するために必要に応じて絶縁膜102が形成されている。この基板101又は絶縁膜102上には、出力電極103、支持部104及び振動体105が構成されている。また、振動体105の両側(図示例では図1(a)の上下両側、図1(b)の前後両側)には、振動体105の外周部に空隙106を介して対向配置される、一対の加振電極107、107が形成されている。

**【0057】**

50

また、このマイクロメカニカル静電振動子100には、上記一対の加振電極107, 107に同相の交流電力を印加するための給電手段を構成する給電回路110が設けられている。この給電回路110には、交流電源111と、この交流電源111と加振電極107とを接続する給電線112とが設けられている。この給電回路110は基板101の内部にモノリシックに構成されていることが好ましいが、基板101とは別に構成されてもよく、或いは、外部から交流電力を供給するための配線構造のみで構成されていてもよい。

#### 【0058】

さらに、本実施形態には、出力電極103とともに振動体105の伸縮振動に応じた出力信号を出力するための検出手段を構成する出力回路120が設けられている。この出力回路120においては、電源電位123と出力電極103の出力線121の出力電位との間に接続されたインダクタンス122と、上記出力電位と接地電位との間に接続された負荷抵抗125とが存在し、その先に出力端子126が設けられ、出力電極103と負荷抵抗125及び出力端子126との間にキャパシタンス124が介在している。

#### 【0059】

本実施形態では、振動体105は、その平面形状が一対の加振電極107, 107の間で平面的に伸縮する様の振動を生じ、この伸縮振動に応じて空隙106が変化することによって、振動体105と加振電極107との間の静電容量が増減する。この静電容量の増減は、出力回路120に生ずる出力電流Ioとして現れるので、この出力電流Ioと付加抵抗125に応じた出力電位Voが出力端子126に出力される。この出力電位Voは、振動体105の固有振動周波数に対応する振動波形を備えたものとなる。

#### 【0060】

振動体105の伸縮振動は、板状の振動体105の平面形状の輪郭(外周部)の形状変化を伴う径方向の振動であり、振動体105と加振電極107, 107との間の静電力に起因するものである。この振動モードにおいて、振動体105は、その平面形状、厚み、及び、構成素材の密度や弾性特性(例えば、ヤング率やポアソン比など)によって定まる固有振動周波数を有する。

#### 【0061】

振動体105は、基板101上に形成された支持部104により支持され、振動体105が支持部104の周囲に広がる形状に構成されていることにより、伸縮振動時において支持部104の影響が低減され、振動体の平面形状に応じた高い周波数を容易に実現できるように構成されている。

#### 【0062】

振動体105の平面形状は、図示のようにくびれを備えた曲線状の輪郭形状を備えている。具体的には、図2(a)に示すように、振動体105の輪郭は、円弧状に構成された複数(図示例では2つ)の円弧部105a, 105bと、これらの円弧部間に両端が滑らかに連結された複数(図示例では2つ)のくびれ部105c, 105dとからなるものである。図示例の場合、円弧部105aと105bとは対称形状であり、くびれ部105cと105dとは対称形状である。

#### 【0063】

そして、図1に実線で示す加振電極107, 107は、上記振動体105のくびれ部105c, 105dに対してそれぞれ対向配置されている。ただし、電極構造としては、図1に一点鎖線で示すように、くびれ部105c, 105dを中心としてその両側の円弧部105a, 105bにも対向するように配置された加振電極107, 107であってもよく、また、図1に2点鎖線で示すように、円弧部105a, 105bの中央部分に対向配置される加振電極107, 107であっても構わない。

#### 【0064】

ここで、図2(a)に2点鎖線で示すように、円弧部105a, 105b間の幅とくびれ部105c, 105d間の幅とが逆相で伸縮する振動モードで、本実施形態に基づく実施例と図2(c)に示す円盤形状の振動体を用いた比較例とを比較した。ここで、比較例

10

20

30

40

50

では、本実施形態の円弧部 105a, 105b 間の幅と等しい直径  $r$  を有する円盤状の振動体を用い、振動体の厚み  $t$ 、給電手段に接続された電極構造は同一とした。ちなみに、実施例及び比較例のいずれにおいても、振動体の厚みは  $t = 1 \mu m$ 、上記直径  $r = 10 \mu m$ 、振動体の構成素材はポリシリコンである。また、双方とも振動子の中央部に直径  $1 \mu m$  の円形状の支持部を設け、固有値解析を実施した。この計算に用いた振動体の材料定数は、ヤング率：160 GPa、ポアソン比：0.3、密度：2500 kg/m<sup>3</sup>とした。  
この結果、比較例の固有振動周波数は約 385 MHz であったのに対して、本実施形態の固有振動周波数は約 441 MHz となった。また、図 2 (b) に示すように、本実施形態の振動体 105 における、円弧部 105a, 105b 間の幅とくびれ部 105c, 105d 間の幅とが同相で伸縮する振動モードの固有振動周波数は 983 MHz となった。このように、本実施形態のマイクロメカニカル振動子は、従来構造の比較例に対して高周波化を図ることができることが確認された。

#### 【0065】

##### [第2実施形態]

次に、図 3 を参照して、本発明に係る第2実施形態のマイクロメカニカル静電振動子 200 について説明する。この振動子 200 は、上記第1実施形態の振動体とほぼ同様の平面形状を有する振動体 205 を有するが、この振動体 205 は、一対のくびれ部の中央部が梁状の支持部 204 に接続されることによって支持されている点で上記第1実施形態とは異なる。この支持部 204 は、振動体 205 を両側から梁状に支持し、ほぼ水平に（すなわち基板 201 の表面と平行に）伸びるように構成されている。また、支持部 204 の反対側は出力電極 203 に接続されている。

#### 【0066】

また、本実施形態では、振動体 205 の円弧部の中央部分に対して一対の加振電極 207, 207 がそれぞれ対向配置されている。そして、これらの加振電極 207, 207 には同相の交流電力が給電回路 210 の交流電源 211 及び給電線 212 により印加される。また、出力電極 203 には、出力回路 220 が接続されている。出力回路 220 には、第1実施形態と同様の、出力線 221、インダクタンス 222、電源電位 223、キャパシタンス 224、負荷抵抗 225、出力端子 226 が設けられる。

#### 【0067】

この実施形態においても、先の第1実施形態と同様に振動体 205 の高周波化を図ることができる。また、振動体 205 と支持部 204 とを同じ層で同じ高さを有するものとして構成することができるため、第1実施形態よりも成膜プロセスに余裕が生じ、迅速にかつ高い再現性をもって振動体を形成することが可能になる。

#### 【0068】

##### [その他の実施形態]

図 4 は、上記振動体の代わりに用いることのできる異なる平面形状を有する振動体の平面図である。図 4 (a) に示す振動体 2305 の平面形状は、中心の周りに 3 つの円弧部 2305a, 2305b, 2305c が設けられ、これらの円弧部間にそれぞれくびれ部 2305d, 2305e, 2305f が連結された輪郭を有する。また、図 4 (b) に示す振動体 2405 の平面形状は、4 つの円弧部 2405a, 2405b, 2405c, 2405d が設けられ、これらの円弧部間にそれぞれくびれ部 2405e, 2405f, 2405g, 2405h が連結された輪郭を有する。

#### 【0069】

##### [製造方法]

図 5 及び図 6 には、上記第1実施形態のマイクロメカニカル静電振動子 100 を製造するプロセス例を示す工程断面図を示す。このプロセスでは、最初に、図 5 (a) に示すように、シリコン基板などで構成される基板 101 上に SiO<sub>2</sub> で構成される絶縁層 102A と、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> で構成される絶縁層 102B とを形成する。絶縁層 102A は熱酸化法などで形成でき、また、絶縁層 102B はプラズマ CVD 法などで形成できる。絶縁層 102A と絶縁層 102B は、上記の絶縁膜 102 を構成する。

## 【0070】

次に、図5(b)に示すように、フォトリソグラフィ法などを用いて絶縁層102A, 102Bに開口102xを形成し、その上に、図5(c)に示すように蒸着法やスパッタリング法などを用いてアルミニウムなどの金属などからなる導電層103pを形成する。そして、フォトリソグラフィ法などでパターニングを行うことにより、図5(d)に示すように、出力電極103と、入力電極107pを形成する。

## 【0071】

その後、図5(e)に示すようにPSG(リンドープガラス)膜などからなる犠牲層108をCVD法などで形成し、さらに図5(f)に示すように開口108xを形成する。その後、図6(g)に示すように、ポリシリコンなどで導電層105Sを成膜する。このとき、開口108x内には支持部104が同時に形成される。さらに、図6(h)に示すように、レジストなどでマスク109を形成し、このマスク109を介して導電層105Sをパターニングすることで、図6(i)に示すように、振動体105、空隙106、及び、電極107を形成する。

10

## 【0072】

最後に、図6(j)に示すように、犠牲層108をエッチングなどで除去することにより、図1に示す振動子構造体が完成する。ここで、加振電極107は図示しない支持層(上記犠牲層などで構成される。)上に支持された状態となっており、また、加振電極107は図示しないコンタクトホールなどを介して基板上の入力電極107pに導電接続される。

20

## 【0073】

上記のように、本発明は、振動体の平面形状の輪郭にくびれを設けることにより、高周波化が可能になるとともに、このくびれによって振動体の伸縮振動モード(その輪郭が変動する様の振動モード)の制御が容易になり、より安定した伸縮振動を発生させることが可能になる。例えば、くびれ部を設けることによって複数の固有振動周波数をもつことになるため、電極構造や印加周波数などによって一つの振動体を異なる振動周波数で使い分けることも可能になる。また、第1実施形態の加振電極107と107のように異なる方位において振動体に対向配置される複数組の加振電極を設けておき、必要な周波数特性に応じて加振電極の組を使い分けることも可能である。

## 【0074】

30

本実施形態では、振動体は、その両側に配置される一対の加振電極に対して対称な平面形状となり得るものであることが安定した振動を発生させることができる点で好ましい。ここで、一対の加振電極に対して対称な形状とは、例えば、一対の加振電極の中心部を結ぶ線分の垂直二等分線を対称軸としたときの線対称形状であることを意味する。この場合にはさらに、一対の電極の中心部を結ぶ線分を対称軸とした線対称形状でもあることが望ましい。例えば、上記第1及び第2実施形態の振動体105, 205や図4(b)に示す振動体405は、このような高い対称性を実現しうる形状である。

## 【0075】

尚、本発明のマイクロメカニカル静電振動子は、上述の図示例にのみ限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において種々変更を加え得ることは勿論である。例えば、上記実施形態のマイクロメカニカル静電振動子は、入力回路と出力回路とを別々に有するものとして構成されているが、振動子の利用態様に応じて、入力回路と出力回路とを共通の回路構造で実現するなど、種々の構成を採用することができる。

40

## 【0076】

## [第3実施形態]

図7は、本発明に係る第3実施形態のマイクロメカニカル静電振動子300の構造を示す概略縦断面図(a)、概略平面図(b)及び振動体305の形状を示す拡大斜視図(c)である。この静電振動子300は、基板301上に絶縁層302を形成し、この絶縁層302上に、振動子構造体を形成したものである。基板301としては、シリコン単結晶、GaAsやInP等の化合物半導体などの半導体基板であることが好ましいが、ガラス

50

、石英、セラミックス、合成樹脂などの他の素材で構成されたものであっても構わない。また、絶縁層302は、基板301が絶縁体である場合には不要であるが、基板301が半導体や導体である場合、或いは、基板301は絶縁体であるがその表面上に導体パターンなどの導電体が存在している場合には必要となる。

#### 【0077】

振動子構造体は、基準電極303上に配置された支持体304を介して支持部305aが支持されてなる振動体305と、この振動体305の外縁305bに対向する加振電極306とを有する。基準電極303、支持体304及び振動体305は相互に導電接続されている。これらは或る程度の導電性を有する素材、例えばポリシリコンなどで構成される。振動体305は中央部を支持体304により支持された支持部305aとする板状体として構成されている。図示例では、振動体305は円盤状に形成されている。10

#### 【0078】

この振動体305の両側(図示左右側)には一対の加振電極306、306が配置されている。加振電極306は、振動体305の外縁305bに沿って伸びる電極面306aを有する。図示例では振動体305の外縁305bは円弧状に伸びた円筒凸面となっているので、加振電極306の電極面306aは、外縁305bの面形状に対応する面形状、すなわち円弧状に伸びた円筒凹面になっている。このように、振動体305の外縁305bと、加振電極306の電極面306aとの間には、両者の対向部の全体に亘って一定の間隔が存するように構成されている。

#### 【0079】

図示例の場合、基準電極303には接続端子(ボンディングパッド)303Aが導電接続され、加振電極306には接続端子(ボンディングパッド)306Aが導電接続されている。ただし、これらの接続端子303A、306Aを設けずに、例えば、基準電極303及び加振電極306を基板301に形成した回路内に導電接続しても構わない。20

#### 【0080】

本実施形態では、図7(b)に示すように、加振電極306に入力回路310Aが導電接続され、基準電極303に出力回路310Bが導電接続されている。入力回路310Aは加振電極306に駆動電圧を供給するものであり、例えば、交流電源311が設けられる。また、出力回路310Bは基準電極303の電位に基づいて出力電圧を出力するものであり、例えば、基準電極303とバイアス電位Vbとの間に接続されたインダクタンス312と、基準電極303と出力電位Voとの間に接続されたキャパシタンス313と、出力電位Voと接地電位との間に接続された抵抗314とを備えている。バイアス電圧Vbは基準電極303にバイアス電圧を印加するためのものである。ここで、出力電位Voはキャパシタンス313の充放電電流と抵抗314とによって得られた、基準電極303の電位変動に相当する電位変化を示す。30

#### 【0081】

本実施形態では、上記入力回路310Aに相当する部分から供給される入力信号を、振動体305と加振電極306の振動特性によって変調し、出力電位Voを得ることのできる高周波フィルタとして動作する。そのフィルタ特性は、振動体305の伸縮振動モードの特性に依存することになる。具体的には、入力信号によって振動体305と加振電極306との間に静電力が発生し、この静電力の変化(向きの交代)によって振動体305が伸縮振動する。振動体305が振動すると、振動体305と加振電極306との間の距離が変動するため、両者間の静電容量も変動し、この静電容量の変動に応じて出力電位Voも周期的に変化する。40

#### 【0082】

振動体305は、図7(c)に示すように、支持体304によって支持される支持部305aから外縁305bに向けて厚さが増大する形状を有している。具体的には、図示例の場合、支持部305aから半径方向外側に向けて所定範囲に亘って厚さの等しい部分があり、その外側に段差面305cが設けられ、この段差面305cよりも半径方向外側にある部分の厚さは、段差面305cよりも半径方向内側にある部分よりも大きくなっている50

る。図示例の場合、段差面 305c は振動体 305 の表面側と裏面側の双方に設けられている。また、段差面 305c は外縁 305b とは反対側、すなわち、中心側を向いた面となっている。

#### 【0083】

振動体 305 は、加振電極 306 によって板状体の主面（図示水平面）を振動面として伸縮変形し、伸縮モードの振動を行う。ここで、振動体 305 の上記厚さは振動面と直交する方向の幅である。振動体 305 はその厚さ方向に対称な形状（すなわち表裏対称形状）を有する。これによって、振動面上の振動状態を安定させ、振動面上にない副次的な振動モードの発生を抑制することができるため、振動エネルギーの無駄な散逸を防止することができる。

10

#### 【0084】

加振電極 306 に電力が供給されると、振動体 305 の外縁 305b と加振電極 306 との間に静電力が発生し、加振電極 306 に印加される電圧が交流電圧（交代電圧）であれば、振動体 305 の外縁 305b と加振電極 306 との間に静電斥力と静電引力とが交互に及ぼされる。これによって、振動体 305 は一対の加振電極 306 の間において周期的に収縮と伸長を繰り返すことになり、伸縮モードの振動が励起される。

#### 【0085】

このとき、加振電極 306 に印加される入力電圧の周波数が振動体 305 の伸縮モードの固有周波数と一致すれば、振動体 305 は共振し、その出力信号は大きくなる。したがって、本実施形態の静電振動子 300 はバンドパスフィルタや発振器として用いることができる。ここで、振動体 305 の直径が  $1 \sim 100 \mu\text{m}$  程度、厚さが  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  程度であるとき、振動体 305 に励起された伸縮振動の固有周波数は  $10 \text{ MHz} \sim 1 \text{ GHz}$  程度となる。

20

#### 【0086】

本実施形態では、振動体 305 は、その支持部 305a から外縁 305b に向けて厚さが増大する形状となっているため、外縁 305b と加振電極 306 との対向面積を増加させることができることから振動体 305 が受ける静電力が大きくなるとともに、振動体 305 の重量分布が外縁 305b 寄りに偏ったものとなるので、振動体 305 の伸縮振動に対する実効的な弾性率を高めることができる。したがって、振動体 305 の伸縮変位量を増加させることができることになるため、入力電圧に対する出力電圧の比を従来よりも高めることができる。

30

#### 【0087】

本実施形態の静電振動子 300 は、絶縁層 302 と振動体 305 及び加振電極 306 の間に  $\text{SiO}_2$ 、PSG（リンドープガラス）、有機樹脂などで構成される犠牲層を形成し、振動体 305 及び加振電極 306 を形成してから犠牲層をエッチングなどで取り除くことによって容易に形成できる。振動体 305 及び加振電極 306 はアルミニウムや銅などの金属のほか、ポリシリコンなどの半導体でも形成することができる。いずれの場合でも、蒸着法、スパッタリング法、CVD 法などの成膜技術と、フォトリソグラフィなどのパターニング技術とによって上記構造を形成することができる。

40

#### 【0088】

##### [第4実施形態]

次に、図 8 を参照して、本発明に係る第4実施形態の静電振動子 300 について説明する。この実施形態において、上記第3実施形態と同一部分には同一符号を付し、それらの説明は省略する。

#### 【0089】

この実施形態は、基本的に上記第3実施形態に設けられている要素の全てを含んでいるが、振動体 305 の段差面 305c に対向配置される第2の加振電極 307X, 307Y がさらに設けられている点で、上記第3実施形態と異なる。ここで、第2の加振電極 307X は振動体 305 の裏面（下面）上に設けられた段差面 305c に対向配置され、その段差面 305c 側にある加振電極 306 の電極面 306a に向いている。第2の加振電極

50

307Yは振動体305の表面(上面)上に設けられた段差面305cに対向配置され、その段差面305c側にある加振電極306の電極面306aに向いている。ここで、第2の加振電極307X, 307Yのうちいずれか一方のみを設けても構わない。

#### 【0090】

第2の加振電極307X, 307Yは、共通の接続端子(ボンディングパッド)307Aに導電接続されている。図8(b)に示すように、第2の加振電極307X, 307Yには、入力回路310Aに設けられた反転回路315から、上記加振電極306とは逆相の交流電圧(交代電圧)が供給される。これによって、図8(c)に示すように、振動体305の外縁305bと加振電極306との間に静電斥力が発生しているときには、振動体305の段差面305cと第2の加振電極307X, 307Yとの間に静電引力が発生し、振動体305の外縁305bと加振電極306との間に静電引力が発生しているときには、振動体305の段差面305cと第2の加振電極307X, 307Yとの間に静電斥力が発生するというよう駆動することができる。これによって、振動体305の伸縮振動を発生させるための静電力が増加するので、振動体305の伸縮変位量を増加させることができ、その結果、出力電圧(出力信号の振幅)を高めることができ、入力電圧に対する出力電圧の比を従来よりもさらに高めることができる。10

#### 【0091】

この実施形態では、第2の加振電極307X, 307Yを形成するために、第2の加振電極307Xと振動体305との間、及び、振動体305と第2の加振電極307Yとの間にそれぞれ犠牲層を介在させ、最後に犠牲層をエッチングなどにより取り除くことによつて第3実施形態と同様に製造することができる。20

#### 【0092】

##### [実施例と比較例との対比]

次に、上記第3実施形態の実施例と、第3実施形態の振動体305に代えて支持部305aから外縁305bまで同一の厚さを有する平行板状の振動体を用いた比較例とを対比した結果について説明する。なお、実施例と比較例とは、振動体の重量及び平均厚さが同一である。したがって、実施例の振動体は、比較例の中央側の部分の肉を一定量取り去り、その一定量の肉を外縁側に付加した形状となっている。

#### 【0093】

円盤型振動子の共振周波数fは、 $f = (\ / R) (E / \ )^{1/2}$ で表される。ここで、30  
は振動体のポアソン比と振動モードに依存する係数、Rは振動体の直径、Eは振動体のヤング率、は振動体の密度である。この式から、共振周波数は直径Rに反比例することがわかる。

#### 【0094】

図9は、実施例と比較例における振動体の直径と固有周波数との関係を示すグラフである。実施例と比較例のいずれも上記の式を反映し、振動数が直径に反比例する態様となっている。また、実施例は比較例に対して共振周波数がやや低くなっているが、実施例においても、基本的には数百MHzという高い周波数で振動することがわかる。ここで、振動体の材料はSiであり、ヤング率160Gpa、密度2500kg/m<sup>3</sup>としてある。

#### 【0095】

図10は、比較例の振動体における直径及び厚さと固有周波数との関係を示すグラフである。この図にてわかるように、円盤型振動子では、直径を小さくすれば固有周波数が高くなるが、厚さが変化しても固有周波数の変化はきわめて少ない。ところが、円盤型振動子の場合、伸縮モードで振動させるため、直径が小さくなると伸縮変位量がさらに小さくなり、入力電圧に対する出力電圧の比がさらに低下する。したがって、実施例の構造を用いて伸縮変位量を高めることにより、振動体の直径を小さくした場合でも、入力電圧に対する出力電圧の比を大きくすることができるという利点があることが理解できる。40

#### 【0096】

図11は、振動体を片持ち梁形状として屈曲モードで振動させた場合の、片持ち梁の支持部より先の長さと、固有周波数との関係を示すグラフである。屈曲モードの振動体では50

振動の変位量を大きく採ることができると、図示のように、固有周波数は数MHz程度であり、高周波化に適しないことがわかる。

#### 【0097】

次に、実施例と比較例の伸縮振動時における変位量を比較した。その結果を図16及び図17に示す。図16は実施例の変位量の分布を等変位量線で示し、図17は比較例の変位量の分布を等変位量線で示したものである。ここで、振動子の材料はSiであり、ヤング率170GPa、密度2500kg/m<sup>3</sup>とした。実施例と比較例の質量は同一で、同一荷重を与えて振動させるものとし、さらに同一モードで振動していると仮定し、変位量分布を求めた。図示のように、図17に示す実施例の方が図16に示す比較例に較べて変位量が大きくなっている。また、各振動子のばね定数を求めるとき、実施例では643N/m、比較例では1103N/mとなった。実施例ではね定数が低下することは、周波数が低下することも意味するが、同じ荷重を与えた場合には変位量（振幅）が大きくなることを意味する。ここで、実施例と比較例に同一の入力電圧を加えるとき、実施例の外縁305bの面積は比較例よりも大きいため、実施例の受ける応力（静電力）は比較例よりも大きくなるから、上記の図16と図17に示す場合よりも変位量の差はさらに大きくなるものと考えられる。10

#### 【0098】

##### [ その他の実施形態 ]

図12は、上記とは異なる振動体405の形状を示す概略斜視図である。この振動体405は上記第3及び第4実施形態の振動体の代わりに用いることができるものである。振動体405は、中心の支持部405aから外縁405bまでの間の複数箇所（図示例では2箇所）に段差面405c、405dが設けられている。このようにすると、重量分布はさらに外縁405b側に偏ることになるため、振動時の変位量をさらに高めることができる。20

#### 【0099】

図13は、さらに異なる振動体505の概略縦断面図である。この振動体505も上記第3及び第4実施形態の振動体の代わりに用いることができる。この振動体505では、支持体504によって支持される中央の支持部505aから外縁505bに向けて厚さが徐々に大きくなっている。このようにしても、外縁505b側に重量分布が偏ることになるとともに、外縁505bの面積を増大させることができるので、振動時の変位量をさらに高めることができる。30

#### 【0100】

図14は、別の振動体605の概略斜視図である。この振動体605もまた上記第3及び第4実施形態の振動体の代わりに用いることができる。この振動体605では、支持体604によって支持される支持部605aと、外縁605bとの間が2本の梁部605sによってのみ接続されている点で上記の振動体と異なる。この場合には、中心側の所定の半径位置における厚さの平均値よりも外縁側の所定の半径位置における厚さの平均値が大きくなっている。2本の梁部605sは支持部605aから相互に反対側に伸び、リング状の外縁605bに接続されている。40

#### 【0101】

図15は、さらに別の振動体705の概略斜視図である。この振動体705もまた上記第3及び第4実施形態の振動体の代わりに用いることができる。この振動体705では、支持体704によって支持される支持部705aと外縁705bとの間が4つの梁部705sによって接続されている。このように、支持部と外縁とを接続する梁部は何本であっても構わない。この場合にも、中心側の所定の半径位置における厚さの平均値よりも外縁側の所定の半径位置における厚さの平均値が大きくなっている。50

#### 【0102】

尚、本発明のマイクロメカニカル静電振動子は、上述の図示例にのみ限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において種々変更を加え得ることは勿論である。例えば、上記第3及び第4実施形態では、振動体の平面形状を円形としたが、本発明は

このような平面形状に限られず、円形以外の種々の平面形状（橒円、長円、矩形など）であっても構わない。また、上記第3及び第4実施形態では、振動体の中心が支持部となっているが、伸縮モードで振動するのであれば、振動体が片持ち支持されるなど、支持部が振動体の中心ではなく偏った位置にあっても構わない。

#### 【0103】

##### [第5実施形態]

図18は、本発明に係る第5実施形態のマイクロメカニカル静電振動子800の構造を示す概略縦断面図(a)及び概略平面図(b)である。このマイクロメカニカル静電振動子800は、基板801上に絶縁層802を形成し、この絶縁層802上に、振動子構造体を形成したものである。基板801としては、シリコン単結晶、GaAsやInP等の化合物半導体などの半導体基板であることが好ましいが、ガラス、石英、セラミックス、合成樹脂などの他の素材で構成されたものであっても構わない。また、絶縁層802は、基板801が絶縁体である場合には不要であるが、基板801が半導体や導体である場合、或いは、基板801は絶縁体であるがその表面上に導体パターンなどの導電体が存在している場合には必要となる。

#### 【0104】

振動子構造体は、基準電極803上に接続されてなる振動体805と、この振動体805に隣接配置された加振電極806とを有する。基準電極803及び振動体805は相互に導電接続されている。これらは或る程度の導電性を有する素材、例えばポリシリコンなどで構成される。振動体805は、基準電極803に下端が固定された支持部805aと、この支持部805aの上部に接続された従動部805bとを有している。従動部805bは、支持部805aよりも平面的に拡大された範囲に広がる形状を有している。具体的には、従動部805bは支持部805aを中心位置(重心位置でもある。)に接続されてなる板状体として構成されている。従動部805bは支持部805aを中心とする回転方向に見て変化する形状、すなわち、形状変化のない任意の物体を回転させたときの回転軌跡を占有する形状である回転体形状以外の形状を有する。図示例では、従動部805bは橒円盤状に形成されている。この実施形態において、従動部805bは、円柱状に形成された支持部805aの上部に片持ち支持された状態となっている。なお、図示例とは異なるが、従動部805bを上下の支持部によって両持ち状態で支持した構造としてもよい。

#### 【0105】

この振動体805の両側(図示左右側)には一対の加振電極806、806が配置されている。加振電極806は、振動体805の外縁805cに沿って伸びる電極面806aを有する。図示例では振動体805の外縁805cは橒円弧状に伸びた橒円筒凸面となっているので、加振電極806の電極面806aは、外縁805cの面形状に対応する面形状、すなわち橒円弧状に伸びた橒円筒凹面になっている。加振電極806の電極面806aは、振動体805の外縁805cのうち、支持部805aの軸線を中心とする回転方向の成分を有する方向を向いた表面部分に対向している。すなわち、加振電極806は、振動体805に対してそれぞれ偏心した位置(長軸及び短軸から回転方向にずれた位置)において対向配置されている。

#### 【0106】

図示例の場合、基準電極803には接続端子(ボンディングパッド)803Aが導電接続され、加振電極806には接続端子(ボンディングパッド)806Aが導電接続されている。ただし、これらの接続端子803A、806Aを設けずに、例えば、基準電極803及び加振電極806を基板801に形成した回路内に導電接続しても構わない。

#### 【0107】

本実施形態では、図18(b)に示すように、加振電極806に入力回路810Aが導電接続され、基準電極803に出力回路810Bが導電接続されている。入力回路810Aは加振電極806に駆動電圧を供給するものであり、例えば、交流電源811が設けられる。また、出力回路810Bは基準電極803の電位に基づいて出力電圧を出力するものであり、例えば、基準電極803とバイアス電位Vbとの間に接続されたインダクタン

10

20

30

40

50

ス 8 1 2 と、基準電極 8 0 3 と出力電位  $V_o$  との間に接続されたキャパシタンス 8 1 3 と、出力電位  $V_o$  と接地電位との間に接続された抵抗 8 1 4 を備えている。バイアス電圧  $V_b$  は基準電極 8 0 3 にバイアス電圧を印加するためのものである。ここで、出力電位  $V_o$  はキャパシタンス 8 1 3 の充放電電流と抵抗 8 1 4 によって得られた、基準電極 8 0 3 の電位変動に相当する電位変化を示す。

#### 【 0 1 0 8 】

本実施形態では、上記入力回路 8 1 0 A に相当する部分から供給される入力信号を、振動体 8 0 5 と加振電極 8 0 6 の振動特性によって変調し、出力電位  $V_o$  を得ることのできる高周波フィルタとして動作する。そのフィルタ特性は、振動体 8 0 5 の揺れ振動モードの特性に依存することになる。具体的には、入力信号によって振動体 8 0 5 と加振電極 8 0 6 との間に静電力が発生し、この静電力の変化（向きの交代）によって振動体 8 0 5 が揺れ振動する。振動体 8 0 5 が振動すると、振動体 8 0 5 と加振電極 8 0 6 との間の距離が変動するため、両者間の静電容量も変動し、この静電容量の変動に応じて出力電位  $V_o$  も周期的に変化する。10

#### 【 0 1 0 9 】

図 1 9 は、振動体 8 0 5 の振動様子を示す説明図（a）及び（b）である。図 1 9（a）に示すように、従動部 8 0 5 b と加振電極 8 0 6 との間に静電斥力が発生するときには、振動体 8 0 5 は図示反時計回りに回転させようとする回転トルクを受けることになり、その弾性特性に応じた揺れ変位が発生する。次に、従動部 8 0 5 b と加振電極 8 0 6 との間に静電引力が発生するときには、振動体 8 0 5 は図示時計回りに回転させようとする回転トルクを受けることになり、その弾性特性に応じた揺れ変位が発生する。したがって、従動部 8 0 5 と加振電極 8 0 6 との間に静電斥力と静電引力とを交互に発生させることによって振動体 8 0 5 は揺れ振動する。20

#### 【 0 1 1 0 】

なお、振動体 8 0 5 に揺れ振動を生じさせる方法としては、上記のように静電斥力と静電引力とを交互に印加する方法に限らず、静電斥力と静電引力のいずれか一方を周期的に印加する方法であっても構わない。また、実施形態では、振動体 8 0 5 に対して一対の加振電極 8 0 6 が設けられているが、一つの加振電極だけを設けてもよく、或いは、3 以上の加振電極 8 0 6 を設けてもよい。

#### 【 0 1 1 1 】

上記のように振動体 8 0 5 が振動するとき、加振電極 8 0 6 に印加される入力電圧の周波数が振動体 8 0 5 の揺れモードの固有周波数と一致すれば、振動体 8 0 5 は共振し、その出力信号は大きくなる。したがって、本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子 8 0 0 はバンドパスフィルタや共振器として用いることができる。ここで、例えば、振動体 8 0 5 の上部の長径が  $10 \mu m$ 、短径が  $5 \mu m$ 、厚さが  $2 \mu m$  であり、支持部 8 0 5 a の直径が  $2 \mu m$ 、長さが  $5 \mu m$ 、振動体 1 0 5 の構成材料がポリシリコンであるとき、振動体 8 0 5 の揺れ振動の固有周波数は約  $15 \sim 20 MHz$  程度となる。30

#### 【 0 1 1 2 】

本実施形態では、振動体 8 0 5 の揺れ振動を用いているため、屈曲振動を用いる場合よりも高い周波数で振動させることができるとともに、伸縮振動（縦振動）を用いる場合よりも大きな変位量を得ることができることから、入力電圧に対する出力電圧の比を従来よりも高めることができ、入力電圧（駆動電圧）の低電圧化を図ることができる。特に、振動体 8 0 5 が支持部 8 0 5 a と、この支持部 8 0 5 a に接続された拡大された従動部 8 0 5 b とによって構成されているので、静電力により受ける回転トルクが大きくなり、効率的に揺れ振動を生じさせることができるとともに、揺れ振動の変位量を大きくすることができるので、入力電圧に対する出力電圧の比を大きくすることができる。40

#### 【 0 1 1 3 】

本実施形態では、支持部 8 0 5 a が従動部 8 0 5 b の重心位置に接続されているので、従動部 8 0 5 b の支持部 8 0 5 a による支持状態が安定しているため、駆動電極 8 0 6 から静電力を受けたときでも、揺れ方向以外の振動が生じにくいことから、安定した姿勢で50

捩れ振動することができ、振動エネルギーのロスも少ない。

#### 【0114】

本実施形態の静電振動子800は、絶縁層802と振動体805及び加振電極806との間にSiO<sub>2</sub>、PSG(リンドープガラス)、有機樹脂などで構成される犠牲層を形成し、振動体805及び加振電極806を形成してから犠牲層をエッチングなどで取り除くことによって容易に形成できる。振動体805及び加振電極806はアルミニウムや銅などの金属のほか、ポリシリコンで形成することもできる。特に、振動体805及び加振電極806をポリシリコンで構成する場合には、シリコン半導体プロセスをそのまま適用することができ、特にシリコン基板上に形成する場合にきわめて容易に製造することができる。いずれの場合でも、蒸着法、スパッタリング法、CVD法などの成膜技術と、フォトリソグラフィなどのパターニング技術とによって上記構造を形成することができる。10

#### 【0115】

##### [第6実施形態]

次に、図20を参照して、本発明に係る第6実施形態の静電振動子900について説明する。この実施形態において、振動体905及び駆動電極906以外の構成は、上記第5実施形態と同一に構成することができるため、それらの説明は省略する。

#### 【0116】

この実施形態において、振動体905は、下端が固定された支持部905aと、この支持部905aの上端に接続された従動部905bとを有する。従動部905bは、支持部905aに対する接続部分から周囲に放射状に伸びる複数の輻状部905sと、これらの輻状部905sの先端に接続された環状の外輪部905cとを備えている。図示例では、輻状部905sは90度間隔で4本設けられている。輻状部905sの間は、捩れ振動の振動面と直交する方向に貫通する開口部905tとなっている。20

#### 【0117】

一方、加振電極906は上記の開口部905tの内部に配置されている。図示例では複数の開口部905tにそれぞれ加振電極906が配置されている。加振電極906は、静電力が印加されていない初期状態においては、開口部905tのうち、軸線周りの回転方向のいずれか一方に偏った位置に配置され、輻状部905sの側面905saに対向配置されている。そして、従動部905bと加振電極906との間に静電斥力が生じるようにすると、加振電極906から輻状部905sが離反する方向に振動体905が回転し、図21(a)に示すように、振動体905は図示反時計回りに捩れる。また、従動部905bと加振電極906との間に静電引力が生じるようにすると、加振電極906に輻状部905sが接近する方向に振動体905が回転し、図21(b)に示すように、振動体905が図示時計回りに捩れる。したがって、振動体905と加振電極906との間に静電斥力と静電引力とを交互に発生させることによって振動体905は捩れ振動する。30

#### 【0118】

なお、振動体905に捩れ振動を生じさせる方法としては、上記のように静電斥力と静電引力とを交互に印加する方法に限らず、静電斥力と静電引力のいずれか一方を周期的に印加する方法であっても構わない。また、実施形態では、振動体905に対して4つの加振電極906が設けられているが、加振電極906の数は任意である。さらに、上記実施形態では振動体905の一端(下端)のみを固定しているが、両端支持であっても構わない。40

#### 【0119】

本実施形態でも、支持部905aが従動部905bの重心位置に接続されているので、従動部905bの支持部905aによる支持状態が安定しているため、駆動電極906から静電力を受けたときでも、捩れ方向以外の振動が生じにくいくことから、安定した姿勢で捩れ振動することができ、振動エネルギーのロスも少ない。

#### 【0120】

##### [振動モードと振動子の固有振動数との関係]

次に、上記第5及び第6実施形態の捩れ振動を用いた振動子と、屈曲振動を用いた振動

50

子と、伸縮振動（縦振動）を用いた振動子との関係について説明する。

#### 【0121】

捩れ振動を用いる振動子の固有振動数  $f_b$  は、振動体を長さ  $L$  の棒状体とした場合、

$$f_b = (B_n / 2L) (G / \rho)^{1/2} \dots (1)$$

で表される。ここで、 $B_n$  は振動体の棒端の条件と、振動次数によって定まる係数であり、両端固定の場合、 $B_n = n = 1, 2, 3, \dots$  となり、一端固定、他端自由の場合、 $B_n = n - 1/2 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$  である。また、 $G$  は  $G = E / \{\rho \cdot (1 + \nu)\}$  ( $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比) であり、 $\rho$  は密度である。

#### 【0122】

一方、屈曲振動（曲げ振動）を用いる振動子の固有振動数  $f_a$  は、振動体を長さ  $L$  の棒状体とした場合、  
10

$$f_a = (A_n / L^2) (E I / m)^{1/2} \dots (2)$$

で表される。ここで、 $A_n$  は振動体の棒端の条件と、振動次数によって定まる係数であり、両端固定の場合、 $A_1 = 4.730, A_2 = 7.853, A_3 = 10.996, \dots$  ( $1 - \cosh A \cdot \cos A = 0$  の解) となり、一端固定、他端自由の場合、 $A_1 = 1.875, A_2 = 4.694, A_3 = 7.855, \dots$  ( $1 + \cosh A \cdot \cos A = 0$  の解) である。また、 $E$  はヤング率、 $I$  は振動体の断面 2 次モーメントであり、例えば、断面が円の場合には  $I = d^4 / 64$  ( $d$  は直径) である。 $m$  は振動体の断面積  $S$  と密度の積である。

#### 【0123】

さらに、伸縮振動（縦振動）を用いる振動子の固有振動数  $f_s$  は、振動体を長さ  $L$  の棒状体とした場合、  
20

$$f_s = (B_n / 2L) (E / \rho)^{1/2} \dots (3)$$

で表される。ここで、 $B_n$  は振動体の棒端の条件と、振動次数によって定まる係数であり、両端固定の場合、 $B_n = n = 1, 2, 3, \dots$  となり、一端固定、他端自由の場合、 $B_n = n - 1/2 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$  である。また、 $E$  はヤング率、 $\rho$  は密度である。

#### 【0124】

捩れ振動と屈曲振動とを比較すると、固有振動数は振動体の長さ  $L$  の値によって大小関係が変化する。具体的には、 $L = L_x = (2A_n / B_n) \cdot (2(1 + \nu)I / S)^{1/2}$  (30  
 $S$  は振動体の断面積) を境として捩れ振動と屈曲振動の固有振動数の大小が入れ替わる。すなわち、振動体の長さ  $L$  が  $L_x$  よりも長くなると捩れ振動の固有振動数の方が高くなり、振動体の長さ  $L$  が  $L_x$  よりも短くなると屈曲振動の固有振動数の方が高くなる。通常の実用範囲においては、長さ  $L$  と断面積  $S$  との関係で、捩れ振動の方が屈曲振動よりも固有振動数は高くなる。また、実際には、屈曲振動においては  $L$  を小さくすれば振動数が増大するが、振動変位量は逆に小さくなるため、入力電圧に対する出力電圧の比が小さくなる。

#### 【0125】

また、捩れ振動と伸縮振動（縦振動）とを比較すると、両者の固有振動数の比は、 $[1 / \{\rho \cdot (1 + \nu)\}]^{1/2}$  となり、常に捩れ振動の方が低い固有振動数を有するが、その差は僅かである。一方、捩れ振動では、上記実施形態のように支持部と拡大された従動部とを有する形状などによって振動変位量を大きくとることができると、伸縮振動では振動変位量は僅かであり、入力電圧に対する出力電圧の比は小さい。  
40

#### 【0126】

以上のように、本実施形態では、捩れ振動モードを用いていることによって、或る程度の高周波化が可能でありながら、振動変位量を大きく確保できるため、入力電圧に対する出力電圧の比を大きくし、入力電圧の低減を図ることができる。

#### 【0127】

尚、本発明のマイクロメカニカル静電振動子は、上述の図示例にのみ限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において種々変更を加え得ることは勿論である  
50

。例えば、上記第5及び第6実施形態では、振動体を円柱状の支持部の上に板状の静電力を受ける部分が接続されてなる構造としたが、本発明はこのような平面形状に限られず、従動部が支持部よりも拡大された範囲に広がる形状を有するものであればよく、例えば、支持部に接続される部分から半径方向外側に伸びる棒状の従動部を有する構造であっても構わない。また、上記第5及び第6実施形態の振動体では、支持部が従動部の重心位置に接続されているが、支持部を従動部の重心位置からはずれた位置に接続させてなるものであっても構わない。さらに、上記第5及び第6実施形態は、基本的には従動部が静電力を受けることにより支持部が捩れ変形するように構成されているが、支持部とともに従動部もまた捩れ変形するように構成されたものであってもよく、或いは、支持部はほとんど変形しないが、従動部が主として捩れ変形するように構成されたものであっても構わない。

10

### 【0128】

#### [第7実施形態]

図22は、本発明に係る第7実施形態のマイクロメカニカル静電振動子1000のを示す概略縦断面図、すなわち(b)に示すA-A線に沿った断面を示す概略断面図(a)、概略平面図(b)、及び、上記(a)と直交する断面、すなわち(b)のC-C線に沿った断面を示す概略断面図(c)である。

### 【0129】

このマイクロメカニカル静電振動子1000の基本構成は、シリコン基板、ガラス基板、石英基板、セラミック基板などで構成される基板1001の上に $\text{SiO}_2$ 、PSG(リンドープガラス)、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ などの金属酸化物、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ などの窒化シリコン、アクリル樹脂などの合成樹脂などで構成される絶縁層1002が形成されている。絶縁層1002は、基板1001が導電体基板である場合や半導体基板であるときに、基板と、その上層の導電体との間を絶縁するためのものである。

20

### 【0130】

基板1001としては、シリコン基板であっても、導電体或いは半導体であって、或る程度の導電性を有する場合と、真性半導体のような絶縁性を有する場合とがあるが、前者の場合には特に絶縁層1002が必要となる。また、後者の場合には絶縁層1002は必ずしも必要ない。さらに、基板1001としてはガラス基板、石英基板、セラミック基板などの絶縁体を用いることも可能であり、このような場合でも、絶縁層1002は不要となる。なお、絶縁性を有する基板1001を用いている場合でも、その表面上に配線パターンなどの導電膜が形成されている場合には、上層との絶縁を確保するために絶縁層1002が必要となる場合がある。この絶縁層1002として、半導体集積回路が構成されたシリコン基板上の表面被覆用の絶縁層をそのまま用いることも可能である。

30

### 【0131】

絶縁層1002の上には、ポリシリコンなどで構成された電極層1004S及び1004Mを備えた電極部である振動子構造体1004が形成されている。ここで、電極層1004Sの電極1004Sa及び電極層1004Mの電極1004Maは共に下層(絶縁層1002)に対して離反した形で相互に対向配置されている。本実施形態では、電極層1004Sと1004Mとの間に所定電圧を印加し、電極1004Saと電極1004Maとの間に静電力を発生させることにより、主として電極1004Maが電極1004Saに対して接近及び離反する方向に移動するように構成されている。このとき、電極1004Saは下層に固定され、電極1004Maのみが下層に対して離反した状態に構成されていてもよい。また、電極1004Saと1004Maの双方が共に移動するように構成されていてもよい。

40

### 【0132】

また、上記振動子構造体1004の形成領域に隣接する領域には絶縁層1003が形成されている。この絶縁層1003は、図示例では振動子構造体1004の形成領域の片側に設けられているが、当該形成領域の両側にそれぞれ設けられていてもよい。絶縁層1003は、 $\text{SiO}_2$ 、PSG(リンドープガラス)、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ などの金属酸化物、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ などの窒化シリコン、アクリル樹脂などの合成樹脂などで構成される。絶縁層1

50

003は誘電率の低い素材、特に、絶縁層1002よりも低い誘電率を有するもので構成されていることが好ましい。絶縁層1003の誘電率を低くするには、絶縁層1003を本質的な低誘電率素材で構成するほか、絶縁層1003を多孔質素材で構成したり、後述するように空間を設けたりする方法が挙げられる。多孔質素材の例としては多孔質シリカ、例えばメソポーラスシリカが挙げられる。絶縁層1003の厚さ $t_1$ は、絶縁層1002の厚さよりも少なくとも厚く形成されていることが好ましい。

#### 【0133】

絶縁層1003の表面(上面)には、上記電極層1004S及び1004Mに導電接続された配線部1005SL, 1005MLが伸びているとともに、これらの配線部1005SL, 1005MLに導電接続された接続端子1005SP, 1005MPが設かれている。これらの配線部1005SL, 1005ML及び接続端子1005SP, 1005MPは上記の配線層を構成する。配線層はアルミニウムなどの良導体で構成されることが好ましい。10

#### 【0134】

本実施形態では、絶縁層1002上に電極層1004S, 1004Mが形成され、絶縁層1002上にさらに積層されてなる絶縁層1003上に配線部1005SL, 1005MLの一部及び接続端子1005SP, 1005MPが形成されているが、配線部1005SL, 1005MLの全てが絶縁層1003上に構成されていてもよく、さらに、図22(b)に点線で示すように絶縁層1003に延長部1003<sub>1</sub>を形成することで、電極層1004S, 1004Mのうち電極1004Sa, 1004Ma以外の部分を絶縁層1003上に形成してもよい。また、本実施形態では、一対の軸状の電極層1004S, 1004Mが並列に配向配置されているが、従来構造のような櫛歯形状を備えた電極同士が相互に噛合する態様で対向配置されたものとしてもよい。20

#### 【0135】

本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子1000は、上記において説明した振動子構造体1004に相互に対向する電極1004Saと1004Maとを設けて、これらの電極のうちの少なくとも一方を振動させるようにし、図示例のように上記の電極のうちの主として振動する一方の電極1004Maが振動体であり、他方の電極1004Saは加振電極として構成される。ただし、上記の電極1004Maの代わりに上記第1乃至第6実施形態の振動体若しくは従動部を設け、上記の電極1004Saの代わりに上記第1乃至第6実施形態の加振電極を設けてもよい。このように構成することで、上記第1乃至第6実施形態の振動体又は加振電極に導電接続された配線層を有し、配線層と基板の距離が振動体又は加振電極と基板の距離よりも大きくなるように構成することができるため、振動子構造体と基板との間の寄生容量を低減することができる。30

#### 【0136】

図23は、本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子1000をパッケージ内に封止した状態を示す概略縦断面図である。このマイクロメカニカル静電振動子1000は、上記電極層1004Mの電極1004Maを機械的に振動させることによって動作するものであるので、セラミックスや合成樹脂など絶縁素材で構成されるパッケージ1011, 1012内に収容することが好ましい。特に、電極の振動を容易にするためには、パッケージ内を真空状態(真空パッケージ)とすることが好ましい。パッケージ1011には、内部端子1013S, 1013Mと、この内部端子1013S, 1013Mにそれぞれ導電接続された外部端子1014S, 1014Mが形成されている。そして、上記接続端子1005SP, 1005MPは、導電ワイヤ1015などによって内部端子1013S, 1013Mにそれぞれ導電接続されている。40

#### 【0137】

また、本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子1000において、基板1001をシリコン基板などで構成することによって、基板1001内に所定の回路構造(例えば、半導体集積回路)を設けることができる。そして、この場合には、内部端子1016及びこれに導電接続された外部端子1017を設け、内部端子1016に導電ワイヤ1018

などを介して上記回路構造を導電接続させることもできる。このようにすると、マイクロメカニカル静電振動子 1000 と所定の回路構造とを一体に構成することが可能になる。なお、このマイクロメカニカル静電振動子 1000 は、図示例のようにパッケージ 1011, 1012 に収容するのではなく、表面実装デバイス (SMD) などのように回路基板などに直接実装して用いることも可能である。

#### 【0138】

##### [ 製造方法 ]

次に、図 25 を参照して上記第 7 実施形態の製造方法について説明する。最初に、図 25 (a) に示すように、基板 1001 の表面上に絶縁層 1002 を形成する。絶縁層 1002 は、CVD 法などで直接成膜してもよく、或いは、液状やペースト状の基材をスピニング法、ロールコーティング法、印刷法などによって塗布し、加熱処理などによって硬化させてもよい。10

#### 【0139】

次に、図 25 (b) に示すように、絶縁層 1002 上にポリシリコンなどで構成される第 1 導体層 1004C と、SiO<sub>2</sub>、PSG (リンドープガラス)、有機樹脂などで構成される第 1 犠牲層 1004D とを形成する。これらはそれぞれフォトリソグラフィ法などを用いることによって容易に構成できる。その後、上記第 1 導体層 1004C の上にさらに同じ導体材料を配置し、上記第 1 犠牲層 1004D の上にさらに同じ犠牲材料を配置することによって、図 25 (c) に示すように、犠牲層 1004D によって支持された電極 1004Sa, 1004Ma (1004Sa は図示せず) を有する電極層 1004S, 1004M を形成する。ここで、上記各導体層は CVD 法やスパッタリング法などで形成することができ、上記犠牲層はスパッタリング法やゾル - ゲル法などで形成することができる。20

#### 【0140】

次に、図 26 (a) に示すように、上記のように構成された電極構造を PSG や合成樹脂などで構成される保護層 1006 で被覆した状態とし、図 26 (b) に示すように、CVD 法やスパッタリング法、ゾル - ゲル法などにより、電極形成領域に隣接する領域に絶縁層 1003 を形成する。この絶縁層 1003 は上記絶縁層 1002 と同様の方法で構成できるが、多孔質素材で絶縁層 1003 を構成する場合にはゾル - ゲル法を用いることができる。例えば、多孔質シリカは、アルコキシシランなどのガラス構成材料を含む溶液を塗布し、乾燥させる (アルコールなどの溶媒を揮発させる) ことによって構成できる。30

#### 【0141】

本実施形態の場合、絶縁層 1003 は上記電極 1004Sa, 1004Ma が動作する動作領域には形成されていない。このような選択的な絶縁層 1003 の形成方法としては、マスキング法、リフトオフ法、フォトリソグラフィ法などを用いることができる。このように、絶縁層 1003 を基板 1001 上において部分的に形成することは、絶縁層 1003 を全面的に基板 1001 上に形成した場合に生ずる可能性のある基板 1001 の反りなどを防止する上で有効である。また、絶縁層 1003 を動作領域の両側に形成したり、動作領域を取り囲むように形成したりすることにより、製造工程において動作領域上に構成された可動部分を有する脆弱な電極構造を保護することができるという利点もある。40

#### 【0142】

その後、上記の保護層 1006 を除去し、絶縁層 1002, 1003 の表面上にアルミニウムなどの導体を蒸着法、スパッタリング法などを用いて成膜し、フォトリソグラフィ法等によってパターニングすることによって、図 26 (c) に示すように、上述の配線層、すなわち、配線部 1005SL, 1005ML 及び接続端子 1005SP, 1005MP を形成する。そして、最後に、上記の犠牲層 1004D をエッチングなどによって除去することにより、図 22 に示す振動子構造体が形成される。

#### 【0143】

##### [ 作用効果 ]

図 27 は、上記実施形態のマイクロメカニカル静電振動子の等価回路図である。マイク50

ロメカニカル静電振動子 1000 の等価回路には、接続端子 1005SP と 1005MP との間に静電容量 Ca, インダクタンス La, 抵抗 Ra の直列回路と、この直列回路と並列に接続される並列容量(short Capacitance) Cs とが存在する。ここで、上記直列回路部分は静電振動子の入出力特性をもたらす部分であり、並列容量 Cs は電極 1004Sa と 1004Ma との間の静電容量の定常成分に相当するものである。

#### 【0144】

本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子では、以上の回路構成に対してさらに並列に、電極層 1004S, 1004M、配線部 1005SL, 1005ML 及び接続端子 1005SP, 1005MP と、基板 1001 との間の静電容量である寄生容量 Co が存在する。そして、上記のように、配線部 1005SL, 1005ML 及び接続端子 1005SP, 1005MP で構成される配線層が絶縁層 1003 の厚さ ti (図 22(c) 参照) 分だけ電極 1004Sa, 1004Ma よりも基板 1001 から離れた位置に配置されていることにより、上記の寄生容量 Co は低減される。すなわち、配線層と基板 1001 との間に生ずる静電容量は、 $C = S / t$  ( $C$  は静電容量、 $t$  は誘電率、 $S$  は電極面積、 $t$  は電極間距離) の式において電極間距離  $t$  が上記絶縁層 1003 の厚さ  $ti$  分だけ大きくなることによって小さくなる。また、この静電容量は、絶縁層 1003 の誘電率が絶縁層 1002 (上記請求項 18 の絶縁体に相当する) の誘電率よりも小さくなれば、上記の式において誘電率  $\epsilon$  が実質的に小さくなることによってさらに小さくなる。

#### 【0145】

このように、上記配線層を電極よりも基板 1001 から離反させることにより寄生容量 Co を小さくすることができるので、容量 Co, Cs, Ca に配分されていた電気エネルギーがより多く Cs と Ca に配分されるようになる。その結果、マイクロメカニカル静電振動子 1000 の出力電圧を大きくすることができ、また、駆動電圧を低減することも可能になる。

#### 【0146】

図 28 は、本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子 1000 のインピーダンスの周波数依存性を模式的に示すグラフである。ここで、図示二点鎖線は本実施形態のインピーダンスを示し、図示点線は従来構造の静電振動子のインピーダンスを示している。上記のように構成することによって寄生容量 Co を小さくすることができるため、本実施形態では従来構造よりもインピーダンスが低減されている。

#### 【0147】

なお、上記実施形態では、絶縁層 1002 の上に絶縁層 1003 を部分的に積層しているが、絶縁層 1002 を動作領域に限定して形成し、絶縁層 1003 を動作領域に隣接する領域において基板 1001 上に直接形成してもよい。また、基板 1001 上に一体の絶縁層を形成しておき、この絶縁層のうち、動作領域上に形成されている部分を選択的にエッチングなどによって薄肉化することによって上記実施形態と同様の表面段差を形成するようにしてもよい。

#### 【0148】

##### [第 8 実施形態]

図 24 は、本発明に係る第 8 実施形態のマイクロメカニカル静電振動子 1100 を示す概略縦断面図である。この実施形態では、基板 1101、絶縁層 1102、電極層 1104S, 1104M、電極 1104Sa, 1104Ma、配線部 2005SL, 2005ML、接続端子 2005SP, 2005MP はそれぞれ上記第 1 実施形態と同様であるので、それらの説明は省略する。

#### 【0149】

このマイクロメカニカル静電振動子 1100 においては、配線部 1105SL, 1105ML 及び接続端子 1105SP, 1105MP で構成される配線層が絶縁層 1103 上に構成されている点では、上記第 7 実施形態と同様である。ただし、絶縁層 1103 の内部には空間 1103a が設けられている。これによって、配線層と基板 1101 との間の誘電体の実質的な誘電率が空間 1103a の厚さ分だけ絶縁層 1103 の誘電率よりもさ

10

20

30

40

50

らに低下するために、配線層と基板 1101との間の静電容量もさらに低下する。したがって、上記の寄生容量  $C_o$  をさらに低減できる。

#### 【0150】

上記空間 1103a は、例えば、絶縁層 1103 の第 1 層を形成した後に、図示しない犠牲層（ポリシリコン、PSG、有機樹脂などで構成できる。）を形成し、この犠牲層上にさらに絶縁層 1103 の第 2 層を積層し、その後、上記の犠牲層をエッチングなどで除去することによって構成できる。

#### 【0151】

本実施形態において、上記空間は絶縁層 1103 の内部に形成されているが、本発明はこのような態様に限らず、空間が絶縁層 1103 と配線層の間に設けられていたり、絶縁層 1103 と絶縁層 1102 との間に設けられていたりしてもよいなど、配線層と基板 1101との間であればいずれに空間が設けられていても構わない。

#### 【0152】

**[第 9 実施形態]**

図 29 は、本発明に係る第 9 実施形態のマイクロメカニカル静電振動子の縦断面図である。このマイクロメカニカル静電振動子 1200 は、ガラス、石英、セラミックスなどの絶縁体で構成された基板 1201 上に、出力電極 1203 と、この出力電極 1203 に導電接続された支持部 1204 と、支持部 1204 に導電接続されて支持される振動体 1205 と、この振動体 1205 の両側において振動体 1205 の外縁に対向するように配置される一対の加振電極 1207, 1207 とを備えた振動子構造体を有している。なお、この実施形態では、基板 1201 上に構成された振動子構造体が上記第 1 実施形態と同様に構成されているので、上記振動子構造体の詳細については説明を省略する。

#### 【0153】

本実施形態では、基板 1201 が絶縁体からなるので、上記の振動子構造体と基板 1201との間に寄生容量が生じないことから、寄生容量に起因する出力電圧の低下やエネルギー効率の低下を防止することができる。この点は、上記第 7 及び第 8 実施形態において説明したところと同様であるので、これ以上の詳細は省略する。ただし、本実施形態では、基板 1201 を絶縁体からなるものとすることにより、上記第 7 及び第 8 実施形態のように基板との間の寄生容量を低減するのではなく、当該寄生容量そのものがほとんど発生しないという点で、より効果的な構成となっている。特に、基板 1201 をガラスで構成することにより、基板材料を安価に入手できるとともに、製造時の各種処理を容易に実施することができるため、製造コストを低減することができる。

#### 【0154】

**[第 10 実施形態]**

図 30 は、本発明に係る第 10 実施形態のマイクロメカニカル静電振動子の縦断面図である。このマイクロメカニカル静電振動子 1300 は、ガラス、石英、セラミックスなどの絶縁体で構成された基板 1301 上に、基準電極 1303 と、この基準電極 1303 に導電接続された支持部 1304 と、支持部 1304 に導電接続されて支持される振動体 1305 と、この振動体 1305 の両側において振動体 1305 の外縁に対向するように配置される一対の加振電極 1307, 1307 とを備えた振動子構造体を有している。なお、この実施形態では、基板 1301 上に構成された振動子構造体が上記第 3 実施形態と同様に構成されているので、上記振動子構造体の詳細については説明を省略する。

#### 【0155】

本実施形態では、基板 1301 が絶縁体からなるので、上記の振動子構造体と基板 1301との間に寄生容量が生じないことから、寄生容量に起因する出力電圧の低下やエネルギー効率の低下を防止することができる。この点は、上記第 9 実施形態と同様である。また、基板 1301 をガラスで構成することにより、基板材料を安価に入手できるとともに、製造時の各種処理を容易に実施することができるため、製造コストを低減することができる。

#### 【0156】

10

20

30

40

50

なお、上記の第2、第4乃至第8実施形態においても、上記の第9及び第10実施形態と同様に、その基板を絶縁体で構成することができる。これらの場合には、基板上に形成される絶縁層は不要となる。ただし、この絶縁層を他の目的、例えば、基板表面を平滑化する目的、基板上に構成される上記振動子構造体の密着性を高める目的などで絶縁体からなる基板上に形成することを何等妨げるものではない。

### 【0157】

#### [第11実施形態]

図31及び図32は、本発明に係る第11実施形態のマイクロメカニカル静電振動子の製造方法を示す工程図である。ここで、本実施形態は、上記第9実施形態のマイクロメカニカル静電振動子1200を製造する場合を例示するものであり、図31及び図32において、図29に示した部分と同一部分には同一の符号を付してある。また、以下の説明においてはSOI(Silicon On Insulator)基板1260を用いてマイクロメカニカル静電振動子1200を製造する場合を例に挙げて説明するが、シリコン基板1261上に絶縁膜及びポリシリコン(p-SiO)膜を形成することで、SOI基板1260を用いる場合とほぼ同様の工程で製造することもできる。

10

### 【0158】

本実施形態では、図31(a)に示す通り、シリコン基板1261上に絶縁膜としての二酸化珪素(SiO<sub>2</sub>)からなる絶縁膜1262及び減圧気相成長(減圧CVD(Chemical Vapor Deposition))法を用いて形成され、その半導体層としてのシリコン層1263が順に形成されたSOI基板1260を用いる。上記シリコン基板1261は両面が研磨されており、厚さが約500μm程度である。また、絶縁膜1262は厚さが0.1μm程度に形成され、シリコン層1263は厚さが10~20μm程度に形成される。

20

### 【0159】

まず、図31(a)に示すSOI基板1260に形成されたシリコン層1263の上面全体に亘ってフォトレジスト(不図示)を塗布し、このフォトレジストに対して露光処理及び現像処理を行って、所定形状のレジストパターンを形成する。この処理で形成されるレジストパターンには、図29に示す振動子構造体の形成領域に開口部が形成される。より具体的には、振動体1205及び加振電極1207となるべき領域に開口部が形成される。ただし、出力電極1203及び支持部1204となるべき領域には開口部は形成されない。

30

### 【0160】

次いで、このレジストパターンをマスクとしてSOI基板1260のシリコン層1263に対してエッチング処理を行い、シリコン層1263を数μm程度除去する。エッチング処理が完了すると、図31(b)に示す通り、シリコン層1263における振動体1205及び加振電極1207となるべき領域に凹部1263aが形成される。ただし、出力電極1203及び支持部1204となるべき箇所のシリコン層1263の領域1263bは除去されずに残される。その後、シリコン層1263上に形成されているレジストパターンは除去される。以上は上記の凹部形成工程を構成する。

### 【0161】

なお、上記の工程において、エッチングによって凹部1263aを形成するのではなく、図31(a)に点線で示すように、パターニングされたシリコン層を繰り返し積層することによって、図31(b)に示す凹部1263aを含む表面構造を形成してもよい。

40

### 【0162】

次に、SOI基板1260に形成されたシリコン層1263とガラス等で構成される基板1201の表面とを向かい合わせて陽極接合により接合する。ここで陽極接合とは、ガラス等の絶縁基板とシリコン基板又は金属等とを密着接合する方法であって、重ね合わせた基板を加熱しするとともにシリコン基板を陽極として両者の間に高電圧を付加することにより、電気的二重層を発生させ、静電引力により基板同士を接合する方法である。基板1201としてガラス基板を用いる場合には、ガラス基板が軟化する程度に加熱が行われる。この陽極接合を用いることにより、図25(c)に示す通り、基板1201上にSO

50

I 基板 1260 が接合される。尚、SOI 基板 1260 と基板 1201 とを陽極接合する際に、基板 1201 上に予め電極を形成し、この電極とシリコン層 1263 の上記出力電極 1203 や加振電極 1207 となるべき部位とが電気的に接続されるようにすることが好ましい。以上が上記の基板接合工程である。

#### 【0163】

以上の工程が終了すると、基板 1201 に接合された SOI 基板 1260 の薄板化を行う。この処理では、SOI 基板 1260 の絶縁膜 1262 をエッティングストップ層として用い、エッティングによりシリコン基板 1261 を除去する。このときのエッティングについては、ウェットエッティング及びドライエッティングの何れを用いることもできる。ドライエッティングを採用した場合、例えば誘導結合プラズマ (ICP) 等を利用することができる。尚、このエッティングに先だって、絶縁膜 1262 が露出する直前までシリコン基板 1261 を研削（粗研磨）し、その後、上記のエッティングを行って残りのシリコン基板 1261 を除去することが好ましい。このようにすれば、処理時間を短縮して生産性を向上することができる。シリコン基板 1261 の研削には CMP 法（化学的機械的研磨法）を用いるのが好ましい。

10

#### 【0164】

シリコン基板 1201 の除去を行うと、図 32 (a) に示す通り、基板 1201 上にシリコン層 1263 と絶縁膜 1262 とが形成された状態になる。次に、基板 1201 上に形成された絶縁膜 1262 上の全面に亘ってフォトレジスト（不図示）を塗布し、このフォトレジストに対して露光処理及び現像処理を行って所定形状のレジストパターンを形成する。次いで、このレジストパターンをマスクとして絶縁膜 1262 に対してエッティング処理を行って、図 32 (b) に示す通り、D-RIE (Deep Reactive Ion Etching) 用のマスクを形成する。マスクの形成が終了すると、絶縁膜 1262 上に形成されているレジストパターンを除去する。

20

#### 【0165】

以上の工程が終了すると、絶縁膜 1262 をマスクとして D-RIE によりシリコン層 1263 のエッティングを行い、図 32 (c) に示すように、基板 1201 上に出力電極 1203、支持部 1204、振動体 1205 及び加振電極 1207 を形成する。これが上記の振動子形成工程である。以上の工程を終えると、図 31 (b) に示す上記の凹部 1263a に相当する部分が振動体 1205 及び加振電極 1207 と基板 1201 との間の空隙になり、図 29 に示すマイクロメカニカル静電振動子 1200 が形成される。

30

#### 【0166】

##### [第 12 実施形態]

次に、本発明に係る第 12 実施形態のマイクロメカニカル静電振動子の製造方法について説明する。図 33 は、本実施形態のマイクロメカニカル静電振動子の製造方法の一部を示す工程図である。尚、図 33において、図 29 に示した部分に対応する部分には同一の符号に を付して示してある。この第 12 実施形態についても、上記の第 11 実施形態と同様に、上記の第 9 実施形態のマイクロメカニカル静電振動子 1200 に相当するものを製造する例を示したものである。したがって、上記第 11 実施形態と同様に他の実施形態のマイクロメカニカル静電振動子を製造する場合にも適用できる。また、上記の第 11 実施形態と同様に、以下の説明においては SOI 基板 1260 を用いて製造する場合を例に挙げて説明するが、シリコン基板 1261 上に絶縁膜及びポリシリコン (p-SiO<sub>x</sub>) 膜を形成することで、SOI 基板 1260 を用いる場合とほぼ同様の工程で製造することもできる。

40

#### 【0167】

本実施形態では、まず図 33 (a) に示す通り、基板 1201 の表面の全面に亘ってフォトレジスト（不図示）を塗布し、このフォトレジストに対して露光処理及び現像処理を行って、所定形状のレジストパターンを形成する。この処理で形成されるレジストパターンには、後の工程で張り合わされる SOI 基板 1260 の振動子構造体（振動体 1205 及び加振電極 1207）が形成されるべき位置に向き合う部分に開口が形成され

50

ている。

**【0168】**

次いで、このレジストパターンをマスクとして基板1201の表面に対してエッティング処理を行い、基板1201の表面を数 $\mu\text{m}$ 程度除去する。尚、支持部1204となるべき箇所が接合される部位1201bは除去せずに残しておく。エッティング処理が完了し、基板1201上に形成されているレジストパターンを除去すると、上記部位1201bに出力電極1203を形成する。この出力電極1203はアルミニウム等の金属やポリシリコンなどの半導体などで構成することができる。

**【0169】**

次に、SOI基板1260に形成されたシリコン層1263と基板1201の表面とを向かい合わせて陽極接合により接合する。この陽極接合により、図33(b)に示す通り、基板1201上にSOI基板1260が接合される。尚、本実施形態においてもSOI基板1260と基板1201とを陽極接合する際に、基板1201上に形成されている出力電極1203やその他の配線などとシリコン層1263とが電気的に接続される。

10

**【0170】**

基板1201とSOI基板1260との接合を終えると、上記の実施形態と同様に、SOI基板1260のシリコン基板1261を除去する工程、D-RIEのマスクを絶縁膜1262を用いて形成する工程、及び、絶縁膜1262をマスクとしてD-RIEを用いたエッティング工程を行うことにより、図33(c)に示すように、振動体1205及び加振電極1207が形成され、最終的に上記の図29に示すマイクロメカニカル静電振動子1200と等価な構造が構成される。

20

**【0171】**

以上説明した通り、本実施形態においては、絶縁体の基板1201, 1201の表面とSOI基板1260, 1260のシリコン膜(活性層)1263, 1263とを向かい合わせて接合し、SOI基板1260, 1260に対して処理の加工を施し、振動子構造体を形成しているため、これらの振動子構造体と基板1201, 1201との間の寄生容量が生じないマイクロメカニカル静電振動子1200を安価に効率よく製造することができる。

**【0172】**

30

また、SOI基板1260, 1260と基板1201, 1201とを接合する前に、SOI基板1260, 1260に形成されたシリコン層1263, 1263、又は、基板1201, 1201の表面をエッティングにより除去して凹部1263a, 1201aを形成しているため、これらの凹部によって振動体1205, 1205と基板1201, 1201との間に空隙をきわめて容易に設けることができる。また、絶縁体の基板としてガラス基板を用いることにより、低い製造コストで高性能のマイクロメカニカル静電振動子を得ることができる。

**【図面の簡単な説明】**

**【0173】**

【図1】第1実施形態の概略構成平面図(a)及び縦断面図(b)。  
【図2】第1実施形態の振動モードを示す説明図(a)及び(b)並びに従来の円盤状の振動体の振動モードを示す説明図(c)。

40

【図3】第2実施形態の概略構成平面図(a)及び縦断面図(b)。

【図4】異なる振動体の平面形状の例を示す平面図(a)及び(b)。

【図5】第1実施形態の製造工程を示す工程断面図(a)-(f)。

【図6】第1実施形態の製造工程を示す工程断面図(e)-(j)。

【図7】第3実施形態の概略縦断面図(a)、概略平面図(b)及び振動体の拡大斜視図(c)。

【図8】第4実施形態の概略縦断面図(a)、概略平面図(b)及び振動体の外縁部近傍の拡大断面図(c)。

50

【図9】円盤振動子の直径と周波数との関係について実施例と比較例を対比して示すグラフ。

【図10】円盤振動子の比較例における直径及び厚さと周波数との関係を示すグラフ。

【図11】片持ち梁の屈曲振動モードにおける梁の長さと周波数との関係を示すグラフ。

【図12】異なる振動体の形状を示す概略斜視図。

【図13】さらに異なる振動体の形状を示す概略縦断面図。

【図14】別の振動体の形状を示す概略斜視図。

【図15】さらに別の振動体の形状を示す概略斜視図。

【図16】実施例の振動体の振動時における変位量分布を等変位量線で示す変位量分布図

。

【図17】比較例の振動体の振動時における変位量分布を等変位量線で示す変位量分布図

。

【図18】第5実施形態の概略縦断面図(a)及び概略平面図(b)。

【図19】第5実施形態の振動体の駆動態様と動作を示す説明図(a)及び(b)。

【図20】第6実施形態の振動体の概略斜視図。

【図21】第6実施形態の振動体の駆動態様と動作を示す説明図(a)及び(b)。

【図22】第7実施形態の概略縦断面図(a)、概略平面図(b)、及び、(a)に示すと直交する方向に沿った断面を示す概略縦断面図(c)。

【図23】第7実施形態のパッケージ構造を示す概略縦断面図。

【図24】第8実施形態の概略縦断面図。

【図25】第7実施形態の製造方法を示す概略工程断面図(a)～(c)。

【図26】第7実施形態の製造方法を示す概略工程断面図(a)～(c)。

【図27】第7実施形態の等価回路図。

【図28】第7実施形態の挿入損失及びインピーダンスの周波数特性を示すグラフ。

【図29】第9実施形態を示す縦断面図。

【図30】第10実施形態を示す縦断面図。

【図31】第11実施形態の製造方法を示す工程図(a)～(c)。

【図32】第11実施形態の製造方法を示す工程図(a)～(c)。

【図33】第12実施形態の製造方法の一部を示す工程図(a)～(c)。

【符号の説明】

【0174】

100…マイクロメカニカル静電振動子、101…基板、102…絶縁層、103…出力電極、104…支持部、105…振動体、105a, 105b…円弧部、105c, 105d…くびれ部、106…空隙、107…電極、110…入力回路、120…出力回路、300…マイクロメカニカル静電振動子、301…基板、302…絶縁層、303…基準電極、304…支持体、305…振動体、305a…支持部(中心部)、305b…外縁、305c…段差面、306…加振電極、307X, 307Y…第2の加振電極、310A…入力回路、310B…出力回路、800…マイクロメカニカル静電振動子、801…基板、802…絶縁層、803…基準電極、805…振動体、805a…支持部、805b…従動部、805c…外縁、806…加振電極、810A…入力回路、810B…出力回路、1000…マイクロメカニカル静電振動子、1001…基板、1002…絶縁層、1003…絶縁層、1004S, 1004M…電極層、1004Sa, 1004Ma…電極、1005SL, 1005ML…配線部、1005SP, 1005MP…接続端子、1006…保護層、1103a…空間。

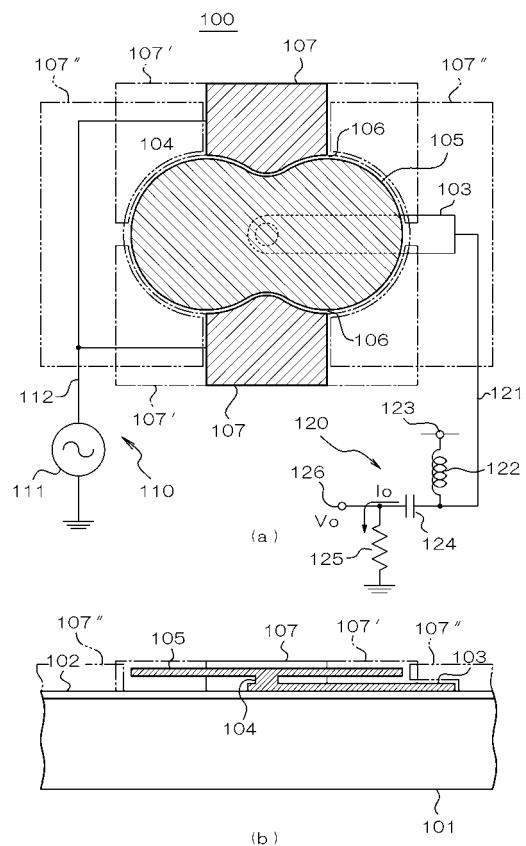
10

20

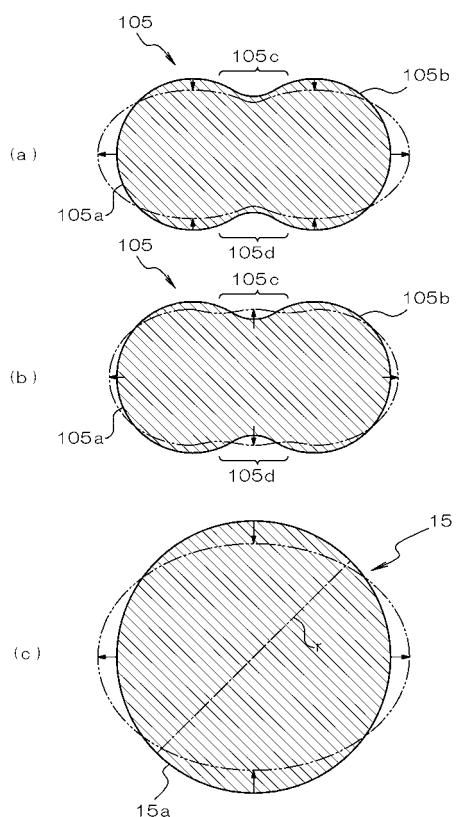
30

40

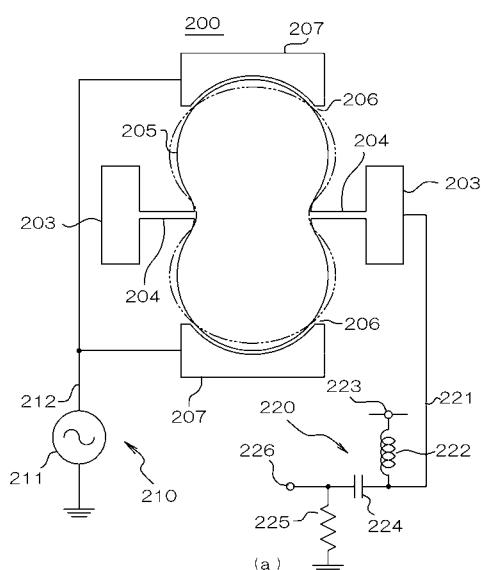
【図1】



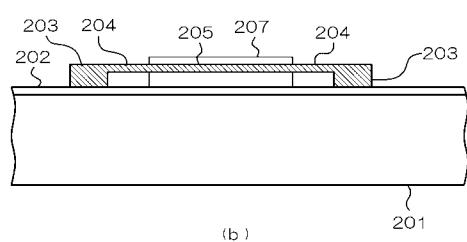
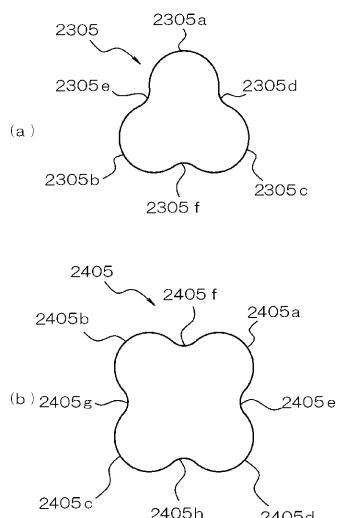
【図2】



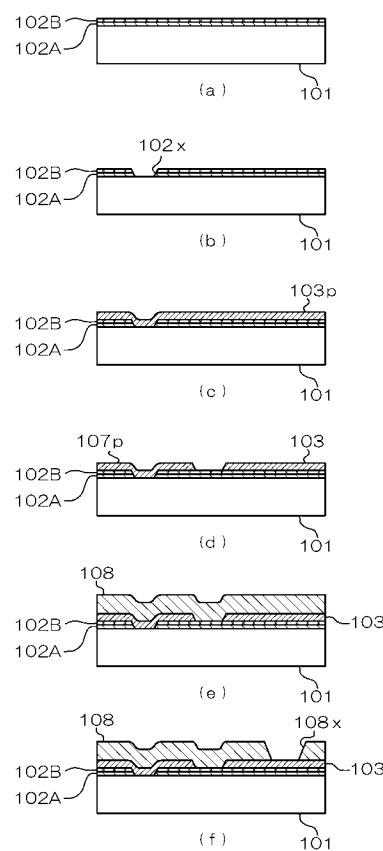
【図3】



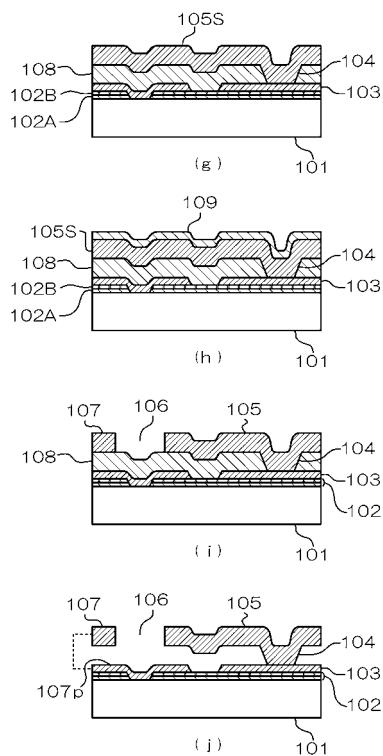
【図4】



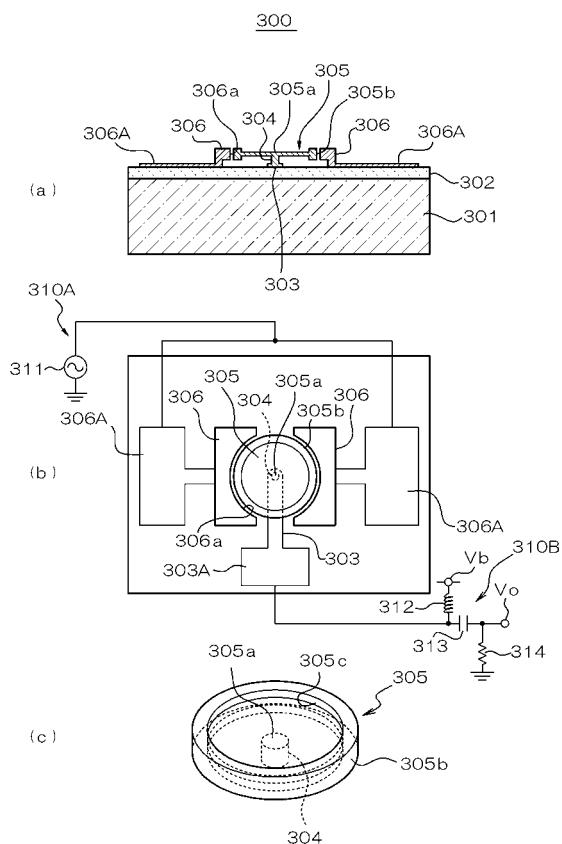
【図5】



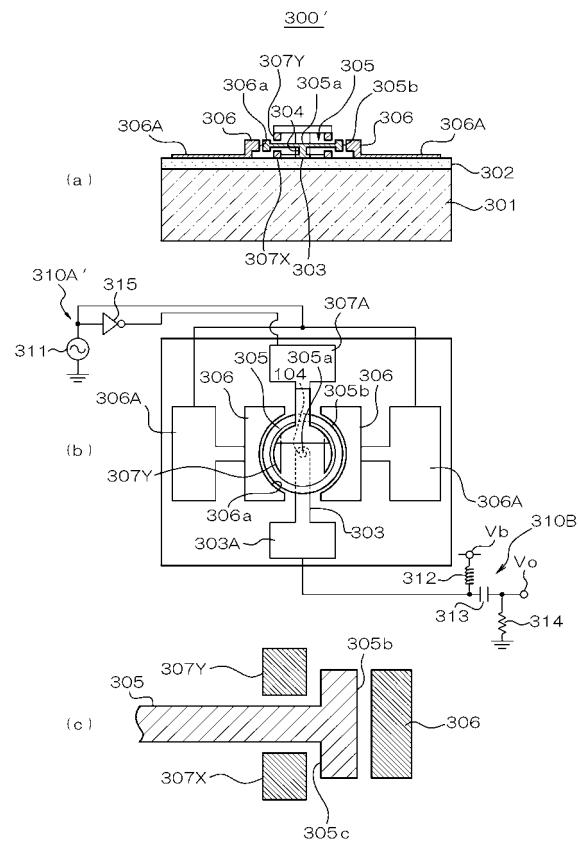
【図6】



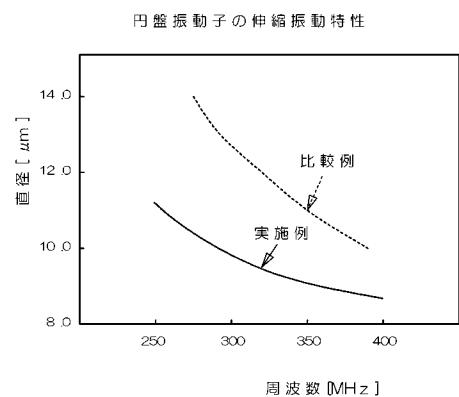
【図7】



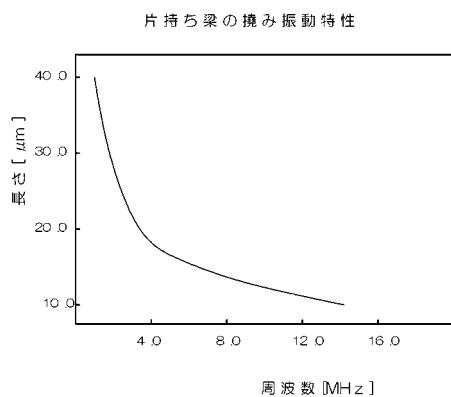
【図8】



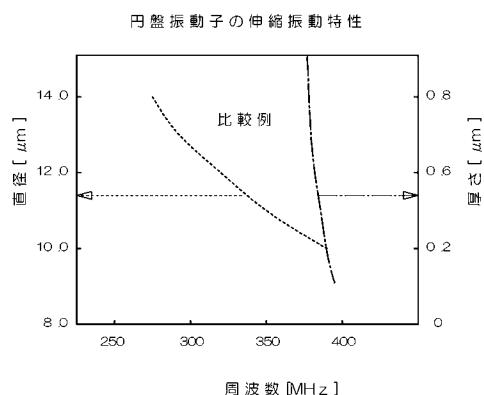
【図 9】



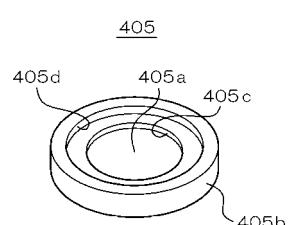
【図 11】



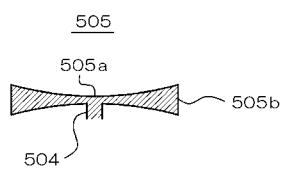
【図 10】



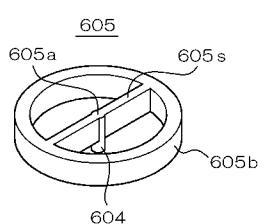
【図 12】



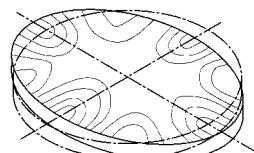
【図 13】



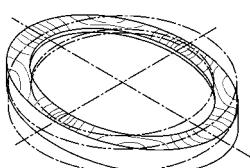
【図 14】



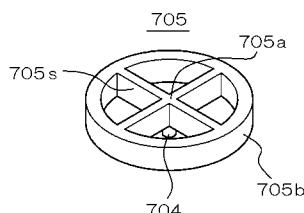
【図 16】



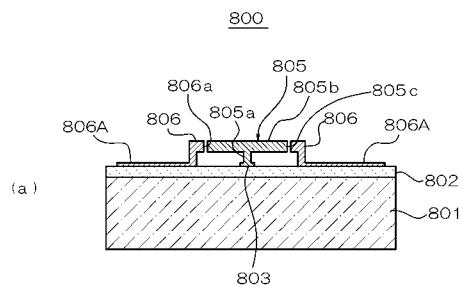
【図 17】



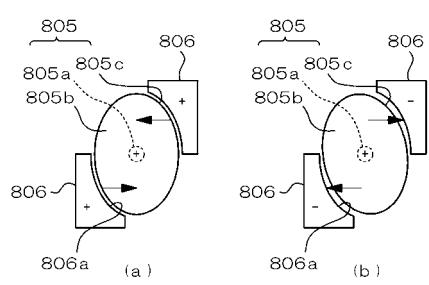
【図 15】



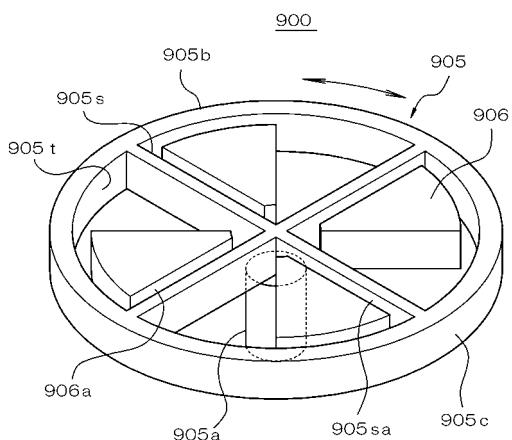
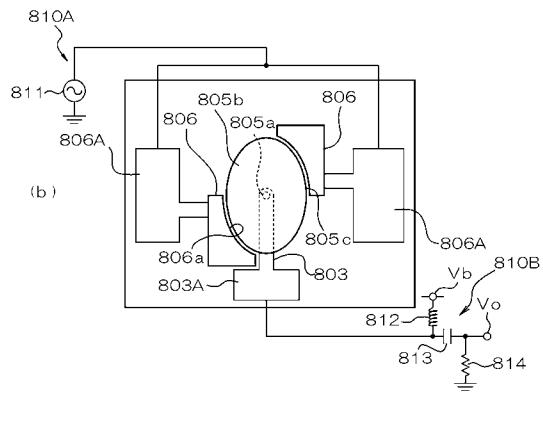
【図18】



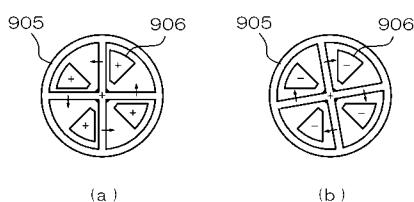
【図19】



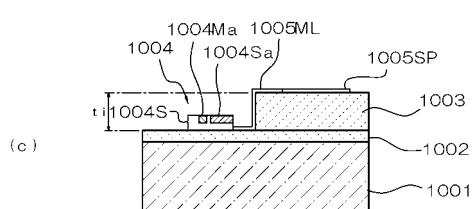
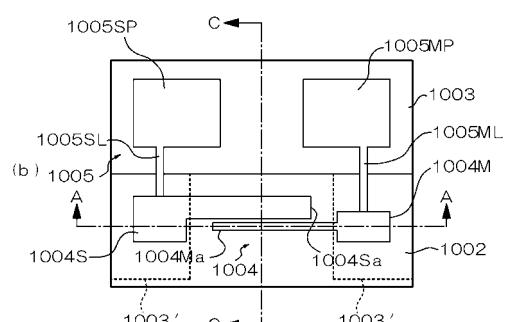
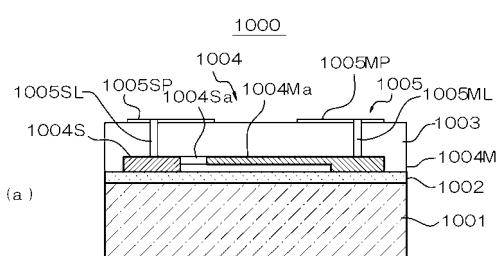
【図20】



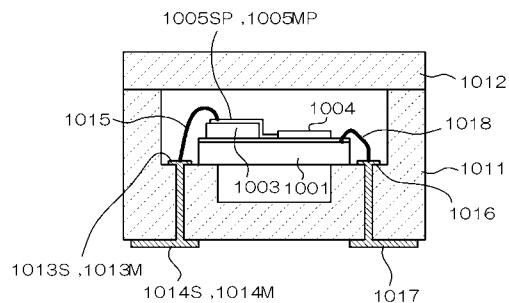
【図21】



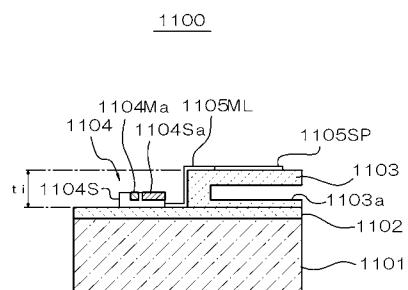
【図22】



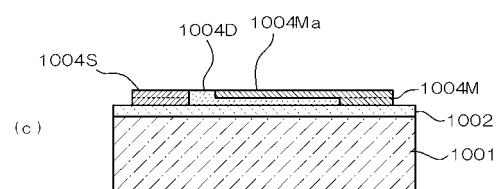
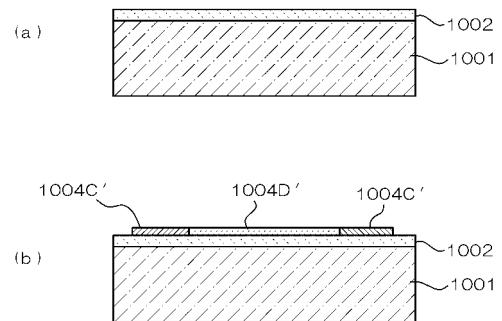
【図23】



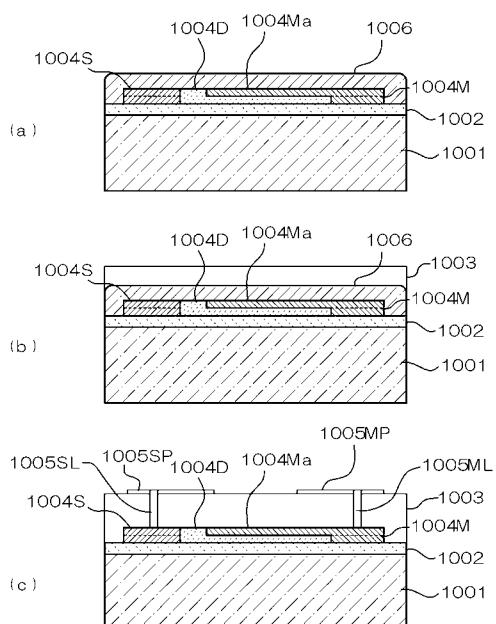
【図24】



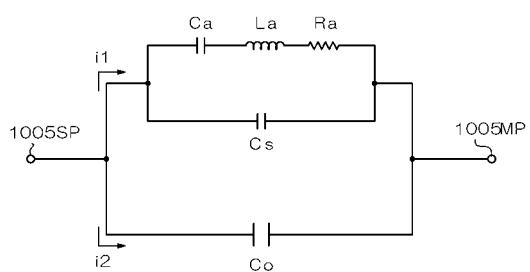
【図25】



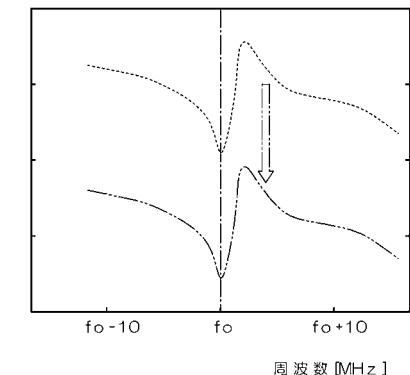
【図26】



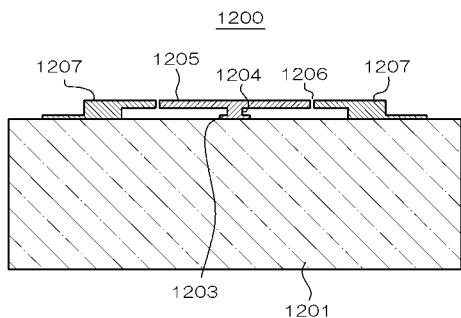
【図27】



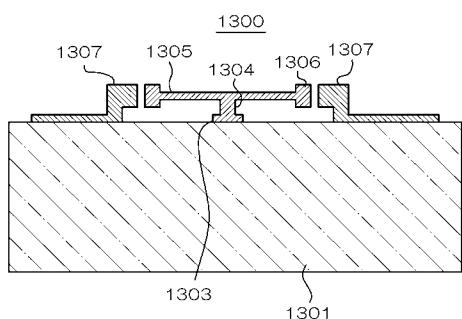
【図28】



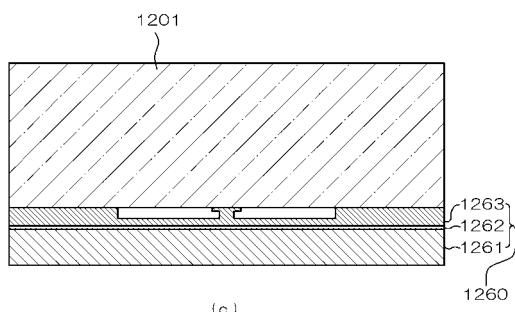
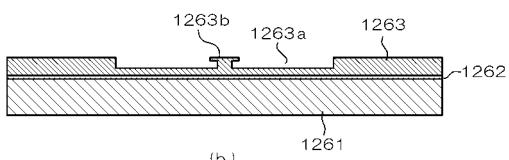
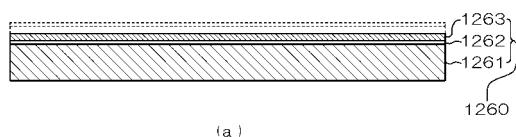
【図29】



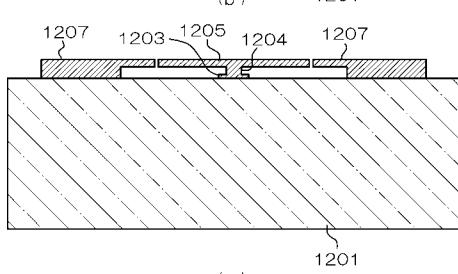
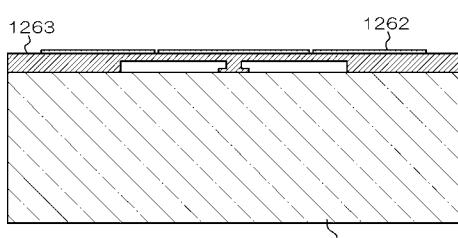
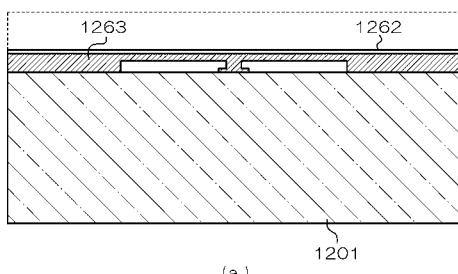
【図30】



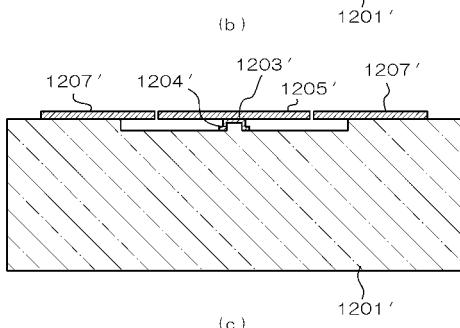
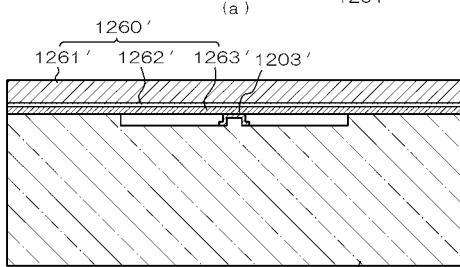
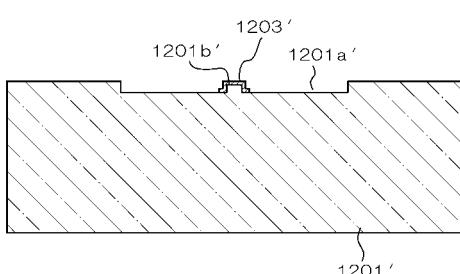
【図31】



【図32】



【図33】



---

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I  
H 03H 9/24 (2006.01) H 03H 9/24 Z

(31)優先権主張番号 特願2004-54182(P2004-54182)

(32)優先日 平成16年2月27日(2004.2.27)

(33)優先権主張国 日本国(JP)

早期審査対象出願

(72)発明者 古畠 誠  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内

審査官 塩澤 正和

(56)参考文献 特開平04-070516 (JP, A)  
特開平08-273981 (JP, A)  
国際公開第02/017482 (WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B 81B	3 / 0 0
B 81C	3 / 0 0
H 02N	1 / 0 0
H 02N	2 / 0 0
H 03H	3 / 0 0 7
H 03H	9 / 2 4