

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-181670

(P2006-181670A)

(43) 公開日 平成18年7月13日(2006.7.13)

| (51) Int. Cl. | F I | テーマコード (参考) |
|-----------------------|---------------|-------------|
| B81C 1/00 (2006.01) | B81C 1/00 | 5F043 |
| H03H 3/007 (2006.01) | H03H 3/007 M | |
| H03H 9/24 (2006.01) | H03H 9/24 Z | |
| H01L 21/306 (2006.01) | H01L 21/306 B | |

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 15 頁)

| | | | |
|-----------|------------------------------|----------|---|
| (21) 出願番号 | 特願2004-376534 (P2004-376534) | (71) 出願人 | 000005821 松下電器産業株式会社 |
| (22) 出願日 | 平成16年12月27日 (2004.12.27) | (74) 代理人 | 100115107 弁理士 高松 猛 |
| | | (74) 代理人 | 100108589 弁理士 市川 利光 |
| | | (74) 代理人 | 100119552 弁理士 橋本 公秀 |
| | | (72) 発明者 | 橋村 昭範 大阪府門真市大字門真1006番地 松下 電器産業株式会社内 |
| | | Fターム(参考) | 5F043 AA02 BB02 FF01 FF02 |

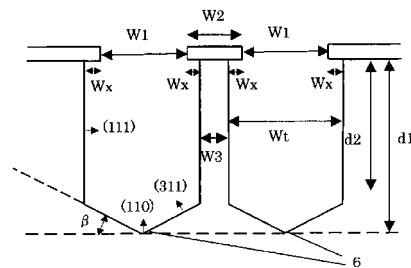
(54) 【発明の名称】 細線の製造方法およびそれを用いた電気機械フィルタ

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 細線の長さおよび厚さを安定して再現性よく提供することのできる細線の製造方法を提供する。また、安定で寸法精度の高い細線で接続された電気機械フィルタをも提供する。

【解決手段】 表面が(110)面を有する単結晶シリコン基板に、異方性エッチングでエッチングされる深溝を形成することにより、(110)面に対して垂直に形成される深溝で囲まれた幅 w_3 、深さ d_2 の細線を形成する方法において、深溝の(311)面が現れる深さ d_1 よりも細線の深さ d_2 が浅くなるように、マスクレイアウトを設計するようにする。

【選択図】 図5



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

表面が(110)面を有する単結晶シリコン基板に、異方性エッチングで<110>方位にエッチングされる深溝を形成することにより、(110)面に対して垂直に形成される深溝で囲まれた幅W3、深さd2の細線を形成する方法であって、

前記深溝の(311)面が現れる深さd1よりも細線の深さd2が浅くなるように、マスクレイアウトを設計するようにしたことを特徴とする細線の製造方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の細線の製造方法であって、

下式を満たすように、マスクレイアウトを設計するようにしたことを特徴とする細線の製造方法。

$$d1 > d2$$

【数 1】

$$d1 = \frac{\tan \beta \times (W1 + W2 - W3) \times R(110)}{2 \times [R(110) - R(311) \cos \beta]} \quad (\text{式 1})$$

W1:マスクの開口幅

W2:マスク幅

W3:細線幅

β : (110)面と(311)面とのなす角

10

20

【請求項 3】

請求項 2 に記載の細線の製造方法であって、

前記シリコン基板は、表面からの深さが前記d1よりも浅い位置にエッチングストップ層を具備しており、

前記エッチング工程は前記エッチングストップ層に到達するまでエッチングする第 1 の工程と、前記マスク幅よりも内側までエッチングするアンダーカットを進行させ、所望の細線幅W3となるまでエッチングする第 2 の工程とを含み、前記第 1 および第 2 の工程は連続工程であることを特徴とする細線の製造方法。

30

【請求項 4】

請求項 2 に記載の細線の製造方法であって、

前記シリコン基板は、シリコン基板表面に酸化膜を介して単結晶シリコン層を形成したSOI基板であり、前記エッチング工程は前記酸化膜をエッチングストップ層としてエッチングする工程であることを特徴とする細線の製造方法。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の細線の製造方法であって、

前記細線の幅はナノメートルサイズであることを特徴とする細線の製造方法。

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の細線の製造方法であって、

前記エッチング工程は、TMAH (Tetramethyl Ammonium Hydroxide)をエッチャントとしてエッチングする工程であることを特徴とする細線の製造方法。

40

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の細線で構成され、機械的振動可能に形成された振動体と、

前記振動体に対して所定の間隔を隔てて配設された電極とを有し、電気機械変換を可能にする電気機械共振器を含むことを特徴とするMEMSフィルタ装置。

【請求項 8】

請求項 7 に記載のMEMSフィルタ装置であって、

前記電気機械共振器が、連結体を介して複数個連結され、

50

前記連結体が前記細線で構成されたことを特徴とするMEMSフィルタ装置。

【請求項9】

機械的振動可能に形成された振動体と、前記振動体に対して所定の間隔を隔てて配設された電極とを有し、電気機械変換を可能にする電気機械共振器を、請求項1乃至6のいずれかに記載の細線で構成された連結体を介して複数個連結してなることを特徴とするMEMSフィルタ装置。

【請求項10】

機械的振動可能に形成された振動体と、前記振動体に対して所定の間隔を隔てて配設された電極とを有し、電気機械変換を可能にする電気機械共振器を、請求項1乃至6のいずれかに記載の細線で構成された連結体を介して複数個連結してなることを特徴とするMEMSフィルタ装置。

10

【請求項11】

請求項1乃至6のいずれかに記載の細線を連続形成してなる、薄板を所定の間隔で複数毎配列してなる光学装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、細線の製造方法およびそれを用いた電気機械フィルタに係り、特に、単結晶シリコンの異方性エッチングでエッチング速度が最も遅い(111)面の方位依存性を用いた細線の製造方法、およびそれを用いた電気機械フィルタに関する。

20

【背景技術】

【0002】

従来の加工技術で、ナノメートルサイズ(~10nm)幅のシリコン細線を基板に形成する方法としては様々な例があげられるが、主にシリコン基板上にフォトレジストなどを塗布し、電子ビーム(EB)やステッパー装置で露光し、現像液で現像して、ナノメートルサイズ(~数100nm)のマスクを形成した後、基板の表面をRIE装置などのドライエッチングによってシリコンを除去する工程を用いていた。又、ドライエッチングによって形成されたシリコン細線を熱酸化し、酸化されたシリコン表面を等方的に除去することによって、細線幅を縮小して~数10nm程度のシリコン細線を作成する方法が知られている。

【0003】

30

又、最近の技術でDPN(Dip Pen Nanolithography)というリソグラフィー方法で、~30nmの線幅を原子間力顕微鏡(AFM)用のプローブ先端を使用して直接基板上に形成する工程がある。この方法では、AFMプローブ先端に付着する水滴から働く毛細管力で、基板上に堆積された金属膜などに分子を移動させて微小な細線などを形成している。DPN方法はレジストなどの犠牲層を使用することなく、選択的に所望の場所に分子を移動させるため、若干、簡潔に細線を加工することができるという優位性を有する。

【0004】

さらに、特許文献1では、表面および裏面が(110)面で側面が(111)面の結晶面を有する単結晶シリコンからなる慣性力センサおよびその製造方法を提供している。ここでは、単異方性エッチングを利用することで慣性力センサの梁、質量体、支柱及び固定電極の形状及び間隔を正確にコントロールすることができ、製造コストが低くさらに単純なプロセスを目的とした製造方法を提供している。

40

【0005】

【非特許文献1】Alexander Holke, H. Thurman Henderson, "Ultra-deep anisotropic etching of (110) silicon", J. Micromech. Microengineering, 51-57, 1999.

【0006】

【特許文献1】特開平8-320342号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

50

しかし従来の加工技術で、電子ビームやステッパー装置などで犠牲層の形状を形成し、RIE等でエッチングする方法では、側面にドライエッチングによるダメージが残るという問題がある。又、電子ビームやステッパー装置などを使用することによって製造コストが上がるという問題も考えられる。さらに、細線を熱酸化してそれを除去し、実効的に細線幅を縮小する方法では、熱酸化される細線の厚さや形状が細線側面に反映され、酸化膜の膜厚制御が困難になる他、細線幅の均一性にも影響があるという問題があった。又、非特許文献1の技術を用いたDPN方法では、基板上にAFMプローブなどを用いて細線形状を作成する工程を有するため、時間が掛かる上、生産効率も悪くなる。又、細線幅はAFMの走査速度や分子の移動度にも反映され、湿度の影響で分子の移動率が変化するため、正確な湿度制御も必要となる。

10

【0008】

特許文献1では、単結晶シリコンの異方性エッチングを使用して、表面および裏面が(110)面で側面が(111)面の結晶面を有する慣性力センサおよびその製造方法を提供しているが、構造の小型化については、詳細には記載されていない。又、ここで<111>方位のエッチングを利用して慣性力センサの小型化を目的としても、1つの課題が想定される。それは表面と裏面が(110)面を有する結晶面と交差する2種類の(111)面のうち、交差角度が垂直な(111)側面が現れるように深溝を形成し、その(111)面のオーバーエッチで構造を形成しようとする、形成した深溝に不要な(311)面が現れる場合がある。

【0009】

これを図1乃至図4に示す。この場合、例えば表面と裏面が(110)面を有する単結晶シリコン基板1にまず絶縁膜2を堆積し、フォトリソグラフィなどでレジストパターンを形成し、このレジストパターンをマスクとしてエッチングを行い絶縁膜2からなるマスクパターンを形成する(図1)。ここで、 W_2 は、細線を作製するためのマスクパターンの幅、 W_1 は、溝を掘るためのマスクパターンの開口幅を表わす。

20

【0010】

次に、図2に示すように、所望の水溶液をエッチング液として用いて異方性エッチングを行うと<110>方位に深溝3が現れ始める。

【0011】

そしてさらに、図3に示すようにエッチングを進行すると深溝3がさらに掘り続けられる他、 W_1 のマスクパターンの下方に<111>方位のアンダーカット4が次第に進行する。さらにエッチングを行い細線5の所望な線幅に近づくと、図4に示すように深溝3の底部に(311)面が現れ、この(311)面に囲まれた先端6が現れる。この時、所定の細線5の厚み(d2)より浅い位置(d1)で、(311)面が析出されることになる。非特許文献1では(110)結晶面に対して深溝を直角に形成する際に、深溝に(311)面が析出される距離を数式で表わしている。

30

【0012】

又、d1の深溝が達成されると、(110)面のエッチング速度が急激に低下し、その結果その後は<311>方位でエッチングが行われるため、最終的に細線5の底部が安定した形状で形成されるのは困難となる。

このため、アスペクト比、特に深さ(厚さ)に対する細線幅の大きい深溝を高度の寸法精度を維持しながら再現性よく形成することは極めて困難であった。

40

【0013】

本発明は前記実情に鑑みてなされたもので、細線の長さおよび厚さを安定して再現性よく提供することのできる細線の製造方法を提供することを目的とする。

また本発明は、安定で寸法精度の高い細線で接続された電気機械フィルタ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】

【0014】

そこで本発明では、不要な(311)面が細線5の底部に反映されないように所定の厚みd2がd1よりも小さくなるようにマスク幅、深溝の開口幅、深さを設定したことを特徴とす

50

る。

【0015】

そして(111)面のアンダーカットで形成された所望の幅および厚さをもつ細線の製造方法、およびこの細線を含む小型化電気機械フィルタを提供する。

すなわち、表面が(110)面を有する単結晶シリコン基板に、異方性シリコンエッチングで<110>方位にエッチングされる深溝を形成することにより、(110)面に対して垂直に形成される深溝で囲まれた幅W3、深さd2の細線を形成する方法であって、前記深溝の(311)面が現れる深さd1よりも細線の深さd2が浅くなるように、マスクレイアウトを設計するようにしたことを特徴とする。

【0016】

また本発明では、

下式を満たすように、マスクレイアウトを設計するようにしたことを特徴とする。

$$d1 > d2$$

【数2】

$$d1 = \frac{\tan \beta \times (W1 + W2 - W3) \times R(110)}{2 \times [R(110) - R(311) \cos \beta]} \quad (\text{式1})$$

W1:マスクの開口幅

W2:マスク幅

W3:細線幅

β : (110)面と(311)面とのなす角

10

20

【0017】

エッチング速度は水溶液の種類、濃度、温度などにより変動するが、一般的に<111>方位は、<110>方位に対して70から100倍ほどエッチング速度が遅い0.01~0.05 $\mu\text{m}/\text{min}$ ほどでエッチングされる。<110>方位に対してはエッチストップ構造を利用して、<111>方位以外のエッチングを低減させることで、1分間で数10nmのエッチング速度制御が可能となり、この<111>方位のエッチング速度を利用して時間制御で簡潔にナノメートルサイズの細線を作成する他、(111)結晶面から得られる平滑な側面を有する細線を提供する。

しかし、図4に示すように、細線を形成する際、深溝に不要な(311)面が析出され、先端6を有することがあり、これが細線の底部に反映されることになる。そこで細線の所定の厚みd2を先端6が析出されるd1よりも浅い位置に設ける必要があるが、それにはd1の距離を予測することが重要となる。

30

【0018】

本発明により、細線を形成する場合、<111>方位に対してのエッチング速度を考慮する必要がある。

【0019】

また本発明では、前記シリコン基板は、表面からの深さが前記d1よりも浅い位置にエッチングストップ層を具備しており、前記エッチング工程は前記エッチングストップ層に到達するまでエッチングする第1の工程と、前記マスク幅よりも内側までエッチングするアンダーカットを進行させ、所望の細線幅W3となるまでエッチングする第2の工程とを含み、前記第1および第2の工程は連続工程であることを特徴とする。

40

この方法によれば、一旦深溝を形成した後、そのままエッチングを進行すれば、極めてエッチング速度の遅い異方性エッチングであるため、アンダーカットが進行し、細線の幅を高精度に制御することができる。また、側面が垂直でかつ平滑な表面を得ることができる。

【0020】

また本発明では、前記シリコン基板は、シリコン基板表面に酸化膜を介して単結晶シリコン層を形成したSOI基板であり、前記エッチング工程は前記酸化膜をエッチングストッ

50

ブ層としてエッチングする工程であることを特徴とする。

【0021】

また本発明では、前記細線の幅はナノメートルサイズであることを特徴とする。

【0022】

また本発明では、前記エッチング工程は、TMAHをエッチャントとしてエッチングする工程であることを特徴とする。

【0023】

図5は、異方性エッチングにおけるエッチング形状の各パラメータを示す図である。ここで、 W_x は深溝の(111)結晶面のアンダーカットの幅、 W_1 は深溝の幅、 W_t は(111)面のエッチング深溝の幅、 W_2 は細線のマスクパターン幅、 W_3 は細線の所定の幅、 θ は(110)面に対して(311)面が析出される角度を表わす。ここで通常 θ は、(311)面と(110)面の角度を表わしほぼ 31.5° であることが知られているが、エッチングされる(111)面の側面粗さによっても多少変わることがある。又、ある水溶液を使用した時の $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 方位のエッチング速度が分かっており、式1の条件が満たされた場合、深溝に先端6が析出されるまでの時間、 t_1 、およびその場合の距離 d_1 も数式で表すことができる(式1)。以下、本発明での細線の形成を図6のフローチャートで説明する。

10

【0024】

第1ステップS1：所望な細線の所定幅(W_3)と所定の細線の厚み(d_2)を指定する。

第2ステップS2：設計上の深溝のマスクパターン幅(W_1)と細線のマスクパターン幅(W_2)を指定する。

20

第3ステップS3：事前に分かっている $\langle 110 \rangle$ 方位と $\langle 111 \rangle$ 方位のエッチング速度 $[R(110), R(111)]$ と角度(θ)を利用して式1の成立条件を確認する。その後、 W_1, W_2, W_3 を使用して式1から深溝の(311)が現れる深さ d_1 を求める。

【0025】

このように、先端6が析出される d_1 を算出できれば所定の細線の厚み d_2 と比較ができ、その結果、設計上の深溝のマスクパターン幅(W_1)と細線のマスクパターン幅(W_2)にフィードバックが反映できることになる。

【発明の効果】

【0026】

本発明では、単結晶シリコンの異方性エッチングで不要な(311)面が細線の底部に形成されることなく、(111)面のアンダーカットでエッチング制御を簡潔に行い、ナノメートル幅を有する細線を製造する。これによって、細線の幅が10nm程度で高アスペクト比を有する細線の実現も可能となる。又、側面が平滑な形状を有するように形状加工することができるため、後処理が不要となり、製造コストの低減が可能となる。更には、所定の細線も幅と厚みに対して数式計算により $\langle 311 \rangle$ 面が析出されないような寸法条件を抽出して、その位置にエッチストップ層を設けることで細線の底部を安定した形状で形成することができる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0027】

以下、本発明の実施の形態について、図面を参照しつつ詳細に説明する。

40

(実施の形態1)

本発明の実施の形態1の図7から図11では、幅が10nm、厚みが $1\mu\text{m}$ でアスペクト比が1:100の細線を形成する際に必要なマスクパターンとその製造方法を示す。ここで所望な細線を形成する時の深溝とマスクパターンを図7で示し、図6のフローチャートを使用して求められた数値を示す。異方性エッチングに使用する水溶液は、TMAH(Tetramethyl Ammonium Hydroxide)を用いて濃度が20%の温度 80°C のエッチング環境を想定した。まず始めにこのエッチング環境でそれぞれ結晶方位のエッチング速度が必要であるが、ここでは文献から知られている一般的な値を使用する。ここで、 $\langle 100 \rangle$ 方位は $0.603\mu\text{m}/\text{min}$ 、 $\langle 110 \rangle$ 方位は $1.114\mu\text{m}/\text{min}$ 、 $\langle 111 \rangle$ 方位は $0.017\mu\text{m}/\text{min}$ 、 $\langle 311 \rangle$ 方位は $1.223\mu\text{m}/\text{min}$ を利用する。又、(311)面と(110)面の角度を表わす θ の定数は 31.5° を利用した。以下、図6のフロ

50

ーチャートを利用して説明する。

【0028】

図6の第1では所望の細線の所定幅(W3)と所定の細線の厚み(d2)を指定するが、最終的、望ましい細線の幅と高さのアスペクト比を考慮する。ここではW3は10nm、d2は1 μ mでアスペクト比が1:100の細線を形成する。

【0029】

第2では設計上の深溝のマスクパターン幅(W1)と細線のマスクパターン幅(W2)を指定するが、ここでのマスクパターン幅の最小限度はプロセスのリソグラフィ工程によって決定する。そこで、製造コストなどを考慮し、マスクライナー装置を使用して可能なマスクパターンの形成を考え、W2が1 μ m、W1が10 μ mを指定する。

10

【0030】

第3ではまず、式(1)が成立しているか否かの確認を行う。

ここで $R(110) > R(311) \cos$ 式(2)は

$1.114 > 1.043$ と算出され、式(2)が成立することを確認する。又、前記式(1)を使用して深溝の(311)面が現れる深さd1を算出し、52.7 μ mを算出する。

【0031】

第4では細線の所定の厚みd2と算出したd1を比較して、d2(1 μ m)がd1(52.7 μ m)より短い距離であるため、所定な細線の底部は安定した形状で形成されることを確認する。

【0032】

第5では細線幅(W3)が形成されるまでの<111>方位のエッチング時間(t0)を式(3)から算出する。

20

$t_0 = (W_2 - W_3) / [2R(111)]$ (式3)

以上のようにして、所望の細線を形成するのに必要なマスクパターン幅を決定する。

次に、実施の形態1でこの細線を形成する製造方法を説明する。

【0033】

図8から図11では、前記実施の形態1で幅が10nmで厚みが1 μ mの細線を形成するための製造方法を示す。図8では、まず始めに表面と裏面が(110)面を有する単結晶シリコン基板10を用いるが、ここで基板の種類としてFZ-type(float zone)が望ましい。FZ-typeのシリコン基板は主に、結晶中に微細な酸化物(酸素析出欠陥)が含まれていることが少ないため、異方性エッチングを行うと、エッチング形状がより平滑に形成される。しかしFZ-typeのシリコン基板は製造コストがかかる他、製造方法も困難なため、現在ではCZ-type(Czochralski zone)が主に使用されている。もしCZ-typeの(110)面シリコン基板10を使用するならば、事前に基板を高温度(>1300 以上)で長時間(>8時間)の熱処理(イントリンシックゲッタリング処理)を行うのが望ましく、単結晶シリコン中に存在する酸化物を除去することで、より平滑なエッチング形状を形成することができる。

30

【0034】

このようにして、基板の種類を指定した後は、最初の工程としてRIE等のドライエッチなどで裏面に溝11を形成する。ここで、所定の細線厚みd2を形成するために基板10は表面から1 μ mの厚さまで裏面からエッチングし、溝11を得る。この工程の後、絶縁膜12を堆積するが、この絶縁膜12としては、例えば異方性エッチングのマスク用に適しているLPCVD窒化膜などを用いるとさらに良い。膜厚は前記第3で求めた<111>方位のオーバーエッチ時間(t0)を考慮した上で決定する必要があるが、LPCVD窒化膜を用いた場合、膜厚は100nm程度で十分である。

40

【0035】

次に図9に示すように、シリコン基板10の表面に堆積した絶縁膜12のリソグラフィ工程を示す。ここで細線のマスクパターン幅(W2)と深溝のマスクパターン幅(W1)はそれぞれ13と14で表わし、13は図6に示したフローチャートの第2ステップS2で指定した1 μ m、14は10 μ mで形成される。

【0036】

この後、図10に示すように、本実施の形態で指定した異方性エッチングに使用する水

50

溶液(TMAH)のエッチング環境(濃度20%,温度80)を整え、シリコン基板10を水溶液の中に入れ、深溝15を形成する。

【0037】

さらに、図11に示すように、<111>方位のオーバーエッチ16を時間制御するため、図6に示したフローチャートの第5ステップS5で求めた t_0 の時間(29分7秒)を正確に計測し、異方性エッチングを行う。ここで細線の厚みは事前に形成した深溝11で決定されているため、シリコン基板10の裏面に堆積されている絶縁膜12が<110>方位に対してのエッチストップになる。

【0038】

次に、<111>方位のアンダーエッチ16のエッチング時間経過後、すばやくシリコン基板10を水溶液から取り出し、水洗洗浄を行い、シリコンエッチングを停止する。

【0039】

最後に、絶縁膜12を除去する工程を行うが、ここでRIEやDRIE等のドライエッチング装置を使用すると形成したシリコン細線17がエッチングされてしまうため、熱リン酸(>150)などのウェットエッチングを用いる。又、熱リン酸(>150)より簡潔に行えるフッ酸などを使用し、時間をかけて絶縁膜(窒化膜)を除去する方法を用いても良い。

【0040】

(実施の形態2)

実施の形態2では本発明で形成された細線を含む電気機械フィルタとその製造方法を示す。図12ではSOI(Silicon-on-Insulator)基板を用いており、20はシリコン下層としてのシリコン基板、21は酸化膜、22はシリコン上層としての単結晶シリコン層を表わすが、前記シリコン上層22は細線の所定の厚み d_2 と等しくなるため、正確な厚みをもったSOI基板が必要となる。例えば、現在のSOI基板は前記シリコン上層22の厚さが50nmから100 μ mまでであるものがおもに使用されている。又、酸化膜21もさまざまな厚さをもつSOI基板があり、100nmから3 μ mなどの厚さが現在では一般的に知られている。

【0041】

図12で24は多結晶シリコン入力電極、25は多結晶シリコン出力電極、35は電極24、25の電極パッド、26と27はそれぞれ本発明で形成された細線から構成される第1電気機械共振器と第2電気機械共振器、そして28は本発明で形成された細線から構成される26と27を機械的連結する構造体を示す。又、絶縁膜23は電極24、25とシリコン上層22との間に介在しており、電極24と25に入出力する電気信号がシリコン上層22と結合するのを低減するように作用する。

【0042】

図12において細線26,27,28を用いる電気機械フィルタを操作するには、まず22のシリコン上層にDCバイアス電圧 V_p を与え、入力電極24にはAC入力信号 V_i を与えることによって電極24と第1電気機械共振器26の間に静電力が働く。この時、入力電極24に、第1共振器26の共振周波数と等しいAC電圧を入力すると、電極24と第1電気機械共振器26の間に最大の静電力が働き、その結果、振動振幅がQ値の倍率分に等しい値で増幅する。

【0043】

このようにして第1電気機械共振器26が振動せしめられると、機械的振動が細線から構成されている連結構造体28を通して第2電気機械共振器27に伝搬し、出力電極25では第2電気機械共振器27と出力電極25との間の容量変化を出力電流 I_o として検出することになる。

【0044】

この電気機械フィルタの製造方法を図12の破線29を沿った断面図を使用して説明する。図13から図20はその断面図を表わし、ここでまず所望の厚さおよび材質の前記シリコン下層20、酸化膜21、シリコン上層22層を含むSOI基板を選択する。ここで第1および第2電気機械共振器26、27の厚さと連結構造体28の厚さを1 μ mとしたため、シリコン上層22は厚さ1 μ mのものを使用する。又、第1電気機械共振器26と第2

10

20

30

40

50

電器機械共振器 28 幅は200nm、連結構造体 28 の幅は100nmとする。他にSOI基板の層は、シリコン下層 20 が $\sim 500\mu\text{m}$ 、酸化膜 21 が $\sim 1\mu\text{m}$ 程度の厚さを有する基板を用いる。

【0045】

まず、図13に示すよう、SOI基板に絶縁膜 23 を堆積する。ここで絶縁膜 23 は電極 24 と 25 に通過する電気信号がシリコン上層 22 と結合するのを低減する他、本発明で形成される細線 26、27、28 の形状加工のためのマスクパターンにも利用されることになる。そこで絶縁膜 23 はLPCVD窒化膜を使用し、厚みは100nm \sim 300nmとする。又、さらに電気信号の結合を低減するために、膜厚を増加することもできるが、LPCVD窒化膜は一般的に内部応力が高いため、LPCVD窒化膜の前工程で酸化膜などを堆積して絶縁層を厚くする方法を用いるのが良い。

10

【0046】

次に、絶縁膜 23 のリソグラフィー工程を実施するが、ここでは電極 24、25 を形成するのに必要な深溝幅 31 を指定する他、連結構造体 28 の長さも考慮したマスクパターン 32 を形成する必要がある。そこで深溝幅 31 は $3\sim 5\mu\text{m}$ 、マスクパターン 32 は $1\sim 3\mu\text{m}$ とする。この工程後マスクパターン 32 をマスクとして異方性エッチングを行い、深溝 33 を形成する。ここでは酸化膜 21 がエッチストップ層として作用するため、所望の厚さの深溝 33 が正確に形成される。

【0047】

次に薄いLPCVD酸化膜 34などを堆積し(図14)、第1共振器と電極 24、又、第2共振器 27 と電極 25 のそれぞれの間隔を決定する膜層を形成する。ここで膜厚は $\sim 100\text{nm}$ が望ましい。又、酸化膜を堆積した後にドーピング工程を行うが、例えばP-typeでは拡散炉でジボラン(B_2H_6)を導入した後950 $^{\circ}\text{C}$ で加熱処理し、又、N-typeではフォスフィン(PH_3)を導入した後1050 $^{\circ}\text{C}$ などの条件で加熱処理を行うのが望ましい。

20

【0048】

次に図15に示すように、電極 24、25 を形成するための多結晶シリコンを堆積する。ここでは、LPCVD装置を使用し、例えば $2\mu\text{m}$ の膜厚を588 $^{\circ}\text{C}$ の温度で堆積することによって、内部応力を低減させた高品質膜の堆積が可能となる。膜厚は溝 33 が完全に埋まる程度が良いがそれには溝 33 以上の厚さで堆積する必要があるため、 $2\sim 3\mu\text{m}$ の厚さが良い。

【0049】

その後、SOI基板の表面を研磨やRIE等などでエッチバックし、絶縁膜 23 に堆積された多結晶シリコンを除去する。その後、絶縁膜 23 に堆積された酸化膜 34 もエッチバックし、絶縁膜 23 を露出する。

30

【0050】

次に図16に示すように、エッチバックの工程後、同様の方法で第2の多結晶シリコンを堆積する。ここでは、前工程で溝 33 に堆積した多結晶シリコンと今回、絶縁膜 23 の上に堆積する多結晶シリコンとを結合させるために、電極 35 の多結晶シリコンを堆積する。ここで膜厚は $1\mu\text{m}$ 程度が良い。

【0051】

次に、前工程でドーピングした酸化膜 34 の熱処理を行うが、ドーピング後の工程で熱処理を行うことによって、堆積した多結晶シリコンの抵抗値を低減する役目を果たす。ここでP-typeの場合、1050 $^{\circ}\text{C}$ の1時間、又、N-typeの場合、950 $^{\circ}\text{C}$ の1時間という条件で熱処理を行う。

40

【0052】

この工程後、堆積された多結晶シリコンをパターニングする第2のリソグラフィー工程を行い、その直後にRIE方法でドライエッチングし、電極 35 を形成する。

【0053】

次に図17に示す第3のリソグラフィー工程で、溝 36 を形成するための絶縁膜 23 のパターニングと絶縁膜 23 のエッチングをRIE等などで行い、その後、単結晶シリコン 22 の異方性エッチングを行い、溝 36 を掘る。

50

【 0 0 5 4 】

次に図 1 8 では、本発明の細線 2 6、2 7、2 8 の形成を行うために<111>方位のアンダーカット 3 7 を行うが、ここで実施の形態 1 で使用した TMAH 水溶液を用いて濃度が 20% の温度が 80 のエッチング環境を成立する。この工程で、連結構造体 2 8 は両側から<111>方位にエッチングされるが、第 1 共振器 2 6 と第 2 共振器 2 7 はそれぞれ片側からしかエッチングされないため、その結果、連結構造体 2 8 の幅は第 1 共振器と第 2 共振器 2 6、2 7 の 1/2 に等しくなるように形成される。ここでは、細線幅が 100nm、第 1 共振器 2 6 と第 2 共振器 2 7 の幅がどちらも 200nm の細線を形成する。

【 0 0 5 5 】

次に図 1 9 に示す細線 2 6、2 7、2 8 の上面に残された絶縁膜 2 3 を除去する必要があるが、実施の形態 1 でも示したとおり、窒化膜は RIE などのドライエッチング装置を使用するとシリコンも多少エッチングされてしまうことになる。そこで、熱リン酸やフッ酸などのウェットエッチングを用いて窒化膜が露出されている部分 3 8 を除去する方法が良い。最後に、図 2 0 では、フッ酸などを使用して第 1 共振器 2 6 と電極 2 4、又、第 2 共振器 2 7 と電極 2 5 それぞれの電極間に有する酸化膜 3 4 を除去し、100nm 程度のギャップ間を形成する。ここで、細線 2 6、2 7、2 8 の下部にあたる SOI 基板層の酸化膜 2 1 も除去し、最終的な構造を解放する。

【 0 0 5 6 】

なお、実施の形態 2 の電気機械フィルタの第 1 共振器 2 6 と第 2 共振器 2 7 は共に本発明の細線を使用したか、構造には限定は無く、例えば第 1 共振器 2 6 と第 2 共振器 2 7 は四角形など他の形状を有し、連結構造体 2 8 のみが本発明の細線を含む構造を有する電気機械フィルタを用いるようにしても良い。

【 0 0 5 7 】

(実施の形態 3)

実施の形態 3 では本発明の製造方法で形成された細線を光学素子に応用した例を示す。光学素子に最も重要な特性の 1 つは光を反射させる表面の面精度であるが、本発明の製造方法を使用することによって表面粗さの課題を改善している。図 2 1 は光反射器の例を表し、4 2 は本発明で形成された幅がナノメートルサイズで高アスペクト比を有するシリコン板であり、これをマイクロミラーに使用するようにしたもので、このシリコン基板は支持部 4 1 に固定されている。又、電極 4 0 に電圧 (Vd1, Vd2) を加えることによって静電力でシリコン板 4 2 を変位させ、反射角度 (θ_1) を変化させるようになっている。

【 0 0 5 8 】

図 2 2 乃至 2 4 は本発明の製造方法で形成された細線を 1 次元フォトニック結晶に適用した例を示す。図 2 2 はフォトニック結晶の原理を示す図である。ここで細線は断面は線であるが、図 5 の幅 W3 の細線がこの幅と垂直な方向に長さ L3 をもつ薄板を構成したものであると考える。この薄板 (シリコン薄板 4 3) が所定の間隔で連結された構造をなすように形成して得られるフォトニック結晶は、光と干渉する周期構造を組み合わせたもので、これによって禁制帯を実現させたものである。

【 0 0 5 9 】

図 2 2 で示すシリコン板 4 3 の屈折率が n_1 、空気中の屈折率が n_2 、シリコン板の厚さが d_1 、シリコン板のギャップ間が d_2 の場合、このシリコン板 4 3 と空気層とを交互に配置させ光を垂直に入射すると、例えば λ_0 が禁制帯内の波長であると完全に反射してしまい、透過することができなくなる。

【 0 0 6 0 】

しかし、 λ_0 がシリコン板に反射された場合、禁制帯の外の波長をもつ光としてシリコン板を通過することになる。ここで反射された λ_0 は式 (4) で表され、実際には λ_0 を含むある波長範囲の光が透過されなくなる。

$$\lambda_0 = 3(n_1 d_1 + n_2 d_2) / (n_1^2 - n_2^2) \quad (4)$$

【 0 0 6 1 】

図 2 3 と図 2 4 はフォトニック結晶の応用例を表し、いずれも本発明の製造方法で作製

10

20

30

40

50

されたシリコン板 43 を用いている。この場合、図 21 と同様の電極 40 を形成することでシリコン板を自由に変位させ、フォトリソグラフィ結晶の禁制帯をシリコン板 43 のギャップ間 d2 を変えて帯域を調整することを可能とする特徴を有する。

【0062】

この場合もアスペクト比の大きいエッチングを精度よく実現することにより、容易に形状加工を行うことが可能となる。

なおこの電極 40 はエッチングによって形成しても良いし、形状加工後接合して、ハイブリッド構造をとるようにしてもよい。

【産業上の利用可能性】

【0063】

本発明にかかる細線の製造方法およびそれを用いた電気機械フィルタは、ナノメートルのエッチング制御を簡潔に低コストで行い、数式計算により<311>面が析出されない細線の厚さを抽出することによって、細線の幅がナノメートルで高アスペクト比を有する細線も可能となる他、側面が平滑な形状を有し、小型、高性能のモバイル端末を実現するものである。

【図面の簡単な説明】

【0064】

【図 1】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 2】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 3】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 4】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 5】 細線を形成するための結晶面を示す図

【図 6】 細線の形成過程をまとめたフローチャート図

【図 7】 実施の形態 1 における細線の深溝とマスクパターン図

【図 8】 実施の形態 1 における細線の製造方法の工程図

【図 9】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 10】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 11】 (311)面を有する細線の製造方法工程図

【図 12】 本発明の実施の形態 2 における細線を含む電気機械フィルタの斜視図

【図 13】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 14】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 15】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 16】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 17】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 18】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 19】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 20】 本発明の実施の形態 2 における製造方法を示す工程図

【図 21】 本発明の実施の形態 3 における細線を含む光学系に応用した装置の斜視図

【図 22】 本発明の実施の形態 3 における細線を含む光学系に応用した装置の斜視図

【図 23】 本発明の実施の形態 3 における細線を含む光学系に応用した装置の斜視図

【図 24】 本発明の実施の形態 3 における細線を含む光学系に応用した装置の斜視図

【符号の説明】

【0065】

1 (110)面を有する単結晶シリコン基板

2 絶縁膜

3 深溝

4 <111>方位のアンダーカット

5 シリコン細線

6 先端

10 (110)面を有する単結晶シリコン基板

10

20

30

40

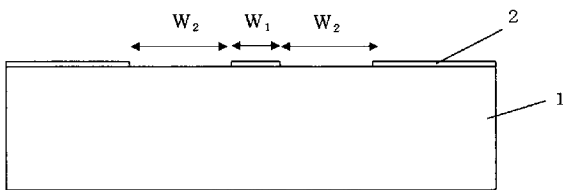
50

- 1 1 深溝
- 1 2 絶縁膜
- 1 3 細線のマスクパターン幅
- 1 4 深溝のマスクパターン幅
- 1 5 深溝
- 1 6 <111>方位のアンダーカット
- 1 7 シリコン細線
- 2 0 SOI基板シリコン下層
- 2 1 SOI基板酸化膜層
- 2 2 SOI基板シリコン上層
- 2 3 絶縁膜
- 2 4 多結晶シリコン入力電極
- 2 5 多結晶シリコン出力電極
- 2 6 第1電気機械共振器
- 2 7 第2電気機械共振器
- 2 8 連結構造体
- 2 9 破線
- 3 1 深溝の幅
- 3 2 連結構造体のマスクパターン
- 3 3 深溝
- 3 4 酸化膜
- 3 5 電極24、25の電極パッド
- 3 6 深溝
- 3 7 <111>方位のアンダーカット
- 3 8 窒化膜が露出されている場所

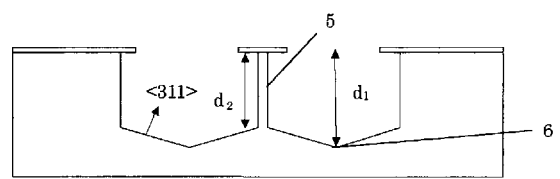
10

20

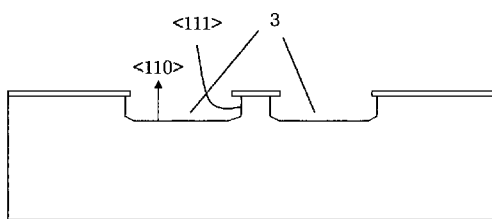
【図1】



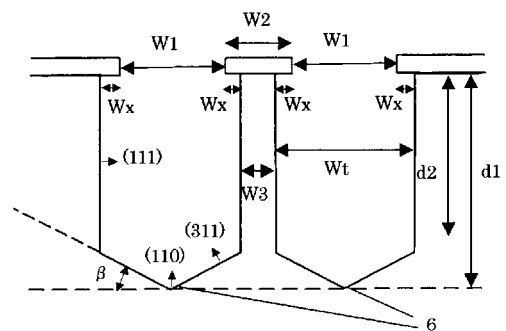
【図4】



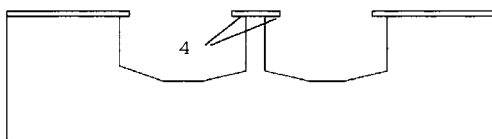
【図2】



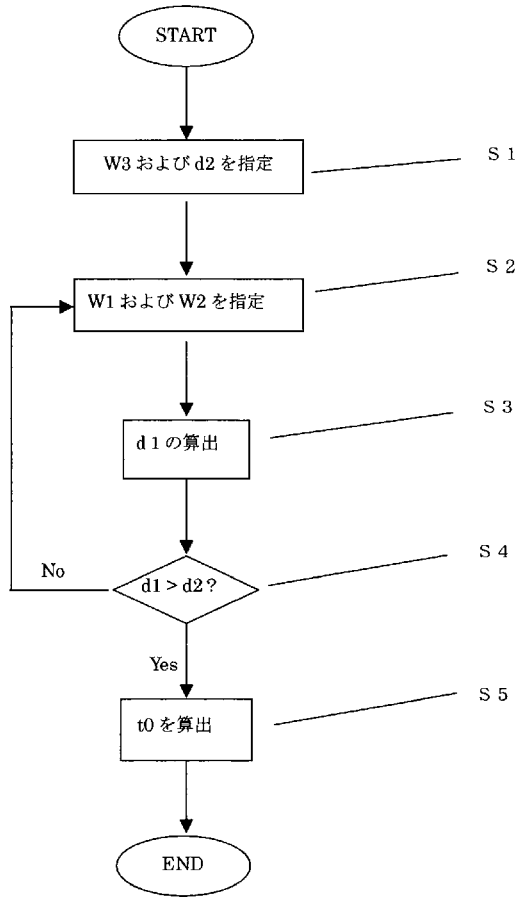
【図5】



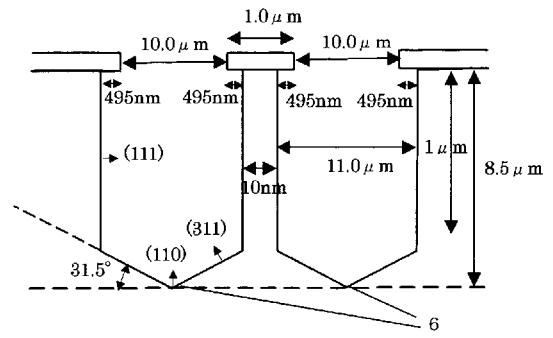
【図3】



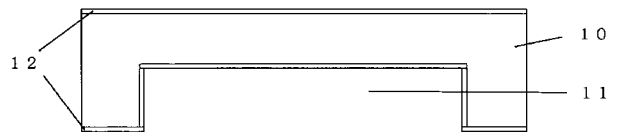
【図6】



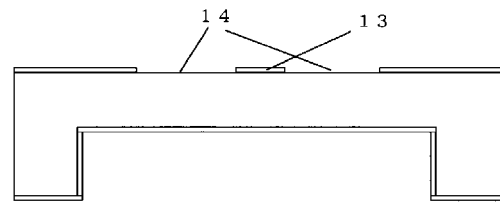
【図7】



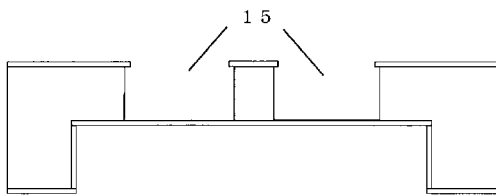
【図8】



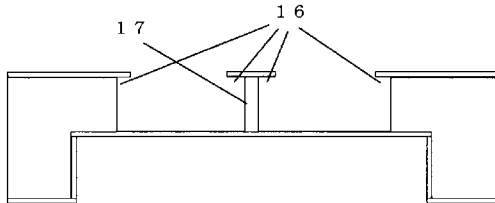
【図9】



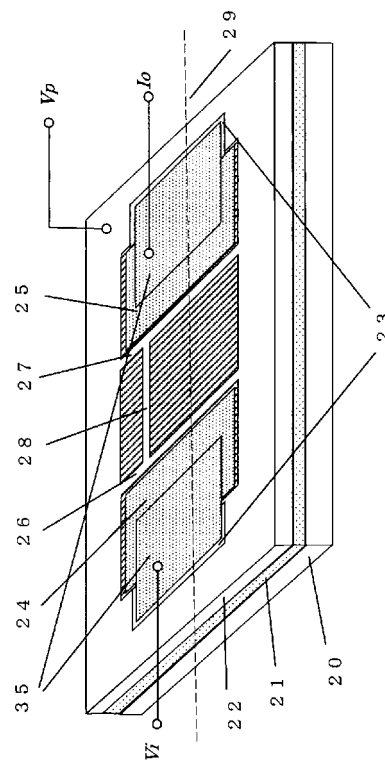
【図10】



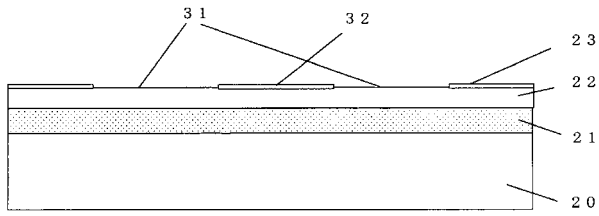
【図11】



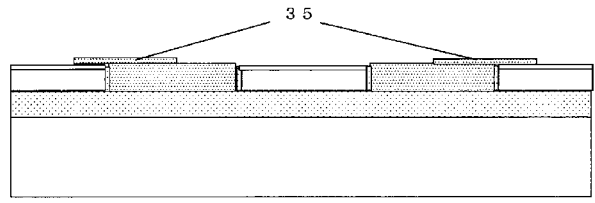
【図12】



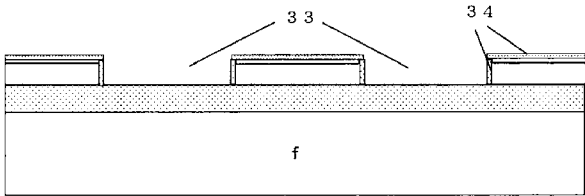
【図 13】



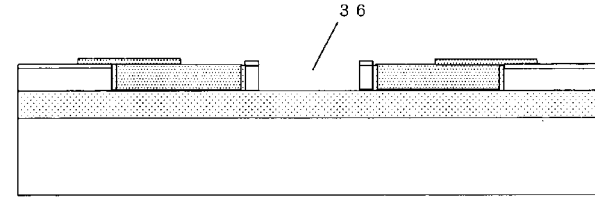
【図 16】



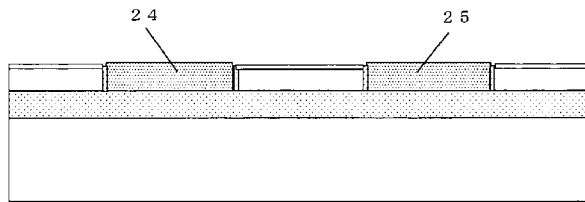
【図 14】



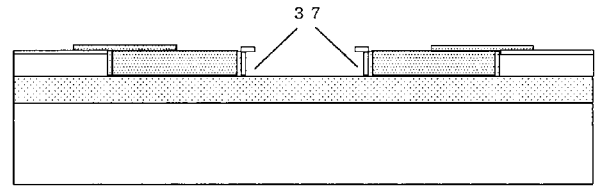
【図 17】



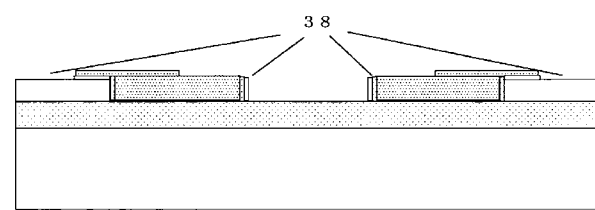
【図 15】



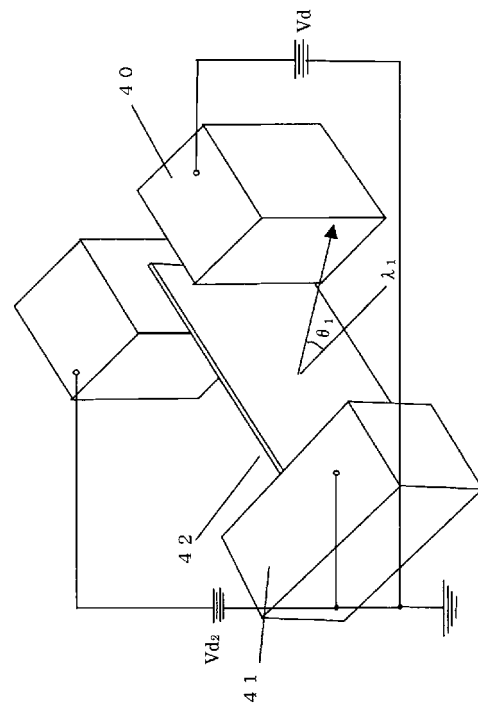
【図 18】



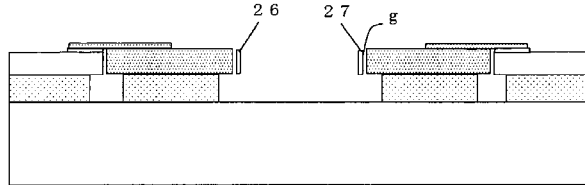
【図 19】



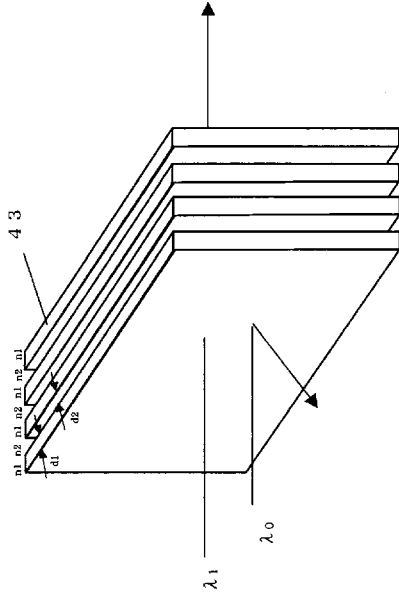
【図 21】



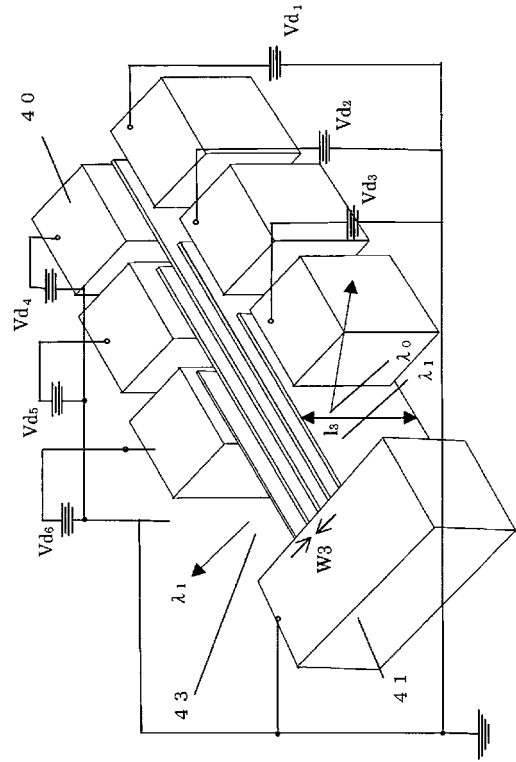
【図 20】



【 図 2 2 】



【 図 2 3 】



【 図 2 4 】

