

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4529012号
(P4529012)

(45) 発行日 平成22年8月25日(2010.8.25)

(24) 登録日 平成22年6月18日(2010.6.18)

(51) Int. Cl.		F I	
B 8 1 B	3/00	(2006.01)	B 8 1 B 3/00
B 2 5 J	7/00	(2006.01)	B 2 5 J 7/00
B 2 5 J	15/08	(2006.01)	B 2 5 J 15/08
H O 2 N	1/00	(2006.01)	H O 2 N 1/00

D

請求項の数 5 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2004-210566 (P2004-210566)	(73) 特許権者	390022471 アオイ電子株式会社
(22) 出願日	平成16年7月16日(2004.7.16)		香川県高松市香西南町455番地の1
(65) 公開番号	特開2006-26826 (P2006-26826A)	(74) 代理人	100084412 弁理士 永井 冬紀
(43) 公開日	平成18年2月2日(2006.2.2)	(72) 発明者	今野 隆 香川県高松市香西南町455番地の1 ア アオイ電子株式会社内
審査請求日	平成18年5月29日(2006.5.29)	(72) 発明者	林 宏樹 香川県高松市香西南町455番地の1 ア アオイ電子株式会社内
		(72) 発明者	谷 俊秀 香川県高松市香西南町455番地の1 ア アオイ電子株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ナノグリッパ装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

開閉自在な一対のアームと、

前記一対のアームを開閉駆動するための固定電極および可動電極を備えた静電アクチュエータと、

前記一対のアームおよび前記可動電極を支持すると共に、前記前記一対のアームが前記静電アクチュエータにより開閉駆動されたとき前記可動電極に対して弾性力を生じさせる弾性支持部と、

前記固定電極と前記可動電極との間に直流電圧 V を印加する直流電圧源と、

印加された前記直流電圧 V と、前記アームが無負荷のときに前記直流電圧 V に応答して生じるアーム間隔 D との対応関係を表す無負荷特性を予め記憶しておく記憶手段と、

前記直流電圧 V および前記アーム間隔 D を変数として前記静電アクチュエータに生じるクーロン力を算出するための関数 $F(V, D)$ に基づいて、前記アームが試料を把持しているとき実際に印加されている直流電圧 V を V' とし且つ前記試料を把持しているときのアーム間隔 D を D' としたときの演算を実行することにより、前記静電アクチュエータに生じているクーロン力 $F(V', D')$ を算出する第1の演算手段と、

前記アームが前記試料を把持しているときの前記アーム間隔 D' に対応して前記記憶手段に記憶されている直流電圧 V'' と、前記アーム間隔 D' とをそれぞれ前記関数 $F(V, D)$ の変数 $V = V''$ および変数 $D = D'$ として、前記関数 $F(V, D)$ の演算を実行することにより、前記弾性支持部により生じている弾性力 $F(V'', D')$ を算出する第2の

10

20

演算手段と、

前記クーロン力 $F(V', D')$ から前記弾性力 $F(V'', D')$ を減じることにより、前記試料を把持している前記一对のアームの把持力 G を算出する第3の演算手段(92)とを備えたことを特徴とするナノグリッパ装置。

【請求項2】

請求項1に記載のナノグリッパ装置において、

前記記憶手段は、前記静電アクチュエータに含まれている前記固定電極と前記可動電極との間に生じる静電容量 C と、前記静電容量 C を前記アームの間隔に換算した間隔 D との対応関係を記憶しておき、

前記記憶手段を参照することにより、実際の静電容量 C' に対応した前記アーム間隔 D' を求めることを特徴とするナノグリッパ装置。 10

【請求項3】

請求項1または2に記載のナノグリッパ装置において、さらに加えて、

前記静電アクチュエータに含まれている前記固定電極と前記可動電極との間に生じる静電容量を検出する静電容量検出部と、

前記アームの閉時に、前記静電容量検出部により検出される静電容量の変化の変曲点を求めて前記一对のアームにより前記試料を把持したことを検出する把持検出部とを備えることを特徴とするナノグリッパ装置。

【請求項4】

請求項1ないし3のいずれか一項に記載のナノグリッパ装置において、 20

前記一对のアーム、前記静電アクチュエータおよび前記静電容量検出部を半導体シリコンプロセス技術により半導体基板に形成したことを特徴とするナノグリッパ装置。

【請求項5】

請求項4に記載のナノグリッパ装置において、

前記一对のアームと前記静電アクチュエータとは絶縁層を介して連結されていることを特徴とするナノグリッパ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】 30

本発明は、微小なワークをハンドリングするためのナノグリッパ装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、半導体プロセス技術を応用したマイクロマシニング技術の発展により、微小機械の研究開発が盛んに行われている。そして、そのようなミクロンオーダーの微小機械を取り扱うために、微小なピンセット(以下ではナノグリッパと称する)が考案されている(例えば、特許文献1参照)。ナノグリッパの開閉を行わせるためのアクチュエータとしては、静電方式、熱方式、圧電方式など種々のものが提案されている。

【0003】

例えば、静電方式のアクチュエータとしては、櫛歯電極を用いる方式のものが知られており、電極に印加される電圧をオン・オフ制御することによりアームを開閉させている。さらに、特許文献1に記載の装置では、往復運動する搬送子を用いてアームを所定量ずつ開閉させるようにしている。 40

【0004】

【特許文献1】特開平7-52072号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、上述したナノグリッパでは、ミクロンオーダーの試料を把持する場合には、ナノグリッパのアームが試料を把持したか否かは顕微鏡で観察して目視により判断す 50

るしかなかった。そのため、確実に把持したか否かの判断が難しく、不確実なまま搬送動作に移行してしまうおそれがあった。

【0006】

また、把持確認が難しいために、試料を把持したにもかかわらず閉動作が継続されてしまう場合もあり、その場合には試料に過大な応力が加わることになる。特に、生物試料のような場合には、閉動作が継続されるとアームの把持力によって試料が過大に変形してしまうおそれがあった。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明に係るナノグリッパ装置は、開閉自在な一对のアームと、前記一对のアームを開閉駆動するための固定電極および可動電極を備えた静電アクチュエータと、前記一对のアームおよび前記可動電極を支持すると共に、前記前記一对のアームが前記静電アクチュエータにより開閉駆動されたとき前記可動電極に対して弾性力を生じさせる弾性支持部と、前記固定電極と前記可動電極との間に直流電圧 V を印加する直流電圧源と、印加された前記直流電圧 V と、前記アームが無負荷のときに前記直流電圧 V にตอบสนองして生じるアーム間隔 D との対応関係を表す無負荷特性を予め記憶しておく記憶手段と、前記直流電圧 V および前記アーム間隔 D を変数として前記静電アクチュエータに生じるクーロン力を算出するための関数 $F(V, D)$ に基づいて、前記アームが試料を把持しているとき実際に印加されている直流電圧 V を V' とし且つ前記試料を把持しているときのアーム間隔 D を D' としたときの演算を実行することにより、前記静電アクチュエータに生じているクーロン力 $F(V', D')$ を算出する第1の演算手段と、前記アームが前記試料を把持しているときの前記アーム間隔 D' に対応して前記記憶手段に記憶されている直流電圧 V'' と、前記アーム間隔 D' とをそれぞれ前記関数 $F(V, D)$ の変数 $V = V''$ および変数 $D = D'$ として、前記関数 $F(V, D)$ の演算を実行することにより、前記弾性支持部により生じている弾性力 $F(V'', D')$ を算出する第2の演算手段と、前記クーロン力 $F(V', D')$ から前記弾性力 $F(V'', D')$ を減じることにより、前記試料を把持している前記一对のアームの把持力 G を算出する第3の演算手段とを備えたものである。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、試料を把持している一对のアームの把持力を算出することができるので、試料を適切な状態で把持することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0009】

以下、図を参照して本発明を実施するための最良の形態について説明する。図1は本発明によるナノグリッパ装置2の概略構成を示す斜視図である。図1に示すナノグリッパ装置2は、半導体プロセス技術を応用したマイクロマシニング技術を利用して半導体基板上に形成されるものであり、ナノグリッパ装置2にはアーム3を保護するガード4が連結部5を介して設けられている。

グリッパ本体2とグリッパ本体2に設けられたアーム3を保護するガード4とを備えている。

【0010】

ナノグリッパ装置2を使用する際には、連結部5の部分を折って、ガード4をナノグリッパ装置2から外して用いる。アーム3は、駆動部6によって矢印Rで示すように図示左右方向に開閉する。ミクロンオーダーの試料は、アーム3の先端に形成されたグリッパ部3aによって把持される。9は回路部であり、後述するように検出回路や演算回路が形成されている。ナノグリッパ装置2は、後述するようにシリコン基板上に半導体プロセス技術を用いて形成される。

【0011】

図2はグリッパ部3aの詳細を示す拡大図であり、アーム3の先端部分の厚さを階段状

10

20

30

40

50

に薄くすることによってグリップ部 3 a が形成される。ミクロンオーダーの試料を把持するグリップ部 3 a の幅 W および厚さ t は、 $W = 1 \sim 30 \mu\text{m}$ 、 $t = 1 \sim 25 \mu\text{m}$ のように試料と同程度の寸法に設定される。アーム 3 による把持作業は顕微鏡視野内で行われるので、試料観察や試料へのアプローチがしやすいように、グリップ部 3 a の長さ L は $100 \mu\text{m}$ 程度と試料よりもやや長く設定される。アーム 3 には、上面側を階段状に削除してグリップ部 3 a が形成される。通常、平坦なステージ上に載置された試料をアーム 3 により把持するので、アーム 3 の下面側は平面状とされる。

【 0 0 1 2 】

図 3 はナノグリップ装置 2 の詳細を示す平面図である。ナノグリップ装置 2 は X Y Z ステージ等の移動機構に装着して用いられる。そして、ナノグリップ装置 2 を移動機構に装着した後にガード 4 を連絡部 5 の部分から折り、図 3 に示すようにガード 4 をナノグリップ装置 2 から取り外してから用いる。

10

【 0 0 1 3 】

図 3 に示すように、台座 7 上に形成された駆動部 6 は静電アクチュエータを構成しており、左側のアーム 3 を駆動するための固定電極 6 0 a および可動電極 6 1 a と、右側のアーム 3 を駆動するための固定電極 6 0 b および可動電極 6 1 b とを有している。図示上下方向に延在する固定電極 6 0 a、6 0 b と可動電極 6 1 a、6 1 b との各対向面は櫛歯形状となっている。可動電極 6 1 a、6 1 b は、それぞれ支持部 6 2 によって台座 7 に弾性的に固定されている。

【 0 0 1 4 】

固定電極 6 0 a の電極端子 8 0 と可動電極 6 1 a の電極端子 8 1 との間に電圧を印加すると、クーロン力によって可動電極 6 1 a が図示右方向に移動する。一方、固定電極 6 0 b の電極端子 8 2 と可動電極 6 1 b の電極端子 8 3 との間に電圧を印加すると、可動電極 6 1 b が図示左方向に移動する。

20

【 0 0 1 5 】

アーム 3 は支持部 6 3 を介して台座 7 に弾性的に固定されている。アーム 3 には支持部 6 3 を介して電極端子 8 4 が接続されており、電極端子 8 4 を利用してアーム 3 に電気的な操作を加えたり、電気的な測定を行うことができる。左側のアーム 3 は、アーム 3 の下部に設けられた連結部材 8 によって左側の可動電極 6 1 a に連結されている。同様に、右側のアーム 3 は、連結部材 8 によって右側の可動電極 6 1 b に連結されている。

30

【 0 0 1 6 】

図 4 はアーム 3 と可動電極 6 1 a との連結部分を示す拡大図であり、アーム 3 は連結部材 8 を介して可動電極 6 1 a に連結されている。なお、アーム 3 と連結部材 8 との間、および可動電極 6 1 a と連結部材 8 との間にはそれぞれ絶縁層 1 0 2 が形成されている。可動電極 6 1 a がクーロン力により図示右側に移動すると、その動きに同期してアーム 3 も右側に移動する。

【 0 0 1 7 】

一方、図 3 に示した右側のアーム 3、固定電極 6 0 b、可動電極 6 1 b に関しても左右反転している以外は全く同様の構造となっている。そのため、電極端子 8 2、8 3 に電圧を印加して電極 6 0 b、6 1 b 間に電位差を与えると、右側のアーム 3 が図示左方向に移動する。その結果、左右のアーム 3 が閉じて、グリップ部 3 a により試料が把持される。

40

【 0 0 1 8 】

図 3 において、台座 7 のアーム 3 が配設されている領域には溝状の貫通孔 7 a が形成されており、駆動部 6 が配設されている領域には矩形状の貫通孔 7 b が形成されている。アーム 3 および駆動部 6 はこれら貫通孔 7 a、7 b 上に架け渡されるように支持されている。図 5 はナノグリップ装置 2 の断面形状を説明する図であり、図 3 の A - A' 断面、B - B' 断面、C - C' 断面および D - D' 断面を示したものである。

【 0 0 1 9 】

A - A' 断面に示すように、台座 7 のアーム 3 の下方には貫通孔 7 a が形成されている。駆動部 6 は絶縁層 1 0 2 を介して台座 7 上に形成されている。同様に、連結部材 8 によ

50

り連結されたアーム3および駆動部6(可動電極61a, 61b)も絶縁層102を介して台座7上に形成されている。D-D'断面は図3の電極端子80~84の部分を断面したものであり、電極端子80~84も絶縁層102を介して台座7上に形成されている。

【0020】

このように、ナノグリッパ装置2は絶縁層を挟んだ上下2つのシリコン層からなる3層構造の基板、例えばSOI(silicon on insulator)基板に形成される。そして、アーム3、駆動部6および電極端子80~84は同一シリコン層を用いて形成される。なお、ナノグリッパ装置2の製造方法については後述する。

【0021】

《動作説明》

図6は駆動部6を制御する回路部9を示すブロック図であり、駆動部6については図3の左側のアーム3を駆動するための固定電極60aおよび可動電極61aの一部を示した。電極60a, 61aは静電アクチュエータを構成しており、図3に示した電極端子80, 81に電圧を印加して可動電極61aを駆動する。上述したように、可動電極61aは支持部62により台座7に弾性的に固定されている。

【0022】

回路部9には電極60a, 61aに関する検出回路91A、電極60b, 61bに関する検出回路91B、演算回路92および記憶回路93が設けられている。電極60a, 61aには検出回路91Aを介して外部のDC電源10Aが接続されており、電極60b, 61bには検出回路91Bを介してDC電源10Bが接続されている。

【0023】

後述するように、検出回路91Aは電極60a, 61a間の静電容量を検出し、検出回路91Bは電極60b, 61b間の静電容量を検出する。演算回路92は、各検出回路91A, 91Bで検出された静電容量に基づいてアーム3の間隔やアーム3の把持力を算出し、その算出結果はデータとして出力される。演算回路92の演算に必要なデータは記憶回路93に記憶されている。また、演算回路92からはDC電源10A, 10Bの出力電圧を制御する制御信号が各々出力され、左右のアーム3は独立して制御される。

【0024】

本実施の形態では、固定電極60aと可動電極61aとの対向部は櫛歯形状になっている。そのため、電極同士の間隔を狭くできるとともに、かつその間隔を維持しつつ移動距離を確保することができる。その結果、駆動電圧を下げるのが可能となる。また、上下方向の力については上下対称に働くので相殺され、可動電極61aには左右方向の力のみが作用する。一方、単なる平行平板の場合には、間隔が狭い範囲でしか十分なクーロン力を得ることができず、移動距離を大きくして間隔が広がるとクーロン力が弱くなり、高い電圧が必要とされる。固定電極60aに形成された櫛歯600と可動電極61aに形成された櫛歯610とは、互い違いに相手方に入り込んでいる。電極60a, 61a同士のギャップを1~数 μm オーダーとすることで十分な駆動力を得ることができる。

【0025】

ここで、櫛歯600, 610の具体的な設定の一例を記す。アーム3の開閉幅を10 μm とした場合、櫛歯600, 610の幅が各々3 μm 、櫛歯600, 610間の図示上下方向のギャップ寸法が3 μm 、櫛歯600, 610の長さが15 μm で、電極60a, 61a間の距離は18 μm から28 μm の間で変化する。アーム3の開閉幅は、原理的には数十 μm 程度まで可能である。

【0026】

例えば、固定電極60aに直流電源10Aのプラス側を接続し、可動電極61aにマイナス側を接続すると、固定電極60aはプラスに帯電し可動電極61aはマイナスに帯電する。そして、マイナス電荷とプラス電荷とのクーロン力により電極60a, 61a間に吸引力が働き、支持部62の弾性力に抗して可動電極61aが図示右方向に移動する。その結果、左側のアーム3が図示右方向に駆動される。右側のアーム3に関する動作も左右反転している点を除いて全く同様であり、電極60b, 61bに電圧が印加されると右側

10

20

30

40

50

のアーム 3 が図示左方向に駆動される。その結果、一対のアーム 3 が閉じられることになる。

【 0 0 2 7 】

図 7 は、電極 6 0 a , 6 1 a に印加される電圧 V とアーム 3 の間隔 D との関係を示す図であり、電圧 V = 0 の初期状態におけるアーム 3 の間隔を D 0 とする。電極 6 0 a , 6 1 a の櫛歯部分の各寸法を図 2 7 のように設定すると、静電容量 C_{comb}(x) は可動電極 6 1 a の移動距離 x の関数として次式 (1) で与えられる。なお、式 (1) において、ε₀ は真空の誘電率、w は各櫛歯の幅、l₀ は櫛歯先端と対向する電極の壁面との初期間隔、l は櫛歯の長さ、g は櫛歯間のギャップ、b は櫛歯の厚み、V は印加電圧、N は櫛歯の本数である。

10

【数 1】

【数 1】

$$C_{comb}(X) = \varepsilon_0 b N \left(\frac{w}{l_0 - x} + \frac{l - l_0 + x}{g} \right) \quad \dots\dots(1)$$

【 0 0 2 8 】

このとき、電極 6 0 a , 6 1 a 間に蓄えられるエネルギーは C_{comb}(x) V² / 2 (ジュール) なので、電極 6 0 a , 6 1 a 間に発生するクーロン力 F_{comb}(x) は次式 (2) により与えられる。

20

【数 2】

【数 2】

$$\begin{aligned} F_{comb}(X) &= \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} C_{comb}(X) V^2 \right) \\ &= \varepsilon_0 b N V^2 \left(\frac{1}{2g} + \frac{w}{2(l_0 - x)^2} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

30

【 0 0 2 9 】

可動電極 6 1 a およびアーム 3 はそれぞれ支持部 6 2 および 6 3 により弾性的に支持されているので、電圧 V を印加すると、式 (2) のクーロン力 F_{comb}(x) と支持部 6 2 , 6 3 の変形による弾性力とが釣り合う位置まで可動電極 6 1 a は移動する。すなわち、図 7 の曲線 L 1 のように、印加電圧 V の大きさに応じてアーム 3 の間隔 D が変化する。

【 0 0 3 0 】

アーム 3 により試料を把持する際には、顕微鏡視野下において図 8 (a) に示すようにアーム 3 の間に試料 S が位置するようにグリッパ本体 2 (不図示) を移動機構により移動する。その後、印加電圧 V を V 1 , V 2 の順に大きくすると、図 8 の (b) , (c) に示すようにアーム 3 の間隔は図 7 に示す D 1 , D 2 のように減少する。そして、印加電圧 V 3 、アーム間隔 D 3 となったときに、試料 S に各アーム 3 が接触して把持状態となる。

40

【 0 0 3 1 】

《 試料把持の検出 》

ところで、電極 6 0 a , 6 1 a の静電容量 C_{comb}(x) は上述した式 (1) で表される。静電容量 C_{comb}(x) の移動距離 x をアーム 3 の間隔 D で置き換えると、静電容量 C は概略では図 9 の曲線 L 2 のように変化する。間隔が D 1 , D 2 , D 3 と順に小さくなると、静電容量 C は C 1 , C 2 , C 3 と大きくなる。印加電圧 V を増加してアーム 3 を閉じると静電容量 C が増加するので、印加電圧 V と静電容量 C との関係は図 1 0 に示す曲線 L 3 のようになる。すなわち、電圧 V を印加すると、その値 V の大きさに応じてアーム 3 の間隔 D と電極 6 0 a , 6 1 a の静電容量 C が定まる。

50

【 0 0 3 2 】

印加電圧を V_3 にすると、図 8 (d) のようにアーム 3 が試料 S に接触する。ところで、試料 S が剛体であると仮定すれば、アーム 3 が試料 S を把持した後にさらに印加電圧 V を大きくしても、アーム 3 は閉じる方向に移動できず間隔 D は変化しない。そのため、静電容量 C は図 1 1 の破線 L 4 のように値 C_3 で一定となる。一方、生物試料のように変形可能な試料の場合には、印加電圧 V が V_3 よりも大きくなって把持力が大きくなると、アーム 3 の接触圧によって試料が変形し曲線 L 5 のように静電容量が C_3 よりも僅かに増加する。いずれの場合にも、曲線 L 3 が曲線 L 4 や曲線 L 5 のように変化する変曲点 P を検出することにより、アーム 3 が試料 S を把持したか否かを検出することができる。

【 0 0 3 3 】

《 静電容量 C の検出方法 》

次に、検出回路 9 1 A における静電容量 C の検出方法について説明する。ここでは、時定数から求める方法と、発振周波数から求める方法について説明する。最初に、図 1 2 を参照して時定数から求める方法について説明する。図 1 2 (a) は検出回路を示す図であり、 C は電極 6 0 a , 6 1 a によるキャパシタである。このキャパシタ C と直列に抵抗 R_1 を接続し、電源 2 0 により図 1 2 (b) に示すような矩形波形の電圧 V_{in} を印加する。そして、キャパシタ C の両端の電圧変化を電圧計 2 1 によって計測する。

【 0 0 3 4 】

図 1 2 (a) の回路は RC 回路を構成しているので、電圧計 2 1 で観測される電圧値 V_{out} は次式 (3) で表される。すなわち、電圧計 2 1 には図 1 2 (c) に示すような電圧波形が計測される。そして、計測された電圧波形から式 (3) の C の値が推定される。抵抗値 R は予め分かっているので、算出値 $C R$ から静電容量 C が求まる。

$$V_{out} = V_{in} \{ 1 - \exp (t / C R) \} \quad \dots (3)$$

【 0 0 3 5 】

図 1 3 は発振周波数から求める方法を説明する図であり、発振回路を示す図である。回路には、コイル 2 2 と位相反転増幅器 2 3 が並列接続されており、静電アクチュエータの静電容量が発振回路のパラメータの一部になるように構成する。コイル 2 2 の代わりに水晶振動子を用いてもよい。例えば、符号 C_1 , C_2 , C_3 で示す位置のいずれかに電極 6 0 a , 6 1 a によるキャパシタ C が接続される。 C_2 の場合には位相反転増幅器 2 3 の入力とグランド間にキャパシタ C が接続され、 C_3 の場合には位相反転増幅器 2 3 の出力とグランド間にキャパシタ C が接続される。

【 0 0 3 6 】

発振回路から出力される交流信号の周波数、すなわち発振周波数の周波数 F_{osc} は、次式 (4) で算出される。そして、検出された周波数と式 (4) とを用いることに静電容量 C が算出される。電圧 V を変えてアーム開閉を行う際に、周波数 F_{osc} を所定時間間隔で逐次検出してそれぞれの静電容量 C を算出することにより、図 1 1 に示すような曲線 L 3 が得られる。点 P の位置で試料 S を把持すると、その後算出される静電容量 C は曲線 L 4 や曲線 L 5 のように変化する。すなわち、周波数 F_{osc} から静電容量 C を逐次求めることにより、変曲点 P を検出することができる。

$$F_{osc} (\text{Hz}) = 1 / 2 (L C)^{ 1 / 2 } \quad \dots (4)$$

【 0 0 3 7 】

《 発振回路を用いた場合 》

図 2 3 は、検出回路 9 1 A , 9 1 B として図 1 3 の発振回路を用いた場合の回路部 9 を示す図である。DC 電源 1 0 は交流的にはインピーダンスが 0 に近い値になるため、アクチュエータである固定電極 6 0 a , 6 0 b と可動電極 6 1 a , 6 1 b とが短絡され発振回路が動作できなくなる。そこで、DC 電源 1 0 A , 1 0 B と直列に抵抗 R_1 を設ける。このようにすると、アクチュエータのインピーダンスは抵抗 R_1 の値で決まり、 R_1 を 1 (M) 以上の値に選ぶことで、発振回路を動作させることができる。

【 0 0 3 8 】

10

20

30

40

50

また、アーム3に外力が作用して固定電極60a, 60bと可動電極61a, 61bとが接触した場合には、DC電源10A, 10Bが短絡されて電極が溶断したり溶接されたりするのが、抵抗R1を設け電流を制限することによってそれらを防止することができる。さらに、発振回路とDC電源10A, 10Bとの間には直流遮断用のコンデンサCpが設けられている。コンデンサCpによりDC電源10A, 10Bから発振回路に直流電流が流れ込んだり、逆に発振回路からDC電源10A, 10Bに直流電流が流れ込んだりするのを防止することができる。そのため、コンデンサCpの静電容量は、駆動部6の静電容量よりも十分大きな値に設定される。

【0039】

上述したように、固定電極60a, 60bと可動電極61a, 61bとの間の静電容量は発振回路の回路定数の一部をそれぞれ構成している。そのため、各検出回路91A, 91Bから出力される交流信号(発振周波数出力)の周波数F1, F2は、固定電極60a, 60bと可動電極61a, 61bとの間の静電容量の変化に応じて変化する。この交流信号はそれぞれ演算回路92の計数回路920に入力される。

【0040】

駆動部6の固定電極60a, 60bおよび可動電極61a, 61bに電圧を印加してアーム3を閉じる動作をさせる場合には、図24(a)に示すようにステップ状に電圧を増加させる。タイミングコントロール回路921は時間t毎にトリガ信号をDC電源10A, 10Bに出力し、DC電源10A, 10Bはトリガ信号を受信する毎に電圧をVだけ上昇させる。V3は、試料を把持したときの電圧である。

【0041】

図24(a)のようにステップ状に印加電圧が上昇すると、固定電極60a, 60bと可動電極61a, 61bとの間隔もステップ状に減少し、各静電容量もステップ状に増加する。その結果、検出回路91A, 91Bから出力される信号の周波数F1, F2は、図24(b)に示すように時間間隔tでステップ状に変化する。タイミングコントロール回路921は、計数回路920による計数のタイミングを図24(b)の時間間隔tと同期させるようにトリガ信号を計数回路920に出力する。

【0042】

計数回路920で計数された計数值Fa(図24(c)参照)はいったん記憶回路93に記憶され、次のトリガで計数される計数值Fbと比較判定回路922で比較される。比較判定回路922では、計数值Fbと計数值Faの差分(Fb - Fa)を求め、その差分(Fb - Fa)が所定の閾値より小さいか否かを判定する。そして、閾値よりも小さいと判定されると、試料が把持されたことを示すデータを出力する。ここで、アーム3の移動が停止すると静電容量は一定となるので、原理的には差分(Fb - Fa)はゼロとなるので、ドリフト等を考慮しても値閾値はゼロに近い値となる。

【0043】

従来、ナノグリッパのように微小試料を把持するものでは、目視でしか把持状態を確認することができなかった。しかしながら、本実施の形態では、静電アクチュエータを構成する駆動部6の静電容量Cを検出することによって、試料Sを把持したか否かを確認することができる。さらに、把持を確認した後に、後述するように印加電圧を所定の値に設定することにより過剰な把持力が試料に加わるのを防止することができる。

【0044】

《把持力Gについて》

次に、把持力の算出方法について説明する。ここでは、クーロン力 $F_{comb}(x)$ の式(2)を用いることにより、アーム3による把持力Gを求める。式(2)はクーロン力を移動距離xで表したものであるが、電圧を印加しない場合のアーム3の間隔は図8に示すようにD0であって $D = D0 - 2x$ の関係があるので、クーロン力Fを間隔Dを用いて表すと次式(5)のようになる。

10

20

30

40

【数3】

【数3】

$$F = \epsilon_0 b N V^2 \left(\frac{1}{2g} + \frac{w}{2(l_0 + \frac{D-D_0}{2})^2} \right) \dots\dots(5)$$

【0045】

クーロン力 F は印加電圧 V と間隔 D との関数 $F(V, D)$ となっている。印加電圧 V と間隔 D との関係はクーロン力 F と支持部 62, 63 の弾性力とに依存しており、定性的には図 7 に示すような関係がある。印加電圧を V_3 としたときの間隔を D_3 とすると、そのときのクーロン力 $F(V_3, D_3)$ は支持部 62, 63 の弾性力と釣り合っていることになる。すなわち、間隔 D_3 のときの弾性力は $F(V_3, D_3)$ に等しく、同様に、間隔 D_1, D_2 のときの弾性力は $F(V_1, D_1)$ 、 $F(V_2, D_2)$ に等しい。把持力 G は次式(6)で表され、図 8(d) の状態で印加電圧が V_3 である場合には $G = 0$ である。

$$(\text{把持力 } G) = (\text{クーロン力 } F) - (\text{弾性力}) \dots (6)$$

【0046】

(試料 S が変形しない場合)

変形しない試料 S の場合、印加電圧を図 7 の V_4 に増加すると図 11 の点 P_4 の状態となる。すなわち、間隔は D_3 が維持されるので静電容量も C_3 から変化しない。このときのクーロン力は $F(V_4, D_3)$ で、弾性力は $F(V_3, D_3)$ である。式(5)から $F(V_4, D_3) > F(V_3, D_3)$ であり、そのときの把持力を $G(V_4, D_3)$ とすると、式(6)から「 $G(V_4, D_3) = F(V_4, D_3) - F(V_3, D_3)$ 」となる。

【0047】

よって、印加電圧 V が $V > V_3$ のときの把持力 $G(V, D_3)$ は、変曲点 P (間隔 D_3) における弾性力 $F(V_3, D_3)$ を用いて次式(7)のように表される。なお、 $F(V_3, D_3)$ における間隔 D_3 は、図 11 の変曲点 P が検出されたときの静電容量 C_3 と図 9 の相関とから求めることができ、 V_3 は静電容量 C_3 と図 10 の相関とから求めることができる。これらの相関は予め記憶部 625 に記憶されている。

$$G(V, D_3) = F(V, D_3) - F(V_3, D_3) \dots (7)$$

【0048】

(試料 S が変形する場合)

図 11 の曲線 L_5 で示すように、アーム 3 で把持した際に試料 S が変形した場合、印加電圧 V_4 では点 P_5 の状態となる。このときに検出される静電容量 C_5 と図 9 の相関とから、点 P_5 における間隔 D_5 を求めることができる。図 11 では $C_3 < C_5 < C_4$ となっているので、 $D_3 < D_5 < D_4$ である。間隔が D_5 のときの支持部 62, 63 の弾性力は $F(V_5, D_5)$ であり、間隔 D_5 および印加電圧 V_4 のときのクーロン力は $F(V_4, D_5)$ である。 $V_5 < V_4$ であるから、式(5)から $F(V_5, D_5) < F(V_4, D_5)$ であることが分かる。このときの把持力はクーロン力と弾性力との差 = $F(V_4, D_5) - F(V_5, D_5)$ で表される。

【0049】

よって、変形する試料 S における把持力 $G(V, D_5)$ は、点 P_5 (間隔 D_5) における弾性力 $F(V_5, D_5)$ を用いて次式(8)のように表される。なお、 V_5 は静電容量 C_5 と図 10 の相関とから求めることができる。

$$G(V, D_5) = F(V, D_5) - F(V_5, D_5) \dots (8)$$

【0050】

実際に把持力を求める場合には、試料 S の変形の有無にかかわらず次のような手順で求める。最初に静電容量を検出し、その静電容量と図 9, 10 の相関から間隔 D および電圧 V を求め、求まった D, V と式(5)とから弾性力を算出する。また、実際の印加電圧 V および静電容量から得られる間隔を用いて、実際に作用しているクーロン力を算出する。最後に、クーロン力と弾性力との差を取って把持力を求める。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 1 】

変形が無い場合には静電容量は C_3 なので弾性力は $F(V_3, D_3)$ で、実際に作用しているクーロン力は $F(V, D_3)$ となり、把持力は式 (7) のようになる。一方、変形がある場合には静電容量は C_5 なので弾性力は $F(V_5, D_5)$ で、実際に作用しているクーロン力は $F(V, D_5)$ となり、把持力は式 (8) のようになる。

【 0 0 5 2 】

このように、本実施の形態のナノグリッパでは把持力を知ることができるため、試料 S に応じた把持力で作業することができる。このことは、特に生物試料に対しては効果的であり、把持力が過剰となって生物試料を損傷してしまうようなことを防止することができる。

10

【 0 0 5 3 】

図 2 3 に示した回路を図 2 5 のように変更することにより、把持力を算出するようにする。カウンタ 9 2 5 は、DC 電源 1 0 A , 1 0 B に出力されたトリガの回数をカウントし、そのカウント数はレジスタ 9 2 4 に格納される。例えば、図 2 6 (a) に示すように、印加電圧 = 0 の状態からトリガを 9 回出力した時点で試料 S がアーム 3 によって把持される。トリガが出力されるたびに印加電圧は V だけ増加される。

【 0 0 5 4 】

電圧と駆動部 6 の変位とにリニアな関係が成り立つ領域では、各 V による移動量を d としたとき、把持するまでのアーム 3 の移動量は $9 \cdot d$ で算出される (図 2 6 (b) 参照)。リニアでない場合には、それぞれの和 $d_1 + d_2 + \dots + d$ が移動量となる。把持後もさらにトリガ信号を発生して印加電圧を増加させると、増加後のカウント数を m とすれば、 $(m - 9) \cdot V$ が把持以後の電圧増分である。この電圧増分から、上述したように把持力を算出することができる。逆に、外部から予め把持力を設定しておき、その設定された把持力となったところで、トリガ出力を停止して把持後の印加電圧の増加を停止するようにしても良い。

20

【 0 0 5 5 】

《ナノグリッパ装置 2 の製造工程の説明》

次に、SOI (silicon on insulator) 基板を用いてナノグリッパ装置 2 を形成する場合の、製造方法について説明する。なお、以下ではアーム 3 や駆動部 6 の部分の形成方法について説明し、回路部 9 については説明および図示を省略する。回路部 9 はアーム 3 や駆動部 6 を構成するものと同じのシリコン層に半導体プロセス技術によって造り込んで良いし、別に作成した回路素子を台座 7 上に配置するようにしても良い。ナノグリッパ装置 2 の形成に用いる基板 1 0 0 としては、図 1 4 (a) に示すように $\langle 1 1 0 \rangle$ 方位の単結晶シリコンから成るベース層 1 0 1、酸化シリコンから成る絶縁層 1 0 2、 $\langle 1 1 0 \rangle$ 方位の単結晶シリコンから成るシリコン層 1 0 3 が順に積層されたシリコン基板が用いられる。

30

【 0 0 5 6 】

シリコン基板 1 0 0 には、SOI 基板だけでなく、ガラス基板上に単結晶シリコン層を有する基板や、アモルファスシリコン基板やポリシリコン基板上に SOI 層を有する基板なども用いることができる。すなわち、最上層が $\langle 1 1 0 \rangle$ 方位を有するシリコン層 1 0 3 であって、このシリコン層 1 0 3 の下層に絶縁層 1 0 2 が形成されているような層構造を有するシリコン基板であれば、ベース層 1 0 1 を多層構造としてもかまわない。

40

【 0 0 5 7 】

シリコン基板 1 0 0 の各層の厚さの一例を述べると、シリコン層 1 0 3 は $25 \mu\text{m}$ 、絶縁層 1 0 2 は $1 \mu\text{m}$ 、ベース層 1 0 1 は $300 \mu\text{m}$ である。また、シリコン基板 1 0 0 上における 1 つのグリッパを形成する領域は縦、横ともに数 mm の矩形状をしている。図 1 4 (a) に示す工程では、スパッタリング法や真空蒸着法などにより、厚さ約 50nm のアルミ層 1 0 4 をシリコン層 1 0 3 の表面に形成する。

【 0 0 5 8 】

次に、図 1 4 (b) のようにアルミ層 1 0 4 の表面にレジスト 1 0 5 を約 $2 \mu\text{m}$ の厚さ

50

で形成し、フォトリソグラフィによりレジスト105を露光・現像することにより、図14(c)に示すレジストパターン105aを形成する。図17はシリコン基板100の斜視図であり、アルミ層104の上面に、アーム3, ガード4, 駆動部6等に対応するレジストパターン105aが形成されている。なお、図14(c)は図7のF-F'断面を示したものである。

【0059】

そして、図14(d)に示すように、このレジストパターン105aをマスクとして混酸液によりアルミ層104をエッチングし、シリコン層103を露出させる。その後、ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching)によりシリコン層103を垂直方向に異方性エッチングする。このエッチングは絶縁層102が露出するまで行われ、エッチング終了後、硫酸・過酸化水素混合液によりレジストパターン105aおよびアルミ層104を除去する(図15(a)参照)。

10

【0060】

図18は、レジストパターン105aおよびアルミ層104を除去した後の基板100を示す斜視図である。絶縁層102上には、同一シリコン層103により立体構造体が形成される。その立体構造体は、アーム3を構成する部分103aと、駆動部6を構成する部分103bと、電極端子80~84を構成する部分103cと、ガード4を構成する部分103dとから成る。

【0061】

次いで、露出した絶縁層102およびシリコン層103(103a~103d)を覆うようにレジスト106を塗布する(図15(b)参照)。レジスト106の塗布厚さは10μm程度とする。その後、フォトリソグラフィによりレジスト106にマスクパターンを転写して現像することにより、図19に示すようにアーム構成部103aの先端部分におけるレジスト106が矩形状に除去されたレジストパターン106aを形成する。そして、レジストパターン106aをマスクとしてICP-RIEや通常のRIEなどを行い、アーム構成部103aの先端部分をグリッパの把持対象に合わせた形状および大きさに加工する。

20

【0062】

次に、図15(c)に示すように基板100を表裏反転させて、スパッタリング法や真空蒸着法によりベース層101の表面にアルミ層107を形成する。アルミ層107の厚さは、約50nmとする。そして、アルミ層107の上にレジスト108を約2μmの厚さに形成した後にフォトリソグラフィによりレジストパターンを形成し、そのレジスト108をマスクに用いてアルミ層107を混酸液によりエッチングする(図16(a)参照)。

30

【0063】

図20は、レジスト108およびアルミ層107の形状を示す斜視図である。図16(a)は図20のG-G'断面を示したものであり、絶縁層102の図示下側(表面側)にはシリコン層103によるアーム部103aの断面が図示されている。図20から判るように、レジスト108は、図1に示したガード4に対応する部分R1、連結部5に対応する部分R2、台座7に対応する部分R3および図5の連結部材8に対応する部分R4が残っており、逆に図5に示した貫通孔7a, 7bに対応する部分が除去されてベース層101が露出している。

40

【0064】

その後、ベース層101の上に形成されたレジスト108およびアルミ層107をマスクとして、ベース層101をICP-RIEによりエッチングする。ベース層101は異方性エッチングにより垂直方向にエッチングされ、エッチングは絶縁層102が露出するまで行われる。エッチング終了後に、硫酸・過酸化水素混合液によりレジスト108, 106およびアルミ層107を除去する(図16(b)参照)。

【0065】

図21は、図16(b)に示すベース層101の裏面側を示す図である。エッチングに

50

より、ベース層 101 には貫通孔 7a, 7b を有する台座 7 やガード 4, 連絡部 5 および連結部材 8 が形成される。通常は、基板 100 上にはガード 4 が形成されたナノグリッパ装置 2 が複数形成されるが、このエッチングの工程において、各ナノグリッパ装置 2 毎に分割されることになる。次いで、台座上に露出している酸化シリコンから成る絶縁層 102 を、緩衝フッ化水素溶液を用いてエッチングする。その結果、シリコン層 103 とベース層 101 とで挟まれた領域を除いて、絶縁層 102 が除去される(図 16(c) 参照)。

【0066】

図 22 はベース層 101 の表面側を示す斜視図であり、図 16(c) は図 22 の H-H' 断面を示したものである。電極部 103 とベース部 101 との間には絶縁層 102 が介在している。その後、図 16(d) に示すように、露出しているベース層 101 の上および各構造体を構成するシリコン層 103 の上に、真空蒸着法等によりアルミ等からなる導体膜 109 を形成する。導体膜 109 の厚さは 500nm 以下とする。このようにして、図 1 に示すナノグリッパ装置 2 が完成するが、把持対象によっては FIB などの加工装置によりグリッパ部 3a を追加工しても良い。

【0067】

上述した実施の形態では静電アクチュエータである駆動機構 6 の静電容量 C を検出して、試料 S をグリッパしたことを検出したり、試料 S の寸法を計測したが、アーム 3 に形成された導体膜 109 に直流電源 621 の電圧を印加して、アーム 3 の静電容量の変化により上述した把持検出や把持力の測定を行うようにしても良い。この場合、駆動部 6 は静電アクチュエータでなくても良く、例えば、圧電素子や熱膨張を利用した駆動機構であっても良い。また、本発明の特徴を損なわない限り、本発明は上記実施の形態に何ら限定されるものではない。

【0068】

以上説明した実施の形態と特許請求の範囲の要素との対応において、駆動部 6 は駆動機構および静電アクチュエータを、検出回路 91 および演算回路 92 は静電容量検出部を、演算回路 92 は把持検出部をそれぞれ構成する。

【図面の簡単な説明】

【0069】

【図 1】本発明によるナノグリッパ装置 2 の概略構成を示す斜視図である。

【図 2】グリッパ部 3a の詳細を示す拡大図である。

【図 3】グリッパ本体 2 の詳細を示す平面図である。

【図 4】アーム 3 と可動電極 61a との連結部分を示す図である。

【図 5】図 3 の A-A' 断面, B-B' 断面, C-C' 断面および D-D' 断面をそれぞれ示す図である。

【図 6】ナノグリッパ装置 2 の動作を説明する図である。

【図 7】印加電圧 V とアーム 3 の間隔 D との関係を示す図である。

【図 8】把持動作時における試料 S とアーム 3 との位置関係を示す図であり、(a) ~ (d) の順に推移する。

【図 9】アーム 3 の間隔 D と静電容量 C との関係を示す図である。

【図 10】印加電圧 V と静電容量 C との関係を示す図である。

【図 11】変曲点 P を示す図である。

【図 12】時定数から静電容量 C を求める方法を説明する図であり、(a) は検出回路、(b) は入力電圧波形 V_{in} 、(c) は観測電圧波形 V_{out} をそれぞれ示す。

【図 13】発振回路を示す図である。

【図 14】ナノグリッパ装置 2 の製造手順を説明する図であり、(a) ~ (d) の順に工程が進む。

【図 15】図 14 の工程に続く工程を示す図であり、(a) ~ (c) の順に工程が進む。

【図 16】図 15 の工程に続く工程を示す図であり、(a) ~ (d) の順に工程が進む。

【図 17】図 14(c) のシリコン基板 100 の斜視図である。

10

20

30

40

50

【図 18】レジストパターン 105 a およびアルミ層 104 を除去した後の基板 100 を示す斜視図である。

【図 19】レジストパターン 106 a を示す斜視図である。

【図 20】図 16 (a) のレジスト 108 およびアルミ層 107 の形状を示す斜視図である。

【図 21】図 16 (b) に示すベース層 101 の裏面側を示す図である。

【図 22】図 16 (c) のベース層 101 の表面側を示す斜視図である。

【図 23】検出回路 91 A , 91 B に発振回路を用いた場合の回路部 9 を示す図である。

【図 24】アーム 3 を閉じる動作のときの、(a) 印加電圧の変化、(b) 発振周波数の変化、(c) 計数値の変化をそれぞれ示す図である。

10

【図 25】把持力検出時の演算回路 92 の構成を示す図である。

【図 26】(a) は把持時のアーム 3 の動作を示す図であり、(b) はそのときの移動量の変化を示す図である。

【図 27】電極 60 a , 61 a の櫛歯部分の寸法を示す図である。

【符号の説明】

【0070】

2 ナノグリッパ装置

3 アーム

3 a グリッパ部

4 ガード

5 連結部

6 駆動部

7 台座

8 連結部材

9 回路部

10 A , 10 B DC 電源

60 a , 60 b 固定電極

61 a , 61 b 可動電極

62 , 63 支持部

80 ~ 84 電極端子

91 A , 91 B 検出回路

92 演算回路

93 記憶回路

600 , 610 櫛歯

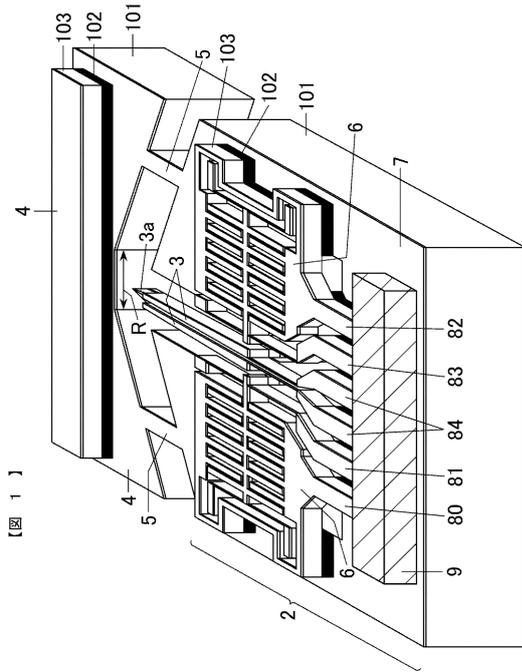
P 変曲点

S 試料

20

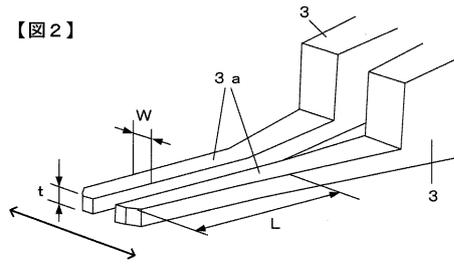
30

【 図 1 】



【 図 1 】

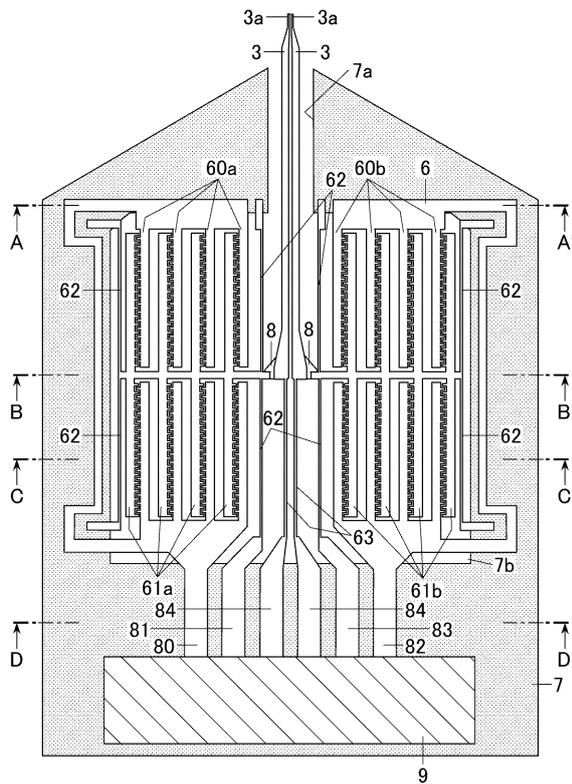
【 図 2 】



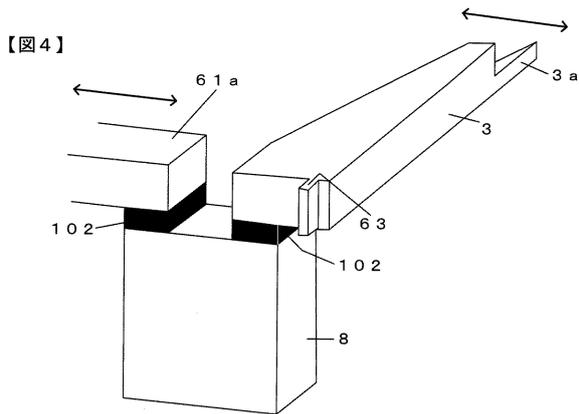
【 図 2 】

【 図 3 】

【 図 3 】



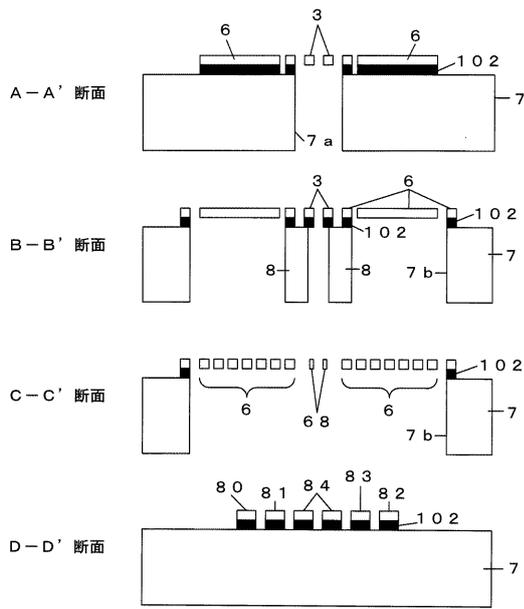
【 図 4 】



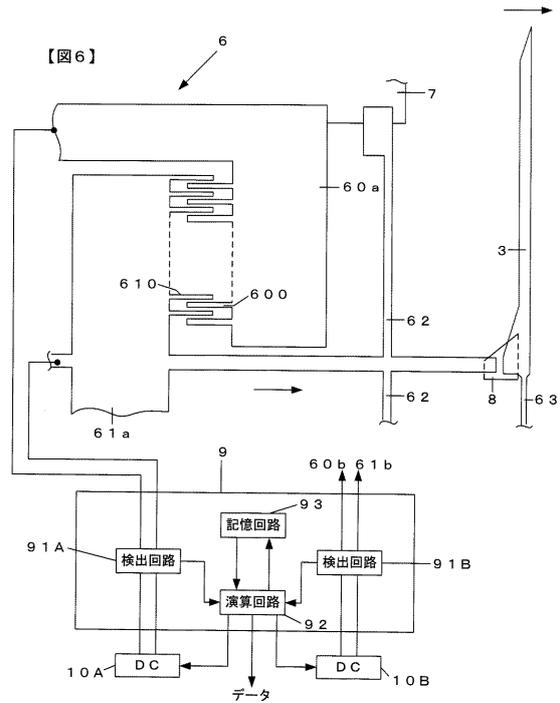
【 図 4 】

【図5】

【図5】

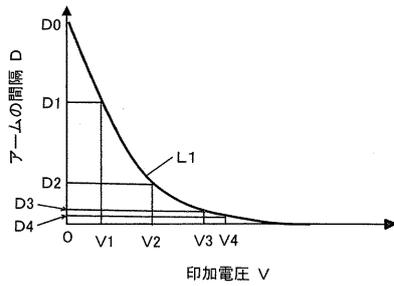


【図6】



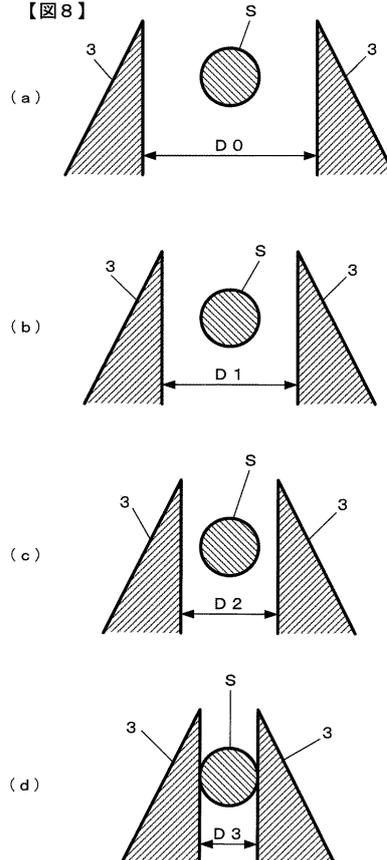
【図7】

【図7】



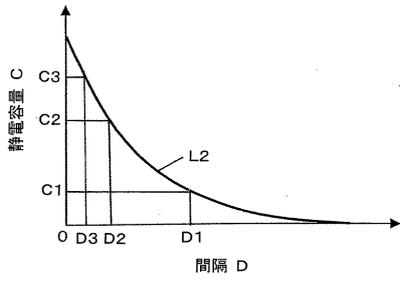
【図8】

【図8】



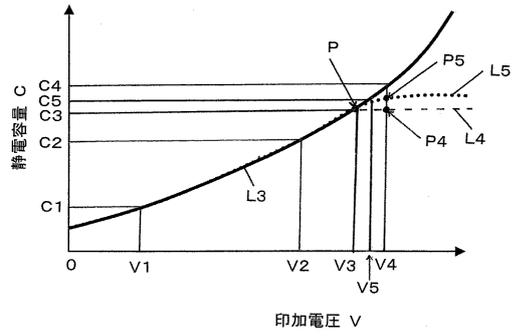
【 図 9 】

【 図 9 】



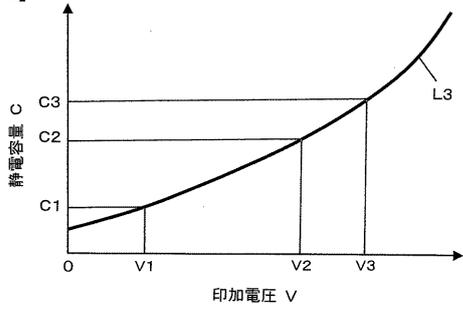
【 図 1 1 】

【 図 11 】



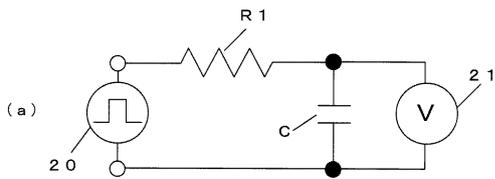
【 図 1 0 】

【 図 10 】

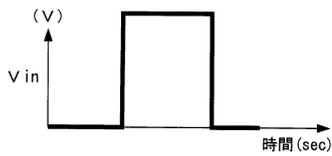


【 図 1 2 】

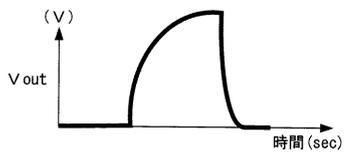
【 図 1 2 】



(b)

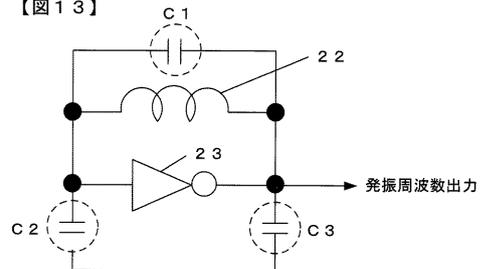


(c)



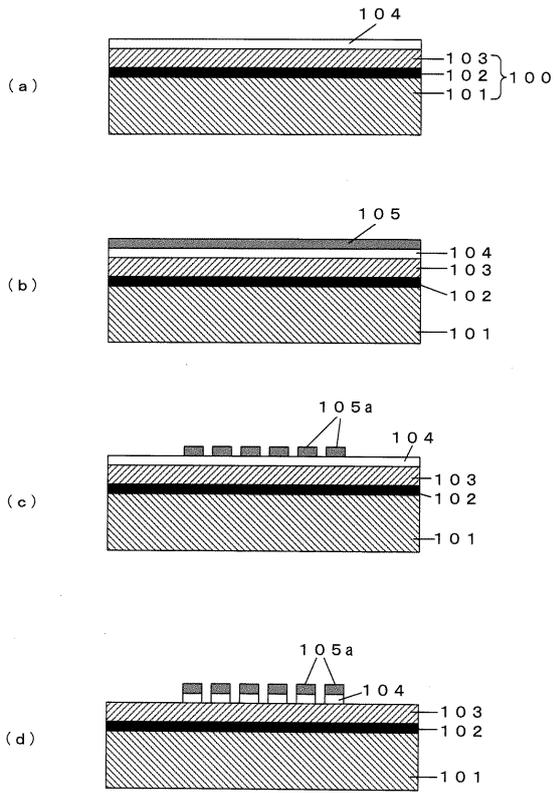
【 図 1 3 】

【 図 1 3 】



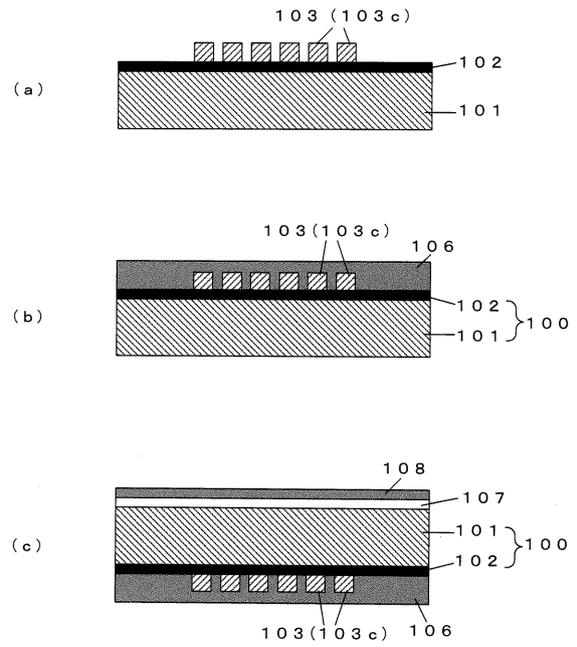
【図14】

【図14】



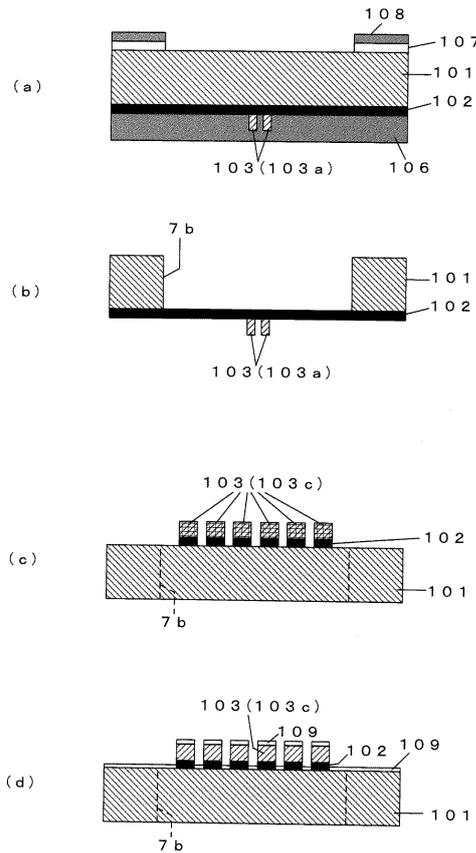
【図15】

【図15】



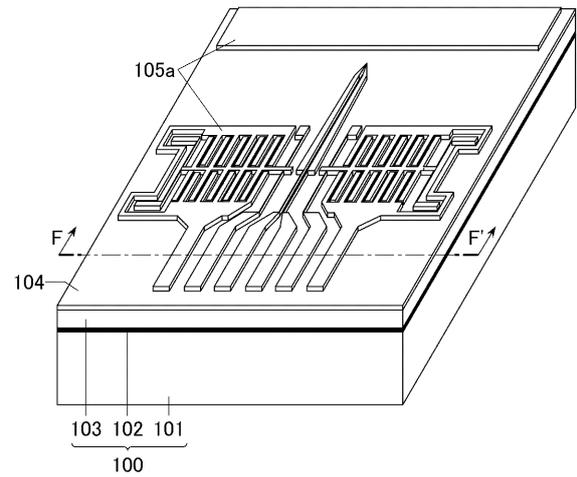
【図16】

【図16】

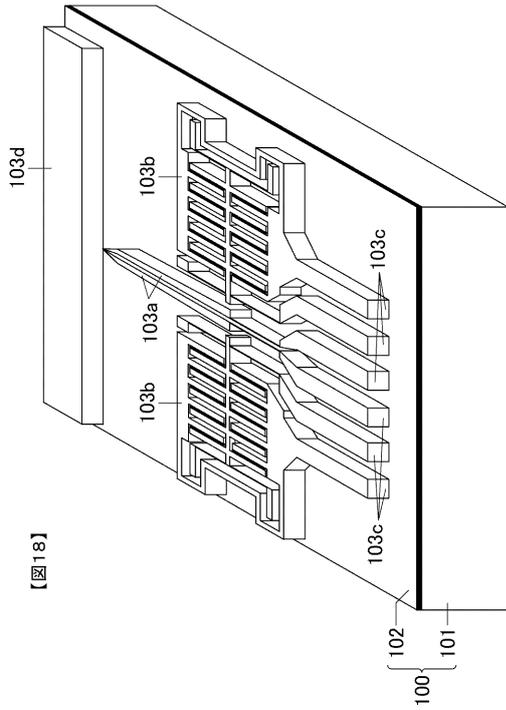


【図17】

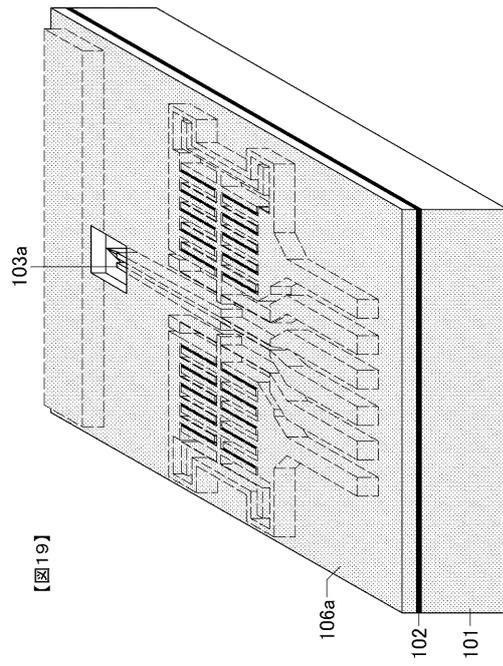
【図17】



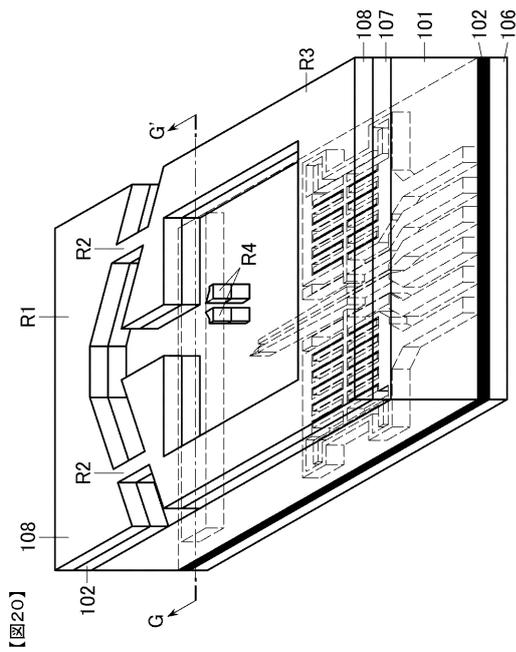
【 図 1 8 】



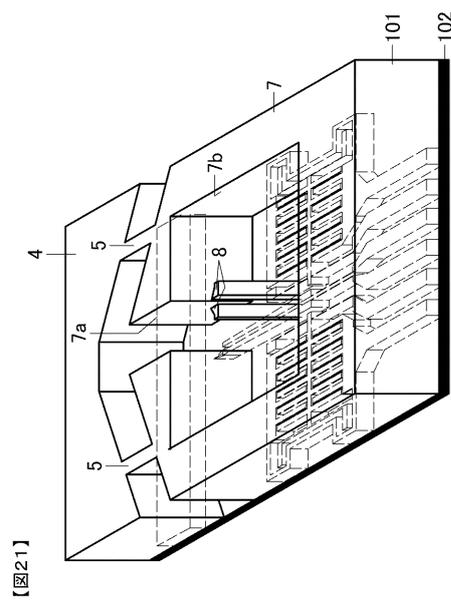
【 図 1 9 】



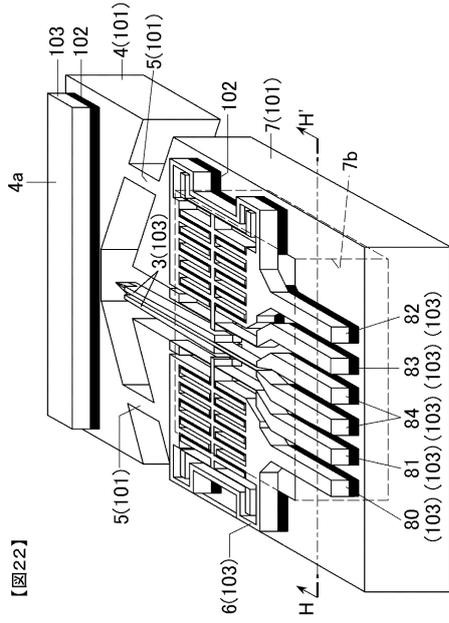
【 図 2 0 】



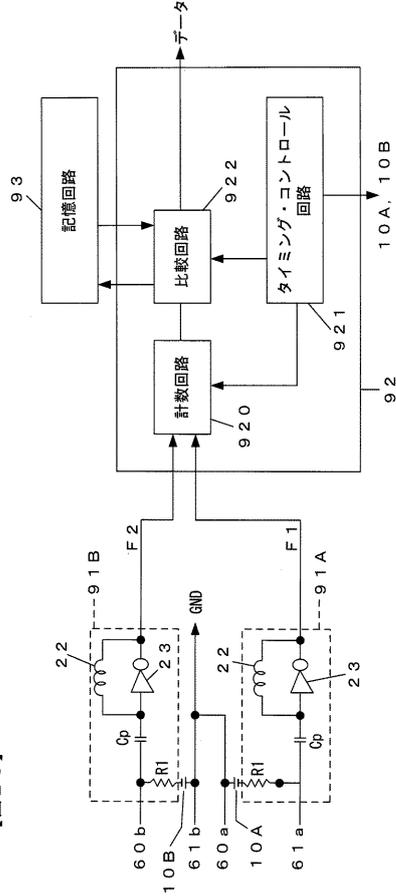
【 図 2 1 】



【図22】

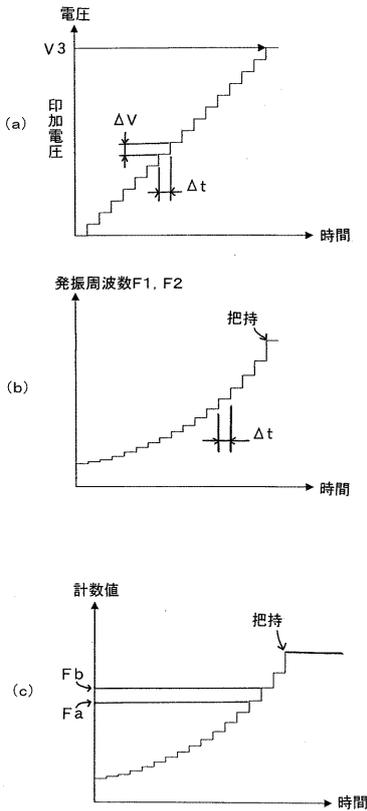


【図23】



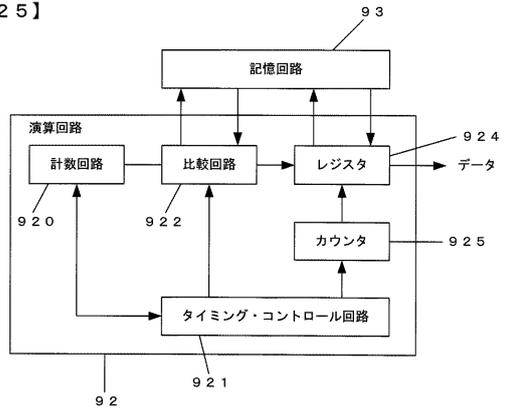
【図24】

【図24】



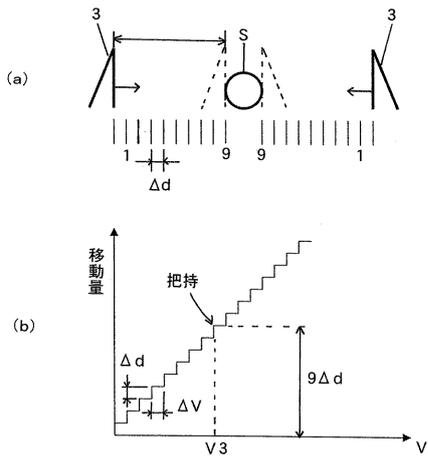
【図25】

【図25】



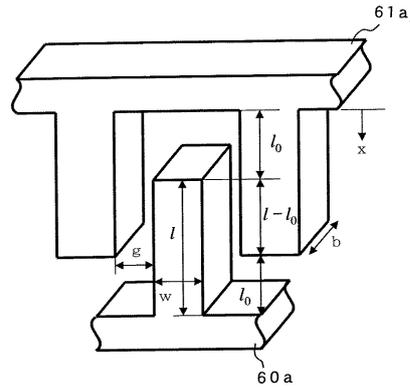
【図26】

【図26】



【図27】

【図27】



フロントページの続き

(72)発明者 宗兼 正直

静岡県駿東郡小山町竹の下36-1 エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社小山事業所内

(72)発明者 岩崎 浩二

静岡県駿東郡小山町竹の下36-1 エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社小山事業所内

審査官 松浦 陽

(56)参考文献 特開平07-032276(JP,A)

国際公開第03/045838(WO,A1)

特開平06-055473(JP,A)

特開平04-053691(JP,A)

特開平07-052072(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 1/00 - 21/02

B81B 3/00

H02N 1/00