

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7602809号
(P7602809)

(45)発行日 令和6年12月19日(2024.12.19)

(24)登録日 令和6年12月11日(2024.12.11)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 L 5/1623(2020.01)

G 0 1 L 5/167(2020.01)

G 0 1 L 5/00 (2006.01)

G 0 1 L 5/1623

G 0 1 L 5/167

G 0 1 L 5/00 1 0 1 Z

請求項の数 24 (全33頁)

(21)出願番号	特願2022-504585(P2022-504585)	(73)特許権者	522030356
(86)(22)出願日	令和2年7月22日(2020.7.22)		タッチラブ リミテッド
(65)公表番号	特表2022-542887(P2022-542887 A)		TOUCHLAB LIMITED
(43)公表日	令和4年10月7日(2022.10.7)		イギリス国 イーエイチ9 3エイチジェ
(86)国際出願番号	PCT/EP2020/070636		イ エジンバラ ブラックフォード ヒル
(87)国際公開番号	WO2021/013874		ユーケイエイティーシー ロイヤル オブ
(87)国際公開日	令和3年1月28日(2021.1.28)	(74)代理人	100147485
審査請求日	令和5年6月12日(2023.6.12)		弁理士 杉村 憲司
(31)優先権主張番号	1910563.4	(74)代理人	230118913
(32)優先日	令和1年7月24日(2019.7.24)		弁護士 杉村 光嗣
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)	(74)代理人	100195534
			弁理士 内海 一成
		(72)発明者	ザカレヤ エルモ フセイン
			イギリス国 イーエイチ9 3エイチジェ
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 コンプライアント3軸力センサ及びその製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

コンプライアント3軸力センサであって、

第1の配向の列電極のアレイを有する第1の電極層と、
第1の配向と直交する第2の配向の列電極のアレイを有する第2の電極層と、
力を受けたときに少なくとも1つの特性が変化するように構成された、前記第1の電極層と前記第2の電極層との間に設けられた力依存活性層と、
外部から加えられた力を前記力依存活性層を介して伝達するように配置された少なくとも1つの3次元バンプを備え、
外力が加えられるまで前記コンプライアント3軸力センサ内の2つ以上の層の間の間隔を維持するように配置された少なくとも1つのスペーサが設けられ、
前記少なくとも1つのスペーサは、前記力依存活性層と前記第1および/または第2の電極層との間に設けられたバインダ材の形態を成し、前記バインダ材は、隣接する列電極の間のギャップ内に設けられ、前記力依存活性層と前記隣接する列電極のそれぞれの縁との間に延在するか、または、前記力依存活性層は、互いの間にギャップを有する第1の活性層と第2の活性層を備え、前記少なくとも1つのスペーサは、前記力依存活性層内に設けられている、
コンプライアント3軸力センサ。

【請求項2】

前記力依存活性層は、量子トンネル材料、 piezo抵抗材料、または圧電材料のうちの少

なくとも1つを含む、請求項1に記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項3】

前記少なくとも1つの特性は、量子トンネリング、導電率、抵抗率または電荷である、請求項1に記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項4】

前記少なくとも1つの3次元パンプは、前記少なくとも1つの3次元パンプに加えられた力が少なくとも4つの個別の領域で前記力依存活性層を介して伝達し得るように、前記第1の電極層の少なくとも2つの列電極の上及び前記第2の電極層の少なくとも2つの列電極の上を少なくとも部分的に延在するフットプリントを有する、請求項1に記載のコンプライアント3軸力センサ。

10

【請求項5】

前記少なくとも1つの3次元パンプは、前記第1の電極層の2つの隣接する列電極の間および前記第2の電極層の2つの隣接する列電極の間の空間内に含まれるフットプリントを有する、請求項1に記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項6】

前記第1の電極層の下のベース層、前記第2の電極層の上のトップ層、前記第1の電極層と前記力依存活性層との間の第1の炭素層、前記第2の電極層と前記力依存活性層との間の第2の炭素層、および前記少なくとも1つの3次元パンプ上のカバー層のうちの1つ以上をさらに備える、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項7】

前記第1および/または第2の炭素層は、前記第1および/または第2の電極層の複数の列電極を連続的に横切る、請求項6に記載のコンプライアント3軸力センサ。

20

【請求項8】

前記少なくとも1つのスペーサは、ベース層とトップ層との間に、または前記第1または第2の電極層の上にまたはそれを通して設けられている、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項9】

前記少なくとも1つのスペーサは、ドット状、円柱状、支柱状、円筒、管状、角錐状またはメッシュ状の形状である、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

30

【請求項10】

前記少なくとも1つのスペーサは、円、正方形、長方形、ひし形、五角形、六角形、またはハニカム格子の形の中実または中空の横断面を有する、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項11】

前記少なくとも1つのスペーサは、前記スペーサのアレイを備える、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項12】

前記アレイ内のスペーサは、複数の異なる寸法を有する、請求項11に記載のコンプライアント3軸力センサ。

40

【請求項13】

前記力依存活性層は、前記第1および/または第2の電極層の複数の列電極を横切る連続層を形成する、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項14】

前記力依存活性層は、前記第1および/または第2の電極層の列電極を横切る不連続層を形成する、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項15】

前記第1および/または第2の電極層の隣接する電極の間に絶縁体が設けられている、請求項1～5のいずれかに記載のコンプライアント3軸力センサ。

【請求項16】

50

前記 1 つまたは複数の隣接する層の間に接着剤層が設けられている、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の コンプライアント 3 軸力センサ。

【請求項 17】

前記少なくとも 1 つの 3 次元バンブは、前記 コンプライアント 3 軸力センサ の残部とは異なる弾性を有するポリマーからなる、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の コンプライアント 3 軸力センサ。

【請求項 18】

前記少なくとも 1 つの 3 次元バンブは、メサ、ドーム、半球体、半球体部、円錐体、円錐体部、立方体、円筒体、半円筒体、角錐体、角錐体部、四面体、四面体部、六面体、三角柱、またはその他の多面体の形状である、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の コンプライアント 3 軸力センサ。

10

【請求項 19】

前記少なくとも 1 つの 3 次元バンブは、前記 コンプライアント 3 軸力センサ の残部の高さの少なくとも 2 倍の高さを有する、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の コンプライアント 3 軸力センサ。

【請求項 20】

前記少なくとも 1 つの 3 次元バンブは、前記 3 次元バンブのアレイを備える、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の コンプライアント 3 軸力センサ。

【請求項 21】

請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の コンプライアント 3 軸力センサ を製造する方法であって、

20

第 1 の配向の列電極のアレイを有する第 1 の電極層を設けるステップと、

前記第 1 の配向に直交する第 2 の配向の列電極のアレイを有する第 2 の電極層を設けるステップと、

力を受けたときに少なくとも 1 つの特性が変化するように構成された、前記第 1 の電極層と前記第 2 の電極層との間に設けられた力依存性活性層を設けるステップと、

外部から加えられた力を前記力依存性活性層を通して伝達するように配置された少なくとも 1 つの 3 次元バンブを設けるステップと、

外力が加えられるまで前記 コンプライアント 3 軸力センサ 内の 2 つ以上の層の間の間隔を維持するように配置された少なくとも 1 つのスペーサを設けるステップと、

30

前記力依存性活性層と前記第 1 および / または第 2 の電極層との間に設けられたバインダ材であって、隣接する列電極の間のギャップ内に設けられ、前記力依存性活性層と前記隣接する列電極のそれぞれの縁との間に延在するバインダ材の形態を成す前記少なくとも 1 つのスペーサを設けるステップ、または、互いの間にギャップを有する第 1 の活性層と第 2 の活性層として前記力依存性活性層を設けるステップ及び前記力依存性活性層内に前記少なくとも 1 つのスペーサを設けるステップと、

を備える、方法。

【請求項 22】

前記の各層、少なくとも 1 つの 3 次元バンブ、またはスペーサは、印刷、スクリーン印刷、ロールツーロール印刷、インクジェット印刷、3D 印刷、エレクトロスピニング、堆積、液滴ディスペンシング、キャストリング、コーティング、モールディング、スピニング、またはウィーピングのうちの一つによって設ける、請求項 21 に記載の方法。

40

【請求項 23】

単一の基板上に少なくとも前記第 1 の電極層および前記第 2 の電極層を形成し、前記基板を 2 つの部分に分割し、前記 2 つの部分の積み重ねるステップを含む、請求項 21 または 22 に記載の方法

【請求項 24】

前記分割および / または積み重ねステップの前に、前記少なくとも 1 つのスペーサを少なくとも 1 つの部分の上に形成するステップを含む、請求項 23 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

50

【 0 0 0 1 】

本発明は、コンプライアント三軸力センサおよびそのようなセンサを製造する方法に関する。

【 背景技術 】

【 0 0 0 2 】

ロボットや機械が人間と同じように周囲の世界と対話できるようにするためには、人間と同じように敏感な触覚も必要である。ロボットで模倣するのが最も難しい領域の 1 つは、手のひらであり、それは、人体で最も密度の高い神経受容体の 1 つであるためである。さらに、皮膚には、振動周波数だけでなく、さまざまな力 / 圧力を感知するための複数の機械受容器がある。圧力の静的感知は、ロボットが繊細な物体を処理する能力にとって最も重要である。この目的のために、圧力データを提供するために複数の触覚センサが作られている。

10

【 0 0 0 3 】

現在市場に出回っているセンサの大部分は、個々の力センサまたは他のセンサで構成されている。これらは、比較的大きな表面積と見なすことができる圧力のスカラー値のみを提供する。より高度な触覚情報を提供する他のセンサには、堅牢であるがロボットの指全体を交換する必要があるセンサが含まれる。

【 0 0 0 4 】

しかし、力は、その大きさと方向の 2 つの要素を持つベクトルである。方向情報 / データは、長年にわたってロボット工学の改善にとって大きな関心事であった。大きさと方向の両方を決定できるセンサは、通常、3 軸力センサと呼ばれている。これらのカトルク (F / T) センサは、主にロボットのエンドエフェクターアームの一部として使用され (本明細書の末尾に記載の参考文献 1 参照) 、最近ではロボットの指先の力の方向成分を測定するために使用されている (本明細書の末尾に記載の参考文献 2 参照) 。歴史的にそのようなセンサに対して多くの試みがなされており、最近の試みは比較的高密度を達成しているが、それらは固体材料および / またはマイクロマシニング技術を使ってなされている。力の読み取りは、特定の表面の周りの曲げに敏感であるだけでなく、それらの多くは曲げることができず、ハードロボットにのみ組み込むことができる。最近では、人間とロボットの両方の監視のために、コンプライアントな触覚システムの必要性が認識されている。これらのコンプライアント / コンフォーマブル圧力感知システムの多くは、電子皮膚 (e スキン) の一種として分類することができる。

20

30

【 0 0 0 5 】

最近の e スキンとデータグローブの中には、複数点または高密度の触覚情報を提供する機能を備えたものがある (本明細書の末尾に記載の参考文献 3 および 4 参照) が、ほとんどの場合、多くの現象の計測に重要な方向情報を提供することができない。それは、ロボットが物体をつかみ、地球などの重力環境でその質量を検出することを可能にするだけでなく、たとえば、歩行分析などの他の物理現象のためにインソールの床反力を測定することも可能にし得る。

【 0 0 0 6 】

最近、完全にコンプライアントな三軸力センサを作るために多くの試みがなされている。これには、e G a I n (共晶ガリウムインジウム) などの液体金属を使用したコンプライアントひずみゲージのさまざまな設計 (本明細書の末尾に記載の参考文献 5 参照) や、ロゼットひずみゲージに類似したいくつかの設計など、さまざまな難解な方法が使用されており、製造が難しく、有毒な漏れを引き起こす可能性がある。その他に、かさばる空気圧チャンバーベースのセンサや、自動調整カーボンナノチューブ (C N T) アレイがある。

40

【 0 0 0 7 】

これらのセンシングシステムのいずれかを高密度に統合することが望まれる場合、配線の考慮事項を減らし、したがってこれらが電子スキン上で占めるスペースを減らすため、マトリックスアレイが必要である。これは、金属、導電性液体、またはその他による容量センシングを使用して大部分が行われていた (本明細書の末尾に記載の参考文献 6 、 7 、

50

および 8 参照)、このタイプのセンシングは、表面とセンサで生じ得る容量結合により、それが使用される基板(例えば、人間の皮膚、金属ロボット)に敏感である。さらに、静電容量センシングは複雑な読み出し電子機器を必要とし、バックグラウンド電磁(E M)ノイズの影響を受けやすいため、多くの用途では実用的ではない。他の方法も使用されているが、すべて特定の欠点があり、圧電センシング(本明細書の末尾に記載の参考文献 9 参照)は、作動および検出の潜在的な能力を有しているが(本明細書の末尾に記載の参考文献 10 参照)、重大なバックグラウンド電磁コンパチビリティ(E M C)ノイズの影響を受けやすく、静的センシングを実行できず、磁気センシング(ホール効果および誘導法を含む)(本明細書の最後に記載の参考文献 11 ~ 14 参照)も、バックグラウンド E M C および周囲の磁場の影響を受け、これらの磁場の一部は、ロボット自体のアクチュエーターによって生成される可能性がある。

10

【0008】

さらに、e スキンは、後付けされるデバイスに干渉しないようにできるだけ薄くすると同時に、コンパクトな電子読み取りシステムを備えることが最も重要であるが、このことがほとんどのソリューション/システムに欠けている。非常に有望であるが幾分費用がかかる製造プロセスが最近開発され、これによれば、自己調整カーボンナノチューブアレイを使用して、製造プロセス中に側壁に成長される集積アレイの 3 軸情報を優れた循環再現性で読み取ることができる(本明細書の末尾に記載の参考文献 15 参照)。

【0009】

量子トンネル材料と piezo 抵抗複合材料がこれまで使用されていたが、提案されたシステムはどれも高度に集積可能またはラップ可能ではなかった。多くの場合、フレキシブル配線は、材料が剛性が高すぎるか 1 軸でしかコンプライアントでないため、または層が十分に薄くないために、十分にフレキシブルまたはコンプライアントでない。このようなデバイスのアーキテクチャは、通常、力をトルクに変換する「パンプ」の配置を含み、それは 4 つの直交配置された圧力センサまたは圧力センシングピクセル(センセル)の真上に配置される。ポストがその先端で特定の方向からの力を受けると、その力は下向きの力と横方向のトルクに変換される。その結果、4 つの圧力センサは異なる力/圧力を経験する。次に、これらの各センサの抵抗変化の量を測定することで、その力を 3 D デカルト成分(F_x 、 F_y 、および F_z)に分解することができる。piezo 抵抗材料から信号を読み取るために、さまざまな電極構成を使用することができる(本明細書の末尾に記載の参考文献 16 参照)。

20

30

【0010】

今日まで、piezo 抵抗 3 軸センサアレイの製造に最も近いのは、ポリジメチルシロキサン(P D M S)に埋め込まれた側壁を備えたインターロック構造及びマイクロピラミッドアレイ構造である(本明細書の末尾に記載の参考文献 17 参照)。前者には、比較的高密度の 3×3 アレイに展開できるという利点があるが、 $0 \sim 225 \text{ Pa}$ の非常に低い負荷で機能するのみである。後者には、 128 Pa から 44 kPa までの広いダイナミックレンジを持つという利点がある。しかし、マトリックスとして展開するのが難しいため、大量の配線が必要になる。また、全体の構造が数ミリメートルであるため、表面に巻き付けることができず、その複雑さのために、大量生産が非常に難しくなる。

40

【0011】

量子トンネリング複合材料(Q T C(R))が、1996 年に David Lussey によって発見された。これらの材料は、本質的に金属粒子と非導電性エラストマバインダまたはマトリックスからなる複合材料である。これらの材料は電流に対して非常に高い抵抗を持ち、圧力が加えられていないときは本質的に絶縁体である。圧力が加えられると、これらの抵抗は指数関数的に低下し、これは正しい電気回路を使用して測定することができる。この理由は、金属粒子が特定の濃度で材料に分散しているが、互いに物理的に接触していないためである。圧力を加えると、金属粒子は互いに接近し、互いに接触することはできないが、電子が、量子トンネリングと呼ばれる現象を介して、ある粒子から別の粒子に飛び移ることができるようになる。圧力が高いほど、粒子が互いに近づき、このトンネ

50

ル効果が増加し、材料の抵抗が減少する。これがうまく機能するためには、トンネリングは小さなスケールでのみ効果があるため、バインダ内の粒子の良好な分散と、それらの粒子が小サイズである必要がある。このため、粒子は通常、マイクロメートルまたはナノメートルのサイズで、導電性材料、通常は銀、金、マグネタイトなどの金属で構成される。それらはまた、しばしばナノパターン化され、例えば、「スパイク状」ナノ粒子は、粒子が互いにより遠い距離にある場合でも、微細なスパイクの先端がトンネル電流を増強するため、丸い粒子よりも優れたトンネル挙動を示し、これにより、感度と全体的なパフォーマンスが向上する。

【 0 0 1 2 】

Peratechにより提供されるQTC(R)ピルが、3軸センサを作成するために使用されてきたが、これらのデバイスは、小型化やセンサヒステリシスなどの他の問題に悩まされている。QTC(R)ピルは、大量生産プロセス中に集積する機能がなく、厚さと最小直径の両方がかさばるため、扱いにくく、特にセンシティブではない。

10

【 0 0 1 3 】

要約すると、市場に出回っている市販のフレキシブル力センサは、力のスカラー値のみを提供し、その方向またはせん断力は提供しない。それらは有意な屈曲に耐えることができず、また屈曲中にそれらの値を変化することもできない。更に、複数の高度なアプリケーションを可能にするために必要なデータを取得するには、3軸技術を含むアレイ技術が必要とされる。これは、たとえば、地面反力を測定する必要のある人間及びロボットの歩行分析、複雑な方法で物体を操作するロボット、繊細な物体を損傷することなく処理するロボット、衣服を身に着けた人間の筋肉活動や血流などの生理学的力を監視するロボット、潮流タービンや風力タービン上の空気や水などの流動現象を検出するロボットにおいて特に重要であり、また外科医が外科用ロボットなどで組織を「触診」することを可能にする。

20

【 0 0 1 4 】

コンプライアント3軸センサは、複数の伝達メカニズム、例えば、圧電抵抗（ひずみゲージやナノコンポジットなど）、容量的、圧電的、誘導的、光学的、または磁氣的メカニズムを使用して（研究室で）作成することができる。圧電抵抗センサと静電容量センサが、その優れた性能により主流である。ただし、静電容量センサは、それらが配置される基板の表面との容量結合のために基板に敏感である可能性があり、はるかに複雑な読み出し電子機器を必要とし、それはスペース要件と実装の複雑さのために障害になる。他のセンサの欠点としては、圧電センサは、材料に誘導された電荷が非常に速く消散するため、静的接触力を感知できないこと、これらのセンサのほとんどは温度に敏感であり、一般的に堅牢でないこと、動的外力の感知範囲が不足していること、EMCノイズに敏感であること（特に磁気および圧電センサ）、一部の圧電センサは感光性であること、などがある。さらに、これらのセンサを作成するための最もよく知られているプロセスは、本質的に低歩留まりで、一貫性がなく、スケラブルではない。多くの場合、このようなセンサを使用した測定は再現性がなく、センサの信頼性が低い。

30

【 0 0 1 5 】

利用可能なすべてのセンサの中で、実際の設定で望ましい方法で機能するのに十分に堅牢なものはない。業界では、数千から数百万のサイクルに耐えることができ、温度や過酷な環境条件に影響されず、3軸力検出を実行できる耐久性のある材料を用いた堅牢なセンサが緊急に必要とされている。また、センサは、既存のデバイスの機能を損なうことなく追加できるように非常に薄くする必要がある。また、センサの動作は、柔らかいロボットや人間の皮膚などの柔らかい表面でも機能できるように、曲げの影響を受けないようにする必要がある。

40

【 0 0 1 6 】

したがって、本発明の目的は、現在の技術とともに論じられた上記の問題の少なくともいくつかに対処する、コンプライアント三軸力センサおよびそのようなセンサを製造する方法を提供することである。

50

【発明の概要】

【0017】

本発明の第1の態様では、コンプライアント三軸力センサが提供され、該センサは、第1の配向の列電極のアレイを有する第1の電極層と、第1の配向に直交する第2の配向の列電極のアレイを有する第2の電極層と、力を受けたときに少なくとも1つの特性が変化するように構成され且つ第1の電極層と第2の電極層との間に設けられた力依存活性層と、

外部から加えられた力を活性層を介して伝達するように配置された少なくとも1つの3次元バンプを備え、

外力が加えられるまでセンサ内の2つ以上の層の間隔を維持するように配置された少なくとも1つのスペーサが設けられている。

10

【0018】

したがって、本発明の実施形態はコンプライアント3軸力センサを構成し、該センサは完全にコンプライアントおよびフレキシブルになるように薄い材料層で作ることができるが、特定の層間隔を維持するために1つまたは複数のスペーサを含み、センサ自体の曲げが誤った力の読み取りを引き起こすことはなく、それゆえこのセンサは堅牢で信頼性が高く、繰り返し使用することができる。従って、このセンサは故障することなく数千から数百万のサイクルに耐えることができ、よって産業環境で有効に動作することができる。また、一貫した出力によって、各検出素子を個別に校正するために必要となるかもしれないかなりの時間が不要になる。これは、タクトル（触覚要素）、すなわちバンプ、ごとに4つのセンセル（感知要素）を使用するいくつかの実施形態において特に有用である。さらに、このセンサはバックグラウンドノイズの影響を受けにくく、アプリケーションに応じてさまざまな力検出範囲に合わせて簡単に構成することができる（つまり、アクティブ層の厚さを増減することにより）。

20

【0019】

有利なことに、センサは、3つの異なる軸（ x 、 y 、および z ）で力を測定することができる、薄く、伸縮性があり、順応性のある、ナノコンポジットベースの触覚デバイスとして構成することができる。本発明の実施形態は、非常に小さい曲げ半径または柔らかいロボットに巻き付けるのに十分なコンプライアントであり、それにもかかわらず、信号の完全性または応答に最小限の影響しか及ぼさず、力の大きさおよび方向の正確な測定を可能にする。したがって、センサの性能は曲げの影響を受けない。柔軟な接続と電気配線は、層と電極構造を介してセンサに統合され、力をトルクに変換する「バンプ」層が上部にある。さらに、このセンサは、高い歩留まりを維持しながら、スクリーン印刷やカスタマイズ可能な材料を使用したロールツーロール印刷など、既存の簡単な大量生産プロセスのいずれかを使用して大量生産するのに適している。したがって、電子スキン用途に必要とされるような大規模アレイに展開することができる。現在、このタイプの汎用電子スキンは存在しない。このセンサは、さまざまなデバイス、製品、または衣服に高度に統合可能であり、硬く、柔らかく、伸縮性のある表面に後付けすることができる。さらに、環境に優しい材料を使用することができる。

30

【0020】

各層は（例えば、スクリーン印刷またはインクジェット印刷によって）印刷することができ、非常に小型化することができる（少なくとも、ロボットのエンドエフェクターに望まれる理想的な $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の3軸ピクセル密度まで）。いくつかの実施形態では、第1および/または第2の電極層は、下の層の上に堆積された導電性インクから形成することができる。

40

【0021】

上記の利点のすべてが、本発明の実施形態を、制御された実験室環境または学界の外の「現実の」産業用途に適した商業的に実行可能なセンサの提供するものとし得る。

【0022】

活性層は、量子トンネル材料、圧電抵抗材料、または圧電材料のうちの少なくとも1

50

つを含み得る。従って、活性層が力を受けたときに変化する可能性のある少なくとも1つの特性は、量子トンネリング、導電率、抵抗率または電荷の量である。したがって、本発明の実施形態は、加えられた力を感知信号に変換するために、量子トンネル伝導メカニズムまたはピエゾ抵抗伝導メカニズムを利用する複合材料を使用することができる。活性層は都合よく異方性であるため、薄層に堆積されたとき、その材料特性のために、垂直力に対してより選択的に反応する。

【0023】

少なくとも1つの3次元バンブは、バンブに加えられた力が少なくとも4つの個別の領域で活性層を介して伝達し得るように、第1の電極層の少なくとも2つの列電極の上及び第2の電極層の少なくとも2つの列電極の上に少なくとも部分的に広がるフットプリントを有しうる。このように、各タクテル（触覚要素）は4つのセンサー（センシング要素）またはピクセルに接続され、各センサーでの力の強さを使用して、加えられた力の大きさと方向の両方を決定することができる（つまり、せん断力と圧縮力の組み合わせをもたらす）。

10

【0024】

他の実施形態では、少なくとも1つの3次元バンブは、第1の電極層の2つの列電極の間、および第2の電極層の2つの列電極の間の空間内に含まれるフットプリントを有する。この場合、1つまたは複数のスペーサを使用して、バンブに加えられた力を4つのセンサー（感知要素）のそれぞれに再配分することができる。

【0025】

20

活性層は、それらの間にギャップを有する第1の活性層と第2の活性層を備える。

【0026】

センサは、第1の電極層の下のベース層、第2の電極層の上のトップ層、第1の電極層と活性層との間の第1の炭素層、第2の電極層と活性層との間の第2の炭素層、および少なくとも1つの3次元バンブ上のカバー層の1つ以上を備えることができる。

【0027】

第1および/または第2の炭素層は、第1および/または第2の電極層の複数の列電極を連続的に横切って延在してよい。

【0028】

少なくとも1つのスペーサは活性層内に、ベース層とトップ層との間に、または第1または第2の電極層の上にまたはそれを通して設けることができる。

30

【0029】

少なくとも1つのスペーサは、ドット状、円柱状、支柱状、円筒状、管状、角錐状またはメッシュ状の形状とし得る。

【0030】

少なくとも1つのスペーサは、円、正方形、長方形、ひし形、五角形、六角形、または八二カム格子の形の中実または中空の横断面を有し得る。

【0031】

前記センサは、前記スペーサのアレイを含み得る。前記アレイ内のスペーサは、複数の異なる寸法を有し得る。

40

【0032】

前記活性層は、前記第1および/または第2の電極層の列電極を横切る連続層を形成し得る。

【0033】

前記活性層は、前記第1および/または第2の電極層の列電極を横切る不連続層を形成し得る。

【0034】

前記センサは、前記第1および/または第2の電極層の隣接する電極間に絶縁体を備え得る。

【0035】

50

前記少なくとも１つのスペーサは、前記活性層と前記第１および／または第２の電極層との間に設けられたバインダの形態をとることができ、前記バインダは、隣接する列電極間の空隙に設けられ、前記活性層と前記隣接する列電極のそれぞれのエッジとの間に延在する。

【００３６】

前記センサは、前記１つまたは複数の隣接する層の間に設けられた接着剤層を含み得る。

【００３７】

前記少なくとも１つの３次元パンプは、前記センサの残りの部分とは異なる弾性を有するポリマーを含み得る。

【００３８】

前記少なくとも１つの３次元パンプは、メサ、ドーム、半球体、半球体部、円錐体、円錐体部、立方体、円筒体、半円筒体、角錐体、角錐体部、四面体、四面体部、六面体、三角列、多面体、またはその他の形状にし得る。

【００３９】

前記少なくとも１つの３次元パンプは、センサの残部の高さの少なくとも２倍の高さを有し得る。いくつかの実施形態では、切断力を異なる圧力で下の活性層材料を圧縮する十分に高いトルクに変換するために、パンプはセンサの残部よりもかなり高くする（例えば、高さ３ｍｍまで）ことができる。いくつかの実施形態では、活性層は、電極間に１ｍｍの幅を有し、各タクトルは、感知領域が $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} = 9\text{ mm}^2$ となるように、それぞれ２ｍｍ間隔のマトリックスアレイ内の４ピクセルで構成され得る。ただし、より感度の高い活性層を使用すると、より良い解像度を得ることができる。タクトルとセンサの間隔は、解像度を上げるために、それらが接触しないでそれらの間でトンネリングが発生しない限り、非常に小さくすることができる（たとえば、 $500\text{ }\mu\text{m}$ 以下）。このように電極を分離することは、センサのクロストークを減らすのに役立つ。

【００４０】

前記センサは、前記３次元パンプのアレイを含み得る。

【００４１】

本発明の第２の態様によれば、上記の第１の態様によるセンサを製造する方法が提供され、該方法は、

第１の配向の列電極のアレイを有する第１の電極層を設けるステップと、

前記第１の配向に直交する第２の配向の列電極のアレイを有する第２の電極層を設けるステップと、

力を受けたときに少なくとも１つの特性が変化するように構成され且つ前記第１の電極層と前記第２の電極層との間に設けられた力依存性活性層を設けるステップと、

外部から加えられた力を前記活性層を介して伝達するように配置された少なくとも１つの３次元パンプを設けるステップと、

外力が加えられるまで前記センサ内の２つ以上の層の間隔を維持するように配置された少なくとも１つのスペーサを設けるステップと、
を備える。

【００４２】

従って、本発明のこの態様の実施形態は、様々な既存の技術を使用して容易に大量生産することができるセンサ製造方法を提供する。

【００４３】

各層、パンプ、またはスペーサは、スクリーン印刷、ロールツーロール印刷、インクジェット印刷、３Ｄ印刷、エレクトロスピニング、堆積、液滴ディスペンシング、キャストイング、コーティング、モールディング、スピニング、またはウィーピングのうちの一つによって設けることができる。

【００４４】

この方法は、単一の基板上に少なくとも第１の電極層および第２の電極層を形成し、前記基板を２つの部分に分離し、前記２つの部分を積み重ねるステップを含み得る。

【 0 0 4 5 】

この方法は、前記分離および／または積み重ねステップの前に、前記少なくとも１つのスペーサを少なくとも１つの部分上に形成するステップを含み得る。

【 0 0 4 6 】

次に、本発明の非限定的な実施形態を、以下の図面を参照して、単なる例示として説明する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 4 7 】

【図 1 A】本発明の第 1 の実施形態による、ドーム形バンプを含むコンプライアント三軸力センサの上面斜視図を示す。

10

【図 1 B】図 1 A のセンサの側面図を示す。

【図 1 C】図 1 A のセンサの平面図を示す。

【図 2 A】本発明の第 2 の実施形態による、立方体形のバンプを含むコンプライアント三軸力センサの上面斜視図を示す。

【図 2 B】図 2 A のセンサの側面図を示す。

【図 2 C】図 2 A のセンサの平面図を示す。

【図 3 A】本発明の第 3 の実施形態による、円筒形のバンプを含むコンプライアント三軸力センサの上面斜視図を示す。

【図 3 B】図 3 A のセンサの側面図を示す。

【図 3 C】図 3 A のセンサの平面図を示す。

20

【図 4】本発明の一実施形態によるセンサの製造方法のフローチャートである。

【図 5】図 5 A ～ 図 5 I は、本発明の別の実施形態によるセンサを製造する方法のステップを示す。

【図 6】図 6 A ～ 図 6 I は、本発明のさらなる実施形態によるセンサを製造する方法のステップを示す。

【図 7】図 7 A ～ 図 7 G は、本発明のさらに別の実施形態によるセンサを製造する方法のステップを示す。

【図 8】図 8 A および図 8 B は、本発明の実施形態による、異なる円柱状支柱の配置を含むセンサの一部の平面図を示す。

【図 9】図 9 A および図 9 B は、本発明の実施形態による、異なるひし形支柱の配置を含むセンサの一部の平面図を示す。

30

【図 1 0】図 1 0 A および図 1 0 B は、本発明の実施形態による、異なる正方形支柱の配置を含むセンサの一部の平面図を示す。

【図 1 1】図 1 1 A、図 1 1 B および図 1 1 C は、本発明の実施形態による、異なる六角形支柱の配置を含むセンサの一部の平面図を示す。と

【図 1 2】図 1 2 A は、本発明の実施形態によるセンサの単一の触覚要素（タクテル）の上面斜視図を示し、図 1 2 B は、斜めの力が加えられる前後の図 1 2 A の触覚要素の側面斜視図を、対応する力対時間のグラフとともに示し、図 1 2 C は、斜めの力が加えられたときの図 1 2 B の触覚要素の側面図を示す。

【発明を実施するための形態】

40

【 0 0 4 8 】

図 1 A、B、および C に従って、本発明の第 1 の実施形態による 4 つの 3 次元ドーム形バンプ 1 0 2 を含むコンプライアント三軸力センサ 1 0 0 が示されている。センサ 1 0 0 は、底部膜カプセル化層の形態のベース層 1 0 4 と、第 1 の配向の列電極 1 0 6 a のアレイを有する第 1 の（底部）電極層 1 0 6 と、第 1 の配向に直交する第 2 の配向の列電極 1 0 8 a のアレイを有する第 2 の（上部）電極層 1 0 8 と、第 1 の電極層 1 0 6 と第 2 の電極層 1 0 4 との間に設けられ、力を受けたときに少なくとも 1 つの特性を変化するように構成された量子トンネル材料層の形態の力依存活性層 1 1 0 と、上部膜カプセル化層の形態のトップ層 1 1 2 とを備える。ドーム形バンプ 1 0 2 は、トップ層の上に設けられ、外部から加えられた力を活性層 1 1 0 を介して伝達するように配置される。図 1 A、B およ

50

びCには示されていないが、外力が加えられるまで、センサ100内の2つ以上の層の間に間隔を維持するために配置された少なくとも1つのスペーサが設けられる。これらのスペーサは、図4から図11Cに関連して以下でより詳細に説明される。

【0049】

図1Aおよび1Bに示されるように、任意の絶縁アレイ114が、第1の電極層106の列電極106aの間に設けられる。同様の絶縁アレイ116が、第2の電極層108の列電極108aの間に設けられる。各バンプ102は、円形底部102aと平坦上部102cまで延びる湾曲側壁102bを有する。

【0050】

この実施形態では、ベース層104、第1の電極層106、活性層110、第2の電極層108およびトップ層112のそれぞれは、0.10mmの厚さであり、0.50mmの厚さのセンサ本体を形成する。さらに、各列電極106a、108aは幅1mmであり、各バンプ102は高さが1mmで、最大直径3mmフットプリントを有する。隣接する各バンプ102の間には1mmのギャップがある。他の実施形態では、特定の用途に適合するように他の寸法を使用することができる。しかしながら、センサ本体は、通常、センサがコンプライアントになり、湾曲した形状または他の形状の表面を与えることができるように比較的薄い層に形成することが想定される。ここに示されるように、いくつかの実施形態では、剪断力を十分に高いトルクに変換して下の活性層110を異なる圧力で押圧するために、バンプ102はセンサ本体よりも十分に高くすることができる。

【0051】

図1Cに示されるように、各3次元ドーム形バンプ102は、バンプ102に加えられた力が少なくとも4つの別個の領域において活性層110を介して伝達し得るように、第1の電極層106の少なくとも2つの列電極の上に少なくとも部分的に、第2の電極層108の少なくとも2つの列電極の上に少なくとも部分的に広がるフットプリントを有する。このように、各バンプ102は、4つの感知要素（センセル）またはピクセルに接続された触覚要素（タクテル）と見なすことができ、各感知器での力の強さを使用して、図12A、BおよびCを参照して以下でさらに説明されるように、加えられた力（すなわち、剪断力および圧縮力の組み合わせをもたらす）の位置、大きさ及び方向を決定することができる。図1Cでは、列電極106a、108aはセンサ100の層が透明であるかのように破線で示されていることに留意されたい。

【0052】

センサ100は、4つのバンプ102のアレイで示されているが、センサ本体を延長して、任意の所与の用途に必要なとされる任意の数のバンプ102を含めることができる。

【0053】

記載された実施形態のいずれかにおいて、センサは、以下にリストアップした材料の任意選択により形成することができる。

【0054】

ベース層104およびトップ層106は、任意の適切な基板材料から形成することができる。1つまたは複数のポリ（パラキシレン）ポリマー（パリレン）、2,8-ジクロロトリシクロ[8.2.2.2^{4,7}]ヘキサデカ-1(12)、4,6,10,13,15-ヘキサエン（パリレン-C）、ポリジメチルシロキサン（PDMS）、ポリイミド（PI）、ポリブチレンアジベートテレフタレート（ポリブチレート）、ポリ（メチルメタクリレート）（PMMA/アクリル）、prop-2-エノート（アクリレート）、ポリエチレン（PE）、高密度ポリエチレン（HDPE）、低密度ポリエチレン（LDPE）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、熱可塑性ポリウレタン（TPU）、ポリウレタン（PU）、ポリシロキサン（シリカ）、塩化ポリビニル（PVC）、ポリエチレンイミン（PEI）、ナフタレートポリエチレン（PEN）、プロピレン（PP）、ポリスチレン（PS）、脂肪族または半芳香族ポリアミド（PI）、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）、フッ化ポリビニリデン（PVDF）、非織布またはそのブレンド、を含み得る。低いヤング率のポリマーは、より高い適合性を達成するのに役立つ可能性があり、

そのようなポリマーは、最大 1.5 MPa (メガパスカル)、より好ましくは最大 1.2 MPa 、さらにより好ましくは最大 1 MPa 、好ましくは $700 \text{ kPa} \sim 1 \text{ MPa}$ の範囲内のような少なくとも 500 kPa 、例えば $700 \sim 800 \text{ kPa}$ のヤング率、を有する。これは特に PDMS に当てはまり、これらの低ヤング率ポリマーの欠点は、多くの場合、壊れやすいか、一部の用途に対して十分な耐熱性がないことである。このため、TPU コーティングされたシリコンなどのブレンドを使用することができる。リスト内のより多くの剛性ポリマー (PEN など) は、 25 ミクロン の厚さなどで非常に柔軟性がある。考えられるさまざまな基板の厚さの例は、Parylene-C、 $500 - 10000 \text{ nm}$; PEN、 $25 - 100 \text{ ミクロン}$; PET、 $36 - 125 \text{ ミクロン}$; シリコン、 $5 \sim 500 \text{ ミクロン}$; および TPU、 $50 \sim 75 \text{ ミクロン}$ である。

10

【0055】

第1の電極層106および第2の電極層108の両方の列電極106a、108aは、金属フィラー粒子 (マイクロまたはナノスケール) を含むインクなどの導電性複合材料で形成することができる。炭素、銀、金、銅が最も一般的に使用されている。金属薄膜 (金/銅など) は、基板が伸縮性でないか、特に薄い場合に、または金属が屈曲性を有し、金属自体を伸ばす代わりに、基板が伸ばされている間に曲がる場合に、使用することができる。これらはすべて導電性が高い必要があり、使用に最適な金属は、すべての金属の中で最も展性があり延性がある金である。列電極106a、108aに使用することができるいくつかの例示的な材料は、Engineered Materials Solutions, Inc. (EMS) 社の導電性インク (CI) である (例えば、厚さ 25.4 ミクロン の厚さで $0.010 / \text{スクエア}$ 未満のシート抵抗を有する銀導電性インクである CI-1031; または厚さ 25.4 ミクロン の厚さで $50 / \text{スクエア}$ 未満のシート抵抗を有する炭素ベースの導電性インクである CI-2051)。他の適切な材料としては、AsahiTM インクおよび摂氏 20 度で約 $2.44 \times 10^{-8} \text{ m}$ 未満の抵抗率を有する金の薄膜が含まれる。

20

【0056】

活性層110は、量子トンネル材料、圧電抵抗材料、または圧電材料を含み得る。量子トンネル材料は、量子トンネリングにより抵抗が指数関数的に減少し、非常に大きな動的力範囲に亘って、 10^{12} にのぼる大きな抵抗変化をもたらす。いくつかの実施形態では、感知できる力の範囲は、 0.003 N から 200 N まで低くすることができ、より剛性の高い材料がセンサに使用される場合、その範囲はより高く拡張することができる。適切な量子トンネル材料の例は、バインダ材料に加えて、高アスペクト比の先端 (例えば、円形、スパイク状、または針状) を有するニッケルまたはシリコン (半導体) フィラー粒子を含む量子トンネル複合材料 (QTC(R)) である。二酸化チタンまたはヒュームドリカ粒子などの誘電体材料で構成される粒子も、材料に使用することができる。ボイドベアリング構造を有する金属または金属合金もまた、様々な異なるバインダと共に使用され得る。別の適切な量子トンネル材料は、スパイク状のまたは針状のマグネタイトおよび/またはニッケル粒子およびポリウレタンバインダを含む QTS(R) である。粒子は互いに接触しないが、電流は量子トンネル効果のメカニズムによって粒子を通過することができる。ゼロ次元、一次元、または二次元のナノ粒子材料は、それらのダイナミックレンジと感度が向上するため、望ましい。この理由の一部は、量先端での電界の局所的な集中が量子トンネリングを強化すること、および必要とされる材料のパーコレーションしきい値 (したがって量) が低いことに起因し得る。有利なことに、量子トンネル材料は、抵抗を測定する電極間の圧縮圧力に最も敏感であり、これにより、例えば、ひずみゲージでは提供されない有意な選択性が可能になる。量子トンネル材料は、他の多くのセンサや材料よりも、温度や環境の電磁両立性ノイズに対する感度も低くなる。

30

40

【0057】

適切な圧電抵抗材料には、ナノコンポジットおよびエレクトロスピニングされたマイクロまたはナノファイバーが含まれる。圧電抵抗材料は、それらに電位差が印加され、材料に圧力が加えられると、電流の流れを変調する。これらは、カーボン、カーボンナノ

50

チューブ（CNT）、多層カーボンナノチューブ（MWCNT）、グラフェン、ポロフェン、銀、量子ドット、またはその他の導電性または半導体マイクロ／ナノ粒子であり得る活性フィラー（マイクロ／ナノ粒子）を含む。それらはまた、分散を増加させるとともに、例えば、ファンデルワールス力による凝集を減少させるために、ナノ粒子の表面上で通常官能化される界面活性剤を含み得る。PDMS、シリコン、テトラフルオロエチレン（TFE）、プロピレン、PVDF（すべての状態で圧電性ではない）などのバインダ、基板やコンクリートに含まれる他のポリマーなどのバインダも使用される。ポリマーは、熱硬化性（すなわち、熱、湿気、光、または空気による永続的な架橋反応を受ける）であっても、非熱硬化性（すなわち、溶融）であってもよい。それらはまた、フルオロポリマーであってもよい。圧電抵抗材料はまた、粘度を制御するための溶媒を含み得るが（例えば、印刷中）、それは通常、空気中または硬化中にほとんど蒸発する。ナノ粒子は、材料の異方性挙動を強化して、材料の屈曲および伸長による圧力の読み取りを最小限に抑えながら、法線方向の圧力を感知するために、理想的には垂直に整列（および十分に分散）される。圧電抵抗材料中のいくつかの粒子は、（硬化および／または堆積前および／または中に材料全体に静または変化電界および／または磁場を印加することによって）電氣的または磁氣的に整列させることができる。たとえば、これは、硬化前に材料を通るAC（交流）電界を変化させることによる誘電泳動アライメント、または材料を通るDC電流を印加することによるDC（直流）アライメントを用いて、または純粋にDC電界によって（その場合には電流が導電性粒子を通過しないで静電界が材料に存在する）行うことができる。このアライメントは、圧電抵抗材料をより異方性にまたは光学的に透過性にするために行うことができる。圧電抵抗材料自体の導電性粒子が印加された電界に応答しない場合、それらをアライメントさせるために他のナノ粒子（例えば、強磁性である酸化鉄ナノ粒子）で機能化することができる。他の潜在的に適切な圧電抵抗材料は、上記のナノコンポジットで使用されるフィラーのいずれかの薄膜を含む。

【0058】

適切な圧電材料には、ナノコンポジットおよびエレクトロスピニングされたマイクロまたはナノファイバーも含まれる。これらは、外部応力により電荷分離を示す活性フィラー（マイクロ／ナノ粒子）を含み、酸化亜鉛（ZnO）、フッ化ポリビニリデン（PVDF）、ポリ〔（フッ化ビニリデン-コトリフルオロエチレン）〔P(VDF-TrFE)〕、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）、チタン酸バリウム（BaTiO₃）、チタン酸鉛（PbTiO₃）、タンタライトリチウム（LiTaO₃）、窒化アルミニウム（AlN）、複合元素（トルマリン）を含むケイ酸ホウ素ミネラル、チタン酸鉛マグネシウム（PMN-PT）、またはそれらの任意の組み合わせに加えて、上記の如きバインダを含む。他の潜在的に適切な圧電材料は、上記のナノコンポジットで使用されているフィラーのいずれかの薄膜を含む。

【0059】

バンプ102は、誘電体ポリマーなどのポリマー、ポリシロキサン、ゴム、シリコン、またはガラスなどのアモルファス結晶材料を含み得る。

【0060】

図2A、B、およびCは、本発明の第2の実施形態による4つの三次元直方体バンプ202を含むコンプライアント三軸力センサ200を示す。センサ200は、センサ100について上で説明したものと同一のセンサ本体を備えるが、4つのドーム型バンプ102が4つの直方体バンプ202で置き換えられている。したがって、同様の参照番号が同様の部品に使用されている。上記のように、バンプ202はそれぞれ、バンプ202に加えられた力が少なくとも4つの個別の領域で活性層110を介して伝達可能であるように、第1の電極層106の2つの列電極106aの上および第2の電極層108の2つの列電極の上に広がるフットプリントを有する。

【0061】

図3A、B、およびCは、本発明の第3の実施形態による4つの三次元円筒形バンプ202を含むコンプライアント三軸力センサ300を示す。センサ300は、センサ100

について上で説明したものと同一のセンサ本体を備えるが、4つのドーム形バンプ102が4つの円筒形バンプ302に置き換えられている。したがって、同様の参照番号が同様の部品に使用されている。上記のように、バンプ302はそれぞれ、バンプ302に加えられた力が少なくとも4つの個別の領域で活性層110を介して伝達可能であるように、第1の電極層106の2つの列電極106aの上および第2の電極層108の2つの列電極の上に広がるフットプリントを有する。

【0062】

上記の3次元バンプは単なる例であり、他の実施形態では、各バンプは、メサ、ドーム、半球体、半球体状部、円錐体、円錐体部、直方体、円筒体、半円筒体、角錐体、角錐体部、四面体、四面体部、六面体、三角柱、多面体、またはその他の形状にすることができる。さらに、センサは、任意の所与の用途に適合するように、異なる形状および/または材料のバンプを備え得る。

10

【0063】

図4は、本発明の実施形態による、上記のようなセンサを製造する一般的な方法400のフローチャートである。方法400は、第1の配向の列電極106aのアレイを有する第1の電極層106を設けるステップ402と、第1の配向に直交する第2の配向の列電極108aのアレイを有する第2の電極層108を設けるステップ404と、力を受けたときに少なくとも1つの特性を変化させるように構成され且つ第1の電極層106と第2の電極層108との間に設けられる力依存活性層110を設けるステップ406と、活性層110を介して外部から加えられた力を伝達するように配置された少なくとも1つの3次元バンプ102、202、302を設けるステップ408と、外力が加えられるまで、センサ内の2つ以上の層の間に間隔を維持するために配置される少なくとも1つのスペーサを設けるステップ410と、を備える。上記したように、スペーサが図示され、以下でより詳細に説明される。

20

【0064】

各層、バンプ、またはスペーサは、印刷、スクリーン印刷、ロールツーロール印刷、インクジェット印刷、3D印刷、エレクトロスピンニング、堆積、液滴ディスペンシング、キャスト、コーティング、モールドイング、スピニング、またはウィービングのいずれかによって設けることができる。方法400は、以下でさらに詳しく説明するように、単一の基板104の上に少なくとも第1の電極層106および第2の電極層108を形成するステップ、基板を2つの部分に分離するステップ、および2つの部分を積み重ねるステップを含み得る。方法400はまた、前記分離および/または積み重ねステップ前に、少なくとも1つの部分上に少なくとも1つのスペーサを形成するステップを含み得る。

30

【0065】

図5A~5Iは、本発明の実施形態によるセンサを製造する特定の方法500のステップを示す。図5Aにおいて、ベース層504が、底部ポリマーカプセル化層を形成する薄い膜にスピンコーティング、堆積、キャスト、またはスプレーコーティングされる。理想的には、ベース層504は、活性層のバインダ材の一部も形成し得るPDMSまたはパリレン-Cなどの所望の弾性特性を有する絶縁ポリマーで作られる。スピンコーティングの場合、これはシラン処理されたシリコンウェハ上で行うことができるため、ポリマーが付着されず、製造後にデバイスを剥がすことができる。図5Bにおいて、第1の電極層506が、(例えば、フォトリソグラフィパターンを使用して)下部列電極のマトリックスアレイにスクリーン印刷、キャスト、スパッタコーティング、またはスピンコーティングされる。第1の電極層506は、炭素含浸エラストマーなどの導電性接着剤、ポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン)ポリスチレンスルホン酸(PEDOT:PSS)などの本質的に導電性のポリマー、または金または銀などの金属から構成することができる。図5Cは、追加の剛性またはロバスト性のために、スクリーン印刷またはフォトリソグラフィパターンングを使用して、第1の電極層506の各列電極の間に絶縁層514を追加する任意のステップを示す。この場合、絶縁層514は、ベース層504と同じ材料とし得る。図5Dは、例えば、上記のような量子トンネル材料の薄い活性層510のスク

40

50

リーン印刷、鋳造、スピンコーティング、スプレーコーティング、または取り付けを示す。活性層 510 の厚さは、センサの感度を決定することができ、数十ミクロンからミリメートルまでの間で変えることができる。金属およびバインダマトリックス材料の種類は、所望の用途に応じて変えることができ、材料の組成は液体または固体の形態とすることができる。例えば、活性層 510 は、金ナノ粒子および P D M S を含むことができ、あるいは、マグネタイトおよび水ベースのポリマーインクを含むことができる。それは、既知の材料またはカスタム処方された材料としてもよい。図 5 E は、バインダ材料の薄層（ $\sim 10 - 100 \mu m$ の厚さ）を生成し、電極が堆積されるべき場所の間の領域にのみスペースを、電極の縁がスペースの縁の上になるように形成するためのスクリーン印刷、鋳造、スパッタコーティング、またはスピンコーティング（例えば、フォトリソグラフィパターンを使用する）を示す。これらのスペースは、電極間に小さなエアギャップを形成する。エアギャップを作成するためには、部分的に溶解可能な層を例えば光硬化性ポリマーを利用してパターン化するなどの標準的な微細加工または化学技術を使用することができる。図 5 F は、スペース 520 の上に、第 1 の電極層 506 に直角の第 2 の電極層 508 の上部電極のマトリックスアレイを形成するためのスクリーン印刷、鋳造、スパッタコーティング、スピンコーティングまたは取り付け（例えば、フォトリソグラフィパターンを使用する）を示す。第 2 の電極層 508 は、炭素含浸エラストマーなどの導電性接着剤、P E D O T : P S S などの本質的に導電性のポリマー、または金または銀などの金属から構成することができる。任意選択で、上部電極が形成されるスペース 520 の間に支持層が設けられる。図 5 G は、スクリーン印刷またはフォトリソグラフィパターン化技術を使用して、追加の剛性またはロバスト性のために第 2 の電極層 508 の上部電極間に絶縁層 514 を追加する任意のステップを示す。上記のように、絶縁層 514 は、ベース層 504 と同じ材料とし得る。図 5 H において、トップ層 512 が、薄い膜にスピンコーティング、堆積、キャスト、またはスプレーコーティングされて、トップポリマーカプセル化層を形成する。トップ層 512 は、P D M S またはパリレン - C などの所望の弾性特性を有する絶縁ポリマーで作ることができ、理想的には、活性層 510 のバインダ材と同じ材料で形成することができる。図 5 I において、ポリマー層のキャストイングにより 4 つの重複電極またはセンセルのすべてのセットの上にバンプ 502 を形成することによって、4 つの三次元表面バンプ 502 がトップ層 512 に追加される。特に、バンプ 502 は、センサの残りの部分とは異なる弾性および剛性を有し得る（例えば、バンプ 502 は、センサ本体よりも高い剛性にすることができる）。各バンプ 502 の三次元形状は、例えば、立方体、円錐、またはメサ / 半球とすることができ、そしてその隅部は 4 つの下にある電極とある程度重複させるべきである。これにより、アレイ内の 4 つの電極（つまり、センサ）の各グループが、単一の 3 次元または 3 軸の力検出触覚要素（タクテル）になり得る。方法 500 に記載されているすべてのステップの後に、任意選択の酸素プラズマ層、チオール層、または他の化学接着剤層を追加して、センサの堅牢性を高めることができる。ベース層 502 がスピンコーティングされている場合、それを剥がすことによってアセンブリ全体をウェーハから切り離すために、さらなるステップが必要となることがある。

【0066】

上記の方法のバインダ材料が伸縮性エラストマーである場合、センサアレイ全体を伸縮性にすることも可能であり、その潜在的な用途をさらに増やすことができる。

【0067】

センサを作成するために使用される基板またはベース層 504 は、用途に幾分依存する。厚さが $25 \sim 125$ ミクロンの P E T（ポリエチレンテレフタレート）や $10 \sim 100$ ミクロン（通常は 25 ミクロン）の厚さが変化する P E N（ポリエチレンナフタレート）のように、1 つの軸だけでコンプライアントである従来のフレキシブルエレクトロニクス基板を使用することができる。これらの材料は、高解像度が必要な場合、またはデバイスが水中などの過酷な外部環境に耐える必要がある場合に必要になり得る。過酷でない条件では、T P U（熱可塑性ポリウレタン）やシリコンのように、複数の軸でコンプライアントである基板を使用することができる。また、堆積後のナノコンポジットインクの熱硬

10

20

30

40

50

化中にシリコンに誘発される収縮を低減するために、TPUコーティングされたシリコンがある。これらの材料も25から125ミクロンの間の厚さ範囲内で使用し得る。不織布も、紙、さまざまなゴムやラテックスと同様に、基板として使用し得る。他のさまざまなポリマーも基板として使用し得る。パリレン-Cは、10nm~1ミクロンの範囲内で、たとえば、生体適合性用途や、エクストリームコンプライアンス及び/又は完全な対外界シールを必要とする用途に使用し得る。さらに、必要に応じて、印刷プロセス中の電極用のインクの拡散を容易にするために、基板の上に油を提供することもできる。

【0068】

導電性インクの第1の層を印刷することができ、この層は、第1の電極層506の導電性トラックとして機能し、導電性が高い。この第1の電極層506のマトリックスパターンを画定するために、切除されたまたは溶媒で洗い流された適切な開口部を有するステンシルフィルムまたはマスクまたはスクリーン印刷メッシュを使用することができ、それを通して、スクリーン印刷やロールツーロール印刷で一般的であるように、スキージを使用してインクを基板上に広げることができる。0.05オーム/mm²の範囲のシート抵抗率を有するこの電極層は、ナノコンポジット材料で作られ、柔軟性が伸縮性のいずれかとし得る。伸縮性インクは、TPUやシリコンなどの一定の割合の伸縮性を許容する基板と共働する。このようなインクは、多くの場合ナノメートルのオーダーの1つの寸法と、多くの場合ミクロンのオーダーの全体サイズを有する導電性粒子を含み、通常、溶剤化学物質および界面活性剤と混合されたポリマーマトリックスに埋め込まれ、インクの粒子間に均一に分散することが保証される。粒子は通常、銀または炭素で構成されるが、金、グラフェン、銅、タングステン、亜鉛などでも同様に構成することができる。スクリーン印刷では、堆積されるインクの厚さは10~50ミクロン(場合によっては100)のオーダーにし得るが、インクジェット印刷を使用した場合にはそれ以下にすることもできる。一部の電極の幅は、20ミクロンから1ミリメートルまで低くすることができる。

【0069】

電極インクが堆積した後、通常80~120の温度で硬化させる必要がある。硬化プロセス中に、ポリマー複合材料が硬化している間に溶媒の一部が蒸発する。

【0070】

センサを読み出し電子機器に接続するために必要とされる得るトラックと電極自体の構成は同じ構成であっても、または異なる構成であってもよい。任意選択で、異なる組成のインクのコーティングを、各電極の下領域に延びる導電性トラックの上に、電極用に印刷することができる。

【0071】

1つまたは複数のセンシティブ(潜在的に異方性、すなわち、材料の厚さまたはその固有の特性によって、垂直方向にのみセンシティブである)活性層が各センサに設けられる。

【0072】

さらに、誘電体ポリマーからなるスペーサが、液滴分配法を使用してセンサ上に印刷または堆積され得る。これらのスペーサは、高さが約10~50ミクロン、直径または幅が1~200ミクロンで、特定の力がかかるまでセンサのグリッド層を互いに離隔した状態に保つように機能する。それらは、また、曲げられときに力を再配分し、センサスキンに折り目やしわが生じないように機能し、これにより、センサに圧力測定値を生じさせ得る局所的な圧力ポイントまたは「バブル」を発生させ得る。

【0073】

センサが印刷されたら、高コンプライアンスで伸縮性のある材料の場合、または25ミクロン以下のような非常に薄い材料の場合は、接続された電極トレースまたはトラックの端に補強材を追加して、通常のはんだタブまたはケーブルをそれらに圧着することができ、センサの電子機器を堅固な電子処理回路に接続することができる。

【0074】

図6Aから図6Iは、本発明のさらなる実施形態による別のセンサを製造する方法600のステップを示す。各ステップにおいて、センサは3次元ビューと2次元ビューの両方

10

20

30

40

50

で示されている。図 6 A において、適切な基板材料 6 0 4 (例えば、P E N、P E T、T P U、P D M S、T P U コーティングされたシリコン、ラテックスなど) が選択され、所望の厚さに製造される。この場合、基板 6 0 4 は、以下でより詳細に説明されるように、センサのベース層とトップ層の両方を形成する。この実施形態では、基板 6 0 4 は、3 6 ミクロンの厚さの P E T である。図 6 B は、行電極と列電極が互いに直角に方向されたマトリックスアレイ内の第 1 の電極層 6 0 6 と第 2 の電極層 6 0 8 の両方を印刷するステップ (例えば、スクリーン印刷またはインクジェット印刷) を示す。電極は、通常、銀または低抵抗カーボンを含むインクから形成される。この実施形態では、電極は、2 5 . 4 ミクロンの厚さで 0 . 0 1 0 / スクエア未満の低いシート抵抗率を有する C I - 1 0 3 6 伸縮性銀ベースの導電性インクから作られる。この例では、電極は乳剤の厚さでスクリーン印刷されているため、硬化前の厚さは 1 4 ~ 2 5 ミクロンである。各電極は 2 m m の幅を有し、組み立てられたときに幅 1 c m x 長さ 1 c m になるセンサを形成するように、第 1 および第 2 の電極層 6 0 6、6 0 8 のそれぞれに 3 つの電極が設けられる。以下に説明するように、各層を容易に分離できるようにするために、基板 6 0 4 上の第 1 の電極層 6 0 6 と第 2 の電極層 6 0 8 との間に 2 m m のギャップが設けられる。図 6 C は、第 1 および第 2 の電極層 6 0 6、6 0 8 の各電極上に炭素層 6 0 7、6 0 9 をスクリーン印刷する任意選択のステップを示す。図 6 D は、第 1 および第 2 の電極層 6 0 6、6 0 8 の各電極上に活性層 6 1 0 を堆積するステップ (例えば、スクリーン印刷、インクジェット印刷、エレクトロスピニング) を示す。活性層は、圧電抵抗性および / または量子トンネリングおよび / または圧電材料層を含むことができ、層の厚さを制御するために互いの上に単一の層または複数の層として堆積することができる。活性層は、連続シートまたは例えば、線状、正形状、点状または他の形状の個別部分を含むものとし得る。この実施形態では、活性層は、グリッド領域のみの電極列および行の上に印刷された量子技術スーパーセンサ (Q T S S (登録商標)) C 7 5 ピエゾ抵抗インクで形成され、前の層と同様の厚さを有する。図 6 E において、スペーサ層 6 2 0 は、誘電体、絶縁体、または導電性材料を使用して堆積される。スペーサ層 6 2 0 は、例えば、スクリーン印刷、インクジェット印刷、または液滴ディスペンサーを使用することによって堆積することができる。この実施形態では、スペーサ層 6 2 0 は、基板 6 0 4 の片側のみに、第 2 組の電極 6 0 8 を形成する電極の間のギャップ内に形成される。この例では、スペーサ層 6 2 0 は、円筒状支柱のアレイを構成し、各支柱は 5 0 ミクロンの直径および 1 0 0 ミクロンの高さを有し、基板 6 0 4 を横切って 1 m m の間隔で設けられる。この例ではスペーサ層 6 2 0 に使用される材料は、伸縮性であると同時にフレキシブルである E M S D I - 7 5 4 8 などの誘電体である。スペーサ層 6 2 0 は、センサの片面に単一の厚い層として、複数の積み重ね層として、または層が薄い場合はセンサの両面に印刷する (この場合には正確な位置合わせが必要になる) ことができる。

【 0 0 7 5 】

図 6 F において、基板 6 0 4 は、例えば、シザーズ、レーザー、ナイフプロッターまたはメスで切断され、第 1 の電極層 6 0 6 および第 2 の電極層 6 0 8 を 2 つの部分に分離される。次に、2 つの部分は、図 6 G に示されるように、第 2 の電極層 6 0 8 が第 1 の電極層 6 0 6 の上に積み重ねられて導電性マトリックスグリッドを形成するように、内側に折り重ねられる。この構成では、第 2 の電極層 6 0 8 に取り付けられた基板 6 0 4 は、センサのトップ層を形成する。さらに、スペーサ層 6 2 0 の支柱がベース層を形成する基板 6 0 4 とトップ層を形成する基板 6 0 4 との間に延在して、第 1 の電極層 6 0 6 に設けられた活性層 6 1 0 の部分と第 2 の電極層 6 0 8 に設けられた活性層 6 1 0 の部分との間にエアギャップ 6 2 2 が存在する。センサが図 6 G のように積み重ねられると、スペーサ層 6 2 0 は、センサが曲げられたときに力を分散するように働き、この場合、活性層 6 1 0 の間のエアギャップを維持するように働き、所定のオフセット力が加えられるまで、開回路を必ず維持するように働く。いくつかの実施形態では、センサの側面をデバイスの縁に沿っておよび活性層領域の周囲に塗布した接着ペースト (例えば、シリコン P D M S) と結合させて、センサを耐久性のある方法で外部環境から密封するとともにセンサの側面を

10

20

30

40

50

ラミネートすることができる。さらに、A P T E S (3 アミノプロピルトリエトキシシラン) リンカーの蒸気堆積物をトップ層に 1 時間塗布することができる。いくつかの実施形態では、この段階でセンサをラテックスなどのコンプライアントポリマーで完全にコーティングすることができる。非常に薄いセンサの場合、ディップコーティング技術を使用することもできる。

【 0 0 7 6 】

次に、図 6 H に示されるように、力をトルクに変換するためにバンプ 6 0 2 がセンサの上面に設けられる。力の方向と大きさの両方を感知するために、バンプは、4 つの直交配置された電極 (センサ) の各セットの中央に配置する必要がある。押されたときに、加えられた力をトルクに変換する。次に、そのトルクによって一部のセンサが他のセンサよりも圧縮され、これは、接続された電子回路を介して読み取ることができる。バンプは、さまざまな印刷技術 (3 D 印刷またはシリコンエッチングなど) を使用して複数の誘電体層を印刷するか、バンプをモールド成形によって作成することができる (この場合、使用するポリマーが液体状態または部分硬化状態である間、センサをモールドに上下逆さまに配置する必要がある、その後アセンブリ全体を硬化させる必要がある)。この実施形態では、高さ 2 mm、長さおよび幅 6 mm の 4 つの立方体バンプ 6 0 2 用に、P L A からマスターモールドを作成する。次に、液体 P D M S (またはシリコン / ラテックス / T P U / ゴム) をモールドに流し込み (エラストマーと硬化剤の重量比が 1 0 : 1)、オープンで 8 0 で 1 時間硬化させる。その後、P D M S を、それが基板 6 0 4 の P E T トップ層に結合される前に、U V - オゾンまたは酸素プラズマで処理して、接着性をさらに増加させる。アセンブリを一晩放置して、P D M S バンプと P E T の間に強力な結合を形成することができる。バンプ 6 0 2 は、それらが所定の厚さでデバイスを屈曲させることを可能にする限り、それ自体が剛性またはコンプライアントであり得る。より薄いバンプ 6 0 2、ならびに非常にコンプライアントな材料から作られたものは、曲げ時の測定の歪みが少なく、したがって、デバイスが曲げられた状態にある間、垂直力に対してより良い異方性選択性を与える。

【 0 0 7 7 】

図 6 I に示されるように、最後の任意のステップは、外部要素に不浸透性のカバー層 6 2 4 を作製するために、センサの上部またはセンサのエッジまたはセンサ構造全体をラミネートまたは絶縁することを含み得る。ラミネートは、例えば完全にコンフォーマルなパリレンコーティング (より具体的には、1 ナノメートルから 1 ミクロンの厚さのパリレン - C) で行うことができ、絶縁は、シリコン、ゴム、ポリウレタン、または他のポリマーブレンドで達成することができる。

【 0 0 7 8 】

センサ内の任意の層に任意の適切なプリンターを使用できることが理解されよう。ただし、適切なスクリーンプリンターの一例は、H o r i z o n D e k i 3 ^{T M} である。

【 0 0 7 9 】

センサの読み出しは、既知のゼロ電位法を使用して行うことができる。この方法により、大きなアレイ内の隣接するセンサ間のクロストークが最小に抑えられる。抵抗膜アレイ回路では、ある検出素子の抵抗が周囲の他の検出素子の抵抗に近づくと、大きな干渉電流が発生し得る。ここで説明するような負のピエゾ抵抗係数センサでは、検出要素は高抵抗で始まり、圧力が加えられると抵抗が減少する。これは、記載のセンサでは、材料が静止時に高い抵抗を有するため、低い圧力がより高い干渉を生成することを意味する。これらのセンサの動作のより詳細は、図 1 2 A ~ 図 1 2 C に関連して以下に提供される。

【 0 0 8 0 】

図 7 A ~ 7 G は、本発明のさらに別の実施形態によるセンサを製造する方法のステップを示している。このセンサは、上記の他のセンサとは動作が異なる 4 線式シングルポイントセンサと見なすことができる。特に、このセンサは、電極グリッドの 4 本のワイヤーの間にある抵抗領域に加えられている圧力の「重心」を測定するという点で異なる。このセンサのバンプは、重心の位置が力の方向を示すことができるという点で、ジョイスティック

クと同じように機能する。

【0081】

図7Aに示されるように、基板704の適切な材料がその厚さと一緒に選択される。この実施形態では、基板704は、36ミクロンの厚さのPTEで形成される。図7Bは、同じ基板704上の第1および第2の電極層706、708の両方のスクリーン印刷を示しており、各層の電極は互いに直角に方向されている。この実施形態では、電極は、25.4ミクロンの厚さで0.010 /スクエア未満の低いシート抵抗率を有する伸縮性銀ベースの導電性インクEMSCI-1036TMで作られる。この実施形態では、電極は、硬化前のインクの厚さが14から25ミクロンである乳剤の厚さでスクリーン印刷される。電極は2mm幅であり、2つの電極のみが、第1および第2の電極層706、708のそれぞれの縁に沿って設けられ、1cm×1cmのフットプリントセンサを形成する。

10

【0082】

図7Cは、第1の電極層706の2つの電極の上に堆積され、それらの間に延在する第1の高抵抗炭素層707と、第2の電極層708の2つの電極の上に堆積され、それらの間に延在する第2の高抵抗炭素層709のスクリーン印刷を示す。この実施形態では、両方の高抵抗炭素層は、ECI 7004HR及びNCI 7002インクと呼ばれる2つのHenkelTMインク(80/20%の重量混合比)から混合され、硬化後に10ミクロンの厚さで~約10,100 /スクエアのシート抵抗率を得る。堆積は、乳剤の厚さが約20~40ミクロンのメッシュを介して実行される。他の実施形態では、高抵抗炭素層は、EMSMTCI-2050LR(25.4ミクロンで1,500~2500 /スクエア/ミル)および/またはHR(25.4ミクロンで10M /スクエア/ミル未満)を使用して形成され得る。いくつかの実施形態では、第1および第2の高抵抗炭素層707、709は異なってもよい。

20

【0083】

このタイプのセンサの場合、高抵抗炭素層707、709が、デバイス内の鉛抵抗と外界と接触する接触抵抗の合計よりもはるかに高い抵抗であることが重要である。この理由は、デバイスの上部電極層708または底部電極層706の間に電圧が印加されるとき、電圧降下の大部分が抵抗性炭素領域内で発生することが望ましいためである。これにより、パンプ層に加えられたトルクの圧力の中心の位置を確実に測定することができる。デバイスに圧力が加えられると、両方の活性層710が所与の点の周りで互いに接触する。デバイスの片側(上部または底部)で電極間に電位差が印加され、デバイスの反対側の電極のいずれかから電圧が測定されると、これにより分圧回路が形成される。炭素面の反対側の電極の1つから読み取られた電圧は、その両端に電位差が加えられており、圧力が加えられている2つの電極間の圧力の位置(1つの軸)を示す。この電氣的構成は、デバイスの反対側の電極/カーボン層で他の軸の位置を読み取るために反転させることができる。

30

【0084】

図7Dは、第1の高抵抗炭素層707および第2の高抵抗炭素層709のそれぞれの上の活性層710のスクリーン印刷、インクジェット印刷またはエレクトロスピニングを示す。この実施形態では、活性層710は、Quantum Technology SuperSensors(QTSS(R))C75の piezo 抵抗性水性インクで形成される。

40

【0085】

図7Eにおいて、短い円柱状スペーサドットの正方形アレイからなるスペーサ層720が、基板の片側(第1の側)の活性層710の上に設けられる。各スペーサドットの高さは200ミクロンで、隣りのドットから2mm間隔である。この実施形態では、スペーサ層720は、Stratasys' TangoTM(すなわち、TangoPlusTM、FLX930)材料を用いて印刷され、この材料はゴム状熱可塑性エラストマーをシミュレートするPolyJetTMの印刷可能材料である。この材料の典型的な特性は、26~28のショア硬度と170~220%の破断点伸びにある。したがって、スペーサは、デバイス自体が平らな状態で使用された場合でも、湾曲している間デバイスの上部と下部の引張応力と圧縮応力の差に耐えることができる。次に、基板704を、例えば、はさみ

50

、レーザー、ナイフプロッターまたはメスで切断して、第1の電極層706および第2の電極層708を2つの部分に分離する。次に、図7Eに示されるように、第2の電極層708が第1の電極層706の上に積み重ねられて導電性マトリックスグリッドを形成するように、2つの部分が内側に折り重ねられる。この構成では、第2の電極層708に取り付けられた基板704がセンサのトップ層を形成する。さらに、図7Fに示されるように、スペーサ層720の支柱が、活性層710の中央にエアギャップが存在するように、第1の電極層706上の活性層710と第2の電極層708上の活性層710との間に延在する。デバイスが切断され折り重ねられると、デバイスの縁の周りに塗布されたシリコンPDMS接着剤で側面が接着される。次に、以下に説明するPDMS接着を促進するために、APTES(3 アミノプロピルトリエトキシシラン)リンカーの蒸気堆積物がデバイスの上面に1時間塗布される。

10

【0086】

図7Gにおいて、バンプ702が、センサの中央に、電極グリッドから離して設けられる。バンプ702は、キャストイングまたは印刷することができ、これには多くのポリマー、例えばよりコンプライアントなPDMS、またはより低いコンプライアントSU8を使用することができる。バンプ702は、所望の用途に応じて、様々な形状、サイズ、および高さを有することができる。この実施形態では、マスターモールドは、高さが2mmで、長さおよび幅が6mmである直方体バンプ702用にPLAから作られる。液体PDMSを型に流し込み(10:1のエラストマー対硬化剤の重量比)、オーブンで80で1時間硬化される。その後、PDMSはUV-オゾンまたは酸素プラズマで処理して接着力をさらに高めてから、基板704のトップ層に接着される。アセンブリはPDMSバンプと基板704との間に強い結合を形成するために一晩放置される。

20

【0087】

このタイプのセンサの場合、読み取りは、バンプ702ごとに3つの別々の読み取り値で構成される。以下で説明するように、1つの読み取り値がX位置に、もう1つがY位置に必要とされる。毎回、電圧(および電流)が一方の平面の電極(すなわち、第1または第2の電極層706、708)を横切って印加され、反対平面上の1つの電極(すなわち、第1または第2の電極層706、708の他方)が電圧を読み取るために使用される。これは分圧回路を形成し、読み取られる電圧は、力が加えられて両方の平面が接触する(xまたはy)位置に対応する。高抵抗カーボン層は、デバイスを外界に接続するリード線及び接触抵抗よりも抵抗はるかに高く、それらの抵抗は本質的に無視できることが重要である。そうでなければ、リード線で大幅な電圧降下が発生するため、位置の読み取りが制限されることになる。

30

【0088】

力自体を読み取るために、活性層710(すなわち、piezo抵抗材料)を間に挟んで、電流が一方の平面から他方の平面に流れなければならない。これは、上面の1つの電極(すなわち、第2の電極層708)と底面の別の電極(すなわち、第1の電極層706)との間に電位差を印加することによって行うことができる。この場合、加えられた圧力が活性層の抵抗に影響を与え、デバイスを流れる電流を変化させる。この結果として、活性層710を横切る全体的な電圧降下も変化する。両平面(電流を伝達するために使用されていない)上の対向電極を使用することによって、どちらかの場所の電圧を測定することができる。これは、電子文献で4点プローブ測定として知られているものに対応し、それは、接触抵抗、この場合はデバイスへの電極とそれに対応するリード線の電圧降下を測定しないためである。しかし、電圧降下を測定しているため、完全ではない。加えられる圧力の位置に応じて、高抵抗面上の異なる距離を電流が通過する必要があるため、これにより、抵抗が変化し、したがって、圧力の位置によって抵抗層で電圧降下が変化する。高抵抗層の抵抗と均一性を知ることで、位置に基づいて、デバイスのキャリブレーションによって、抵抗測定値をどの程度調整する必要があるかがわかる。したがって、センサの上部のバンプ702が力を受けると、その剪断成分がバンプ702にトルクを生じさせ、圧力の中心をデバイスの特定の領域に集中させる。この位置と大きさを測定することで、力の平均

40

50

的な方向と大きさを測定することができる。

【 0 0 8 9 】

本発明の実施形態のいずれかにおけるスペーサは、力を分散し、オフセット力が加えられていないときに開回路が存在することを確認しながら、力を分散し、圧力として誤って記録されるであろうしわがセンサに形成されるのを防ぐのに役立つ。図 8 A ~ 図 1 1 C は、本発明の実施形態で使用するための様々な例示的なスペーサ配置を示す。説明のために、それぞれの場合のセンサの一部のみが示されている。

【 0 0 9 0 】

図 8 A および図 8 B は、本発明の実施形態による、異なる円柱状スペーサ配置を含むセンサの一部の平面図を示す。いずれの場合にも、基板 8 0 4 は、第 1 の電極層 8 0 6 に 3 つの水平電極および第 2 の電極層 8 0 8 に 3 つの直交電極を備えている。活性材料 8 1 0 が、第 1 の電極層 8 0 6 の電極と第 2 の電極層 8 0 8 の電極との間に設けられている。いずれの場合も、スペーサは円柱状の支柱、柱、または点で形成される。

10

【 0 0 9 1 】

図 8 A では、スペーサ 8 2 0 a は、基板 8 0 4 の両側に印刷され、電極マトリックスの重複部分の間に、各電極層から、または各電極層を通して基板 8 0 4 まで延在するように配置されている。

【 0 0 9 2 】

図 8 B では、スペーサ 8 2 0 b は、基板 8 0 4 の片側のみに印刷され、電極マトリックスの重複部分の間で、基板 8 0 4 の下部と上部の間に延在するように配置されている。

20

【 0 0 9 3 】

図 8 A および 8 B のスペーサは、誘電体ポリマー、ポリシロキサン、ゴム、シリコーンなどのポリマー、またはガラスなどのアモルファス結晶性物質で形成することができる。スペーサは、円柱状、円錐状または円錐断片、角錐または角錐断片、直方体、半球状または半球断片、半円柱状、四面体または四面体断片、六面体、三角柱、多面体、その他の形状にすることができる。いくつかの実施形態では、スペーサは、センサ全体の高さ、形状、寸法、または間隔が変化するように傾斜させることができる。一例では、スペーサは、幅 5 0 ミクロン、高さ 2 5 ミクロン、間隔 1 mm の円錐形とすることができる。

【 0 0 9 4 】

図 9 A および 9 B は、本発明の実施形態による、異なるひし形のスペーサ配置を含むセンサの一部の平面図を示す。いずれの場合も、基板 9 0 4 は、第 1 の電極層 9 0 6 に 3 つの水平電極および第 2 の電極層 9 0 8 に 3 つの直交電極を備えている。活性材料 9 1 0 が第 1 の電極層 9 0 6 と第 2 の電極層 9 0 8 の電極の間に設けられる。いずれの場合も、スペーサはひし形または正方形のメッシュで形成される。

30

【 0 0 9 5 】

図 9 A では、スペーサ 9 2 0 a は、基板 9 0 4 の片側のみに印刷され、電極マトリックスの重複部分の間に、各電極層から、または各電極層を通して延在するように配置されている。

【 0 0 9 6 】

図 9 B では、スペーサ 9 2 0 b は、基板 9 0 4 の両側に印刷され、電極マトリックスの重複部分の上および / または間で、基板 9 0 4 の下部および上部の上および / または間に延在するように配置されている。

40

【 0 0 9 7 】

図 9 A および 9 B のスペーサは、例えば、様々な軟質ポリマーのいずれかを使用して 3 D 印刷された、織布メッシュまたは可撓性 / ゴム性ポリマーメッシュで作ることができる。

【 0 0 9 8 】

図 1 0 A および 1 0 B は、本発明の実施形態による、異なる正方形のスペーサ配置を含むセンサの一部の平面図を示す。どちらの場合も、基板 1 0 0 4 は、第 1 の電極層 1 0 0 6 に 3 つの水平電極を備え、第 2 の電極層 1 0 0 8 に 3 つの直交電極を備えている。第 1 の電極層 1 0 0 6 の電極と第 2 の電極層 1 0 0 8 との間に活性材料 1 0 1 0 が設けられて

50

いる。どちらの場合も、スペーサは中空の四角い支柱で形成されている。

【 0 0 9 9 】

図 1 0 A では、スペーサ 1 0 2 0 a は、基板 1 0 0 4 の片側のみに印刷され、大きなセンサ領域に広がるように配置され、例えば、一つの正方形につき 9 つの電極の重複部分を含んでいる。

【 0 1 0 0 】

図 1 0 B では、スペーサ 1 0 2 0 b は、基板 1 0 0 4 の片側のみに印刷され、例えば、各電極マトリックスの重複部分の間の小さなセンサ領域の周りに延在するように配置されている。

【 0 1 0 1 】

図 1 0 A および 1 0 B のスペーサは、円筒形またはひし形スペーサについて上で説明したものと同様の材料で形成することができる。

【 0 1 0 2 】

図 1 1 A、1 1 B および 1 1 C は、本発明の実施形態による、異なる六角形のスペーサ配置を含むセンサの一部の平面図を示す。いずれの場合も、基板 1 1 0 4 は、第 1 の電極層 1 1 0 6 に 3 つの水平電極、第 2 の電極層 1 1 0 8 に 3 つの直交電極を備えている。第 1 の電極層 1 1 0 6 の電極と第 2 の電極層 1 1 0 8 との間に活性材料 1 1 1 0 が設けられている。いずれの場合も、スペーサは異なるサイズの中空の六角形（すなわちハニカム）メッシュで形成されている。

【 0 1 0 3 】

図 1 1 A では、スペーサ 1 1 2 0 a は、基板 1 1 0 4 の片側のみに印刷され、電極マトリックスの重複部分の間に延在するように配置されている。

【 0 1 0 4 】

図 1 1 B では、スペーサ 1 1 2 0 b は、基板 1 1 0 4 の片側のみに印刷され、各電極マトリックスの重複部分の上および / または間に、小さなセンサ領域の周りに延在するように配置されている。

【 0 1 0 5 】

図 1 1 C では、スペーサ 1 1 2 0 c は、基板 1 1 0 4 の片側のみに印刷され、電極マトリックスの重複部分の間に延在し、前記電極マトリックスの重複部分を結合するように配置されている。

【 0 1 0 6 】

図 1 1 A、1 1 B、および 1 1 C のスペーサは、押し出しメッシュまたは印刷メッシュで形成することができる。これらは、ハニカム、三角形、四辺形、ひし形、フェルール付きひし形、正方形、またはプレーン形状にすることができる。用途に応じてさまざまな織り方を選択でき、センサ活性層が十分に互いに接触できるようにする必要がある。織りメッシュは他のスペーサ層と同じ目的を持っている。平置織り、綾織り、平織り、綾置織り、ロッククリンプ、インタークリンプ、綾織り畳織りの二重またはストランド織りを使用することができる。メッシュは、非導電性の繊維系で作ることができ、または導電性の糸（例えば、銀またはチタン）を使用して、圧力をセンサ内に分散させながら感度を高めることができる。

【 0 1 0 7 】

完全にコンプライアントなフラットセンサを作成するには、複数の課題がある。センサは薄く、電極はコンプライアントである必要があり、センサは所望の力以外の力に反応してはならない。量子トンネル活性層材料は、非常に高い抵抗（ $\sim 10^9$ ）で開始するため、有利である。この材料への接触は複数の異なる材料で構成することができるが、この材料を使用して物体を包み込むことができるように、電極は柔軟でわずかに弾性である必要がある。これを行う 1 つの方法は、それらが圧力によってわずかに変化する場合でも、伸縮性のある銀電極を作成するか、導電性接着剤を交互に使用することである。

【 0 1 0 8 】

上で説明したように、これらのセンサのグリッド / マトリックスは、両側で直角方向に

10

20

30

40

50

走る行電極と列電極の間にアクティブ層を挟むことによって作成することができる。これは、以前は非コンプライアントな電極と電子機器で行われ、曲げ半径が制限されているが巨視的に観察可能な表面では完全にはコンプライアントでない「フレキシブル」電子機器でも行われていた。マトリックスを読み取るには、アレイ内のすべてのセンセル（検出ピクセル）を1つずつ読み取り、マイクロコントローラまたはその他の信号処理ハードウェアおよびソフトウェアに接続するマルチプレクサが必要である。これは、以前に非コンプライアントの電極と電子機器で行われ、曲げ半径が制限されているが巨視的に観察可能な表面では完全にはコンプライアントでない「フレキシブル」電子機器でも行われていた。マトリックスを読み取るには、アレイ内のすべてのセンサ（検出ピクセル）を1つずつ読み取るマルチプレクサが必要とされ、それをマイクロコントローラまたはその他の信号処理ハードウェアおよびソフトウェアに接続する必要がある。

10

【0109】

本発明の実施形態では、単純なデバイスが提案され、それは、デバイス全体がコンプライアントであるだけでなく、グリッド内の4つのセンセルのすべてのクラスターが、デバイスのトップ層に力伝達構造として機能するバンプまたは形状を含むことによって3D力感知「タクトル」（触覚ピクセル）に変換され得るものである。

【0110】

提案された装置は、ロールツーロール印刷、スクリーン印刷、または同様の微細加工技術などの印刷を使用する大量生産用に作られている。

【0111】

上記のセンサの主な動作メカニズムは次のとおりあり、4つのセンサのそれぞれの抵抗の変化とそれらの正規分布を使用して、センサにかかる3方向の力を推定する。各バンプは、力の伝達構造として機能する。各バンプに方向性のある力を加えることによって「バンプ」を変形させることにより応力が生成される。力の垂直成分が、その下の各センセルを均等に圧縮する（対称的な抵抗変化をもたらす）が、せん断成分が、アクティブ層にトルクを生成し、いくつかのセンセルを他のセンセルよりも圧縮する（非対称の抵抗変化をもたらす）。この感度の調整は、活性層の厚さとバインダ材、および「バンプ」とその下にある基板材料の高さと剛性の両方を変えることによって行うことができる。

20

【0112】

クロストークや短絡を引き起こす層の間にトンネリングが確立されなければ、個々のグリッド線は10 μm まで小さくすることができ、それらの間の間隔を必要なだけ小さくすることができる。

30

【0113】

信号を読み取るには、各列と行の電極を適切な電氣的読み取り回路に接続する必要がある。信号を読み取るとき、各電極は互いに空間的に分離されるため、抵抗性クロストークノイズは大幅に低減される。しかし、各センセルのクロストークのさらなる低減または信号対雑音比（SNR）の向上を達成するには、次のいずれかの方法の一つを採用することができる。i) P u b r i c k の電圧ミラー法（この場合には、測定ポイントで考慮されていないドライラインは、出力電圧に等しい電位に設定される）、またはii) より単純なゼロ電位法（この場合には、走査電極の電圧がゼロに設定される）。これらは、クロストークの影響を排除する等電位ゾーンを形成する。上記の回路を実際に構成するには、複数の方法がある。

40

【0114】

デバイスのキャリブレーションが必要であるが、適切なトレーニングデータが与えられれば、機械学習または人工知能アルゴリズムでセンサの動作を「学習」させることもできる。このようなセンサで測定できる力の範囲は、活性層の配合、そのバインダ、およびセンサの全体的な厚さに応じて、0.01 Nから理論的に無限の量までの範囲である。

【0115】

どの層も好ましい厚さはないが、デバイス全体がコンプライアントであるためには、厚さが1 mm以下、薄さが10 nm以上であることが期待される。表面のバンプは、列記さ

50

れたものとは異なる形状のものとするができるが、ほとんどの場合、4つのセンサーごとに1つのバンプを有するという制約が適用される。

【0116】

図12Aは、本発明の実施形態によるセンサーの単一触覚要素（タクテル）1200の上面斜視図を示す。このタクテルは、読み取られるピクセルを表す4つのセンサーC1、C2、C3およびC4上に設けられたドーム形のバンプ1202を有する。以下の表1は、異なる力を受けたときに4つのセンサーのそれぞれが受ける電気抵抗の変化を示している。したがって、このようなセンサーの電氣的読み取り値は、加えられた力の位置、大きさ、および方向の測定値に変換することができる。

【表1】

力の方向		電気抵抗の変化			
		C1	C2	C3	C4
せん断力	+X		+		+
	-X	+		+	
	+Y	+	+		
	-Y			+	+
垂直力	Z	+	+	+	+

表1：力の方向に応じたセンサーの変化

【0117】

図12Bは、バンプ1202に斜めの力が加えられる前と後の図12Aの触覚要素1200の側面斜視図と、対応する力対時間のグラフを示す。これは、斜めの力が加えられたときにx、y、z軸で受ける力の違いを示している。

【0118】

図12Cは、バンプ1202に斜めの力が加えられたときの図12Bの触覚要素1200の側面図を示す。これは、図解を容易にするために、上部及び下部基板1204の間に挟まれた活性層1210を含む簡略化されたセンサ層構造を示す。この例では、力の印加時にセンサーC3は小さな変形を経験し、一方、センサーC4は大きな変形を経験する。これは、C4よりもC3の方が弱い変化に変換され、加えられた力の方向を正確に特定するのに役立つ。

【0119】

記載のセンサには多くの用途がある。これらは、信頼性の高い動作をするコンプライアント3軸力センサに対する産業、家庭、および医療の大きな需要に由来する。例としては、ロボット工学（ハードおよびソフトロボット、スリップ検出）、電子皮膚、人工器官、人間-ロボットインタラクション、壁や床などの触覚システム及び表面、仮想現実、ゲーム、構造的完全性の監視（飛行機の翼、建物）、スマート衣類（手袋など）、歩行分析インソール（地面反力の方向、全圧、糖尿病性足潰瘍の監視など、それらは力感知プレートを交換できる）、スポーツ衝撃監視（衝撃の方向と大きさを検出できる）、埋め込み型デバイス、ウェアラブル（例：スマートホームでの使用）、生物医学装置、薬物送達パッチ/システム、伸縮可能電子回路、アダルトおよびセックス玩具産業（例：リアルタイムのパフォーマンス/フィードバックおよび/または適応装置を備えた玩具または人形）、動きを感知する枕、じゅくそう、血圧の監視及び検出を監視する病院のベッド（例：衣服やウェアラブルなどで血圧及び血流を監視することによる冠状動脈性心臓病（CVD）診断のために）、筋力/運動、疲労の監視及び検出、寿命またはエネルギー生成能力を向上さ

せるための潮または風力タービンのブレード周辺の流れ特性の監視、自律型ロボットが想定される可能性があり、高レベルの器用さと触覚情報を必要とするすべての領域（例：倉庫のピッキングと仕分け、宇宙探査、搜索救助、高齢者ケア、料理、電子機器の組み立て、フィッシング、ソーシャルロボットなど）、飛行機の翼（重量及びコストの削減とともにより良い翼の設計に役立つ負荷／力の監視）、建設作業環境での力の監視、馬のサドル圧力の監視、筋力のマッピング／監視、組織の硬度／密度の監視（例：乳がんの診断／女性の出産時期の予測）、人口装具（例：切断者の場合だけでなく、とりわけ、パーキンソン病、ALSなどの特定の病気の振戦補償のためにも使用することができる）。

【0120】

いくつかの実施形態では、皮膚の高周波および低周波のメカノレセプタをよりよく模倣するために、パンプ層を取り付ける前に圧電抵抗層および圧電層を積み重ねることができる。

10

【0121】

さらに、デバイスを逆さまに（つまり、パンプをユーザーの皮膚に接触させ、ベース層に力を加える状態で）使用することもできる。これは、デバイスの表面に空気力学的または流体力学的特性が維持される場合に特に有益である。

【0122】

以上の説明は例示的な実施形態を説明したが、当業者は、特許請求の範囲によって定義される本発明の範囲内でこれらの実施形態に多くの変形を行うことができることは理解されよう。さらに、1つまたは複数の実施形態の特徴は、1つまたは複数の他の実施形態の特徴と混合して組み合わせることができる。

20

【参考文献】

【0123】

[1] U. Kim, D. H. Lee, Y. B. Kim, D. Y. Seok, and H. R. Choi, "A novel six-axis force/torque sensor for robotic applications," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1381-1391, 2017.

[2] Y. Guo, J. Kong, H. Liu, H. Xiong, G. Li, and L. Qin, "Sensors and Actuators A: Physical A three-axis force fingertip sensor based on fiber Bragg grating," *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 249, pp. 141-148, 2016.

[3] S. Harada, K. Kanao, Y. Yamamoto, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, "Fully printed flexible fingerprint-like three-Axis tactile and slip force and temperature sensors for artificial skin," *ACS Nano*, vol. 8, no. 12, pp. 12851-12857, 2014.

30

[4] S. Sundaram, P. Kellnhofer, Y. Li, J.-Y. Zhu, A. Torralba, and W. Matusik, "Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove," *Nature*, vol. 569, no. 7758, pp. 698-702, 2019.

[5] D. M. Vogt, Y. L. Park, and R. J. Wood, "Design and characterization of a soft multi-axis force sensor using embedded microfluidic channels," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 10, pp. 4056-4064, 2013.

[6] R. Agarwal and S. Bergbreiter, "Measurement of shear forces during gripping tasks with a low-cost tactile sensing system," *2019 2nd IEEE Int. Conf. Soft Robot.*, pp. 330-336, 2019.

40

[7] H. K. Lee, J. Chung, S. H. Chang, and E. Yoon, "Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 21, no. 3, 2011.

[8] K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Stretchable tri-axis force sensor using conductive liquid," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 215, pp. 123-129, 2014.

[9] P. Yu, W. Liu, C. Gu, X. Cheng, and X. Fu, "Flexible piezoelectric tactile sensor array for dynamic three-axis force measurement," *Sensors (Swi*

50

【 図 1 C 】

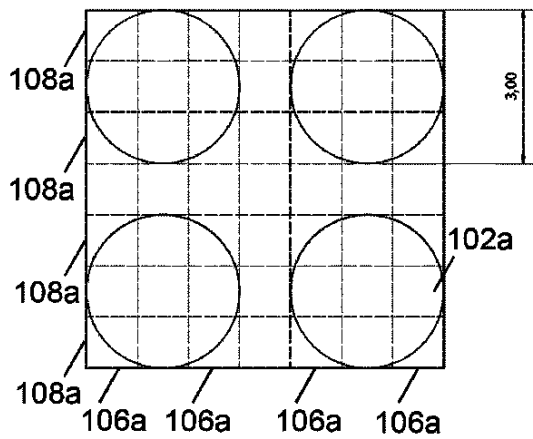


Fig. 1C

【 図 2 A 】

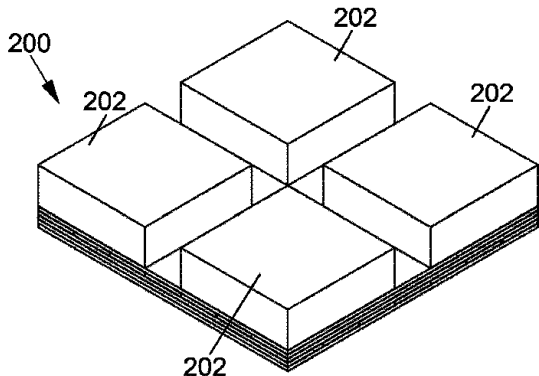


Fig. 2A

【 図 2 B 】

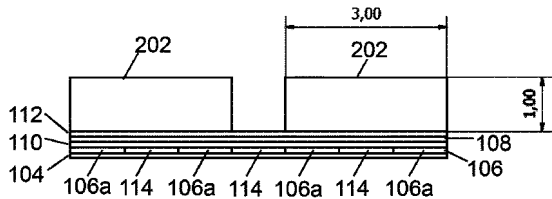


Fig. 2B

【 図 2 C 】

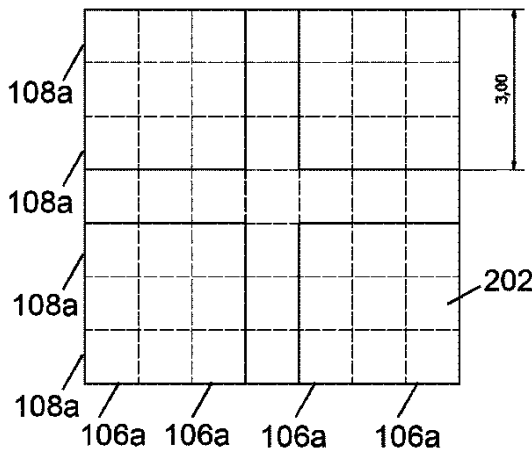


Fig. 2C

10

20

30

40

50

【図 3 A】

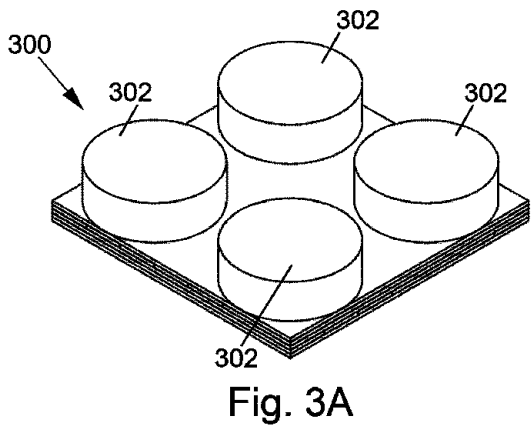


Fig. 3A

【図 3 B】

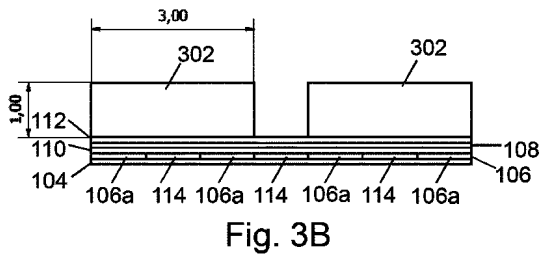


Fig. 3B

【図 3 C】

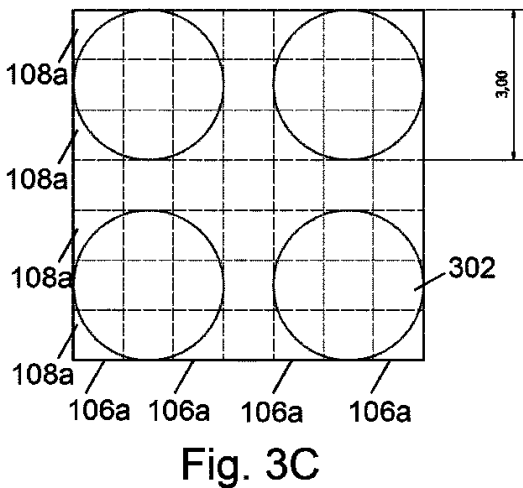
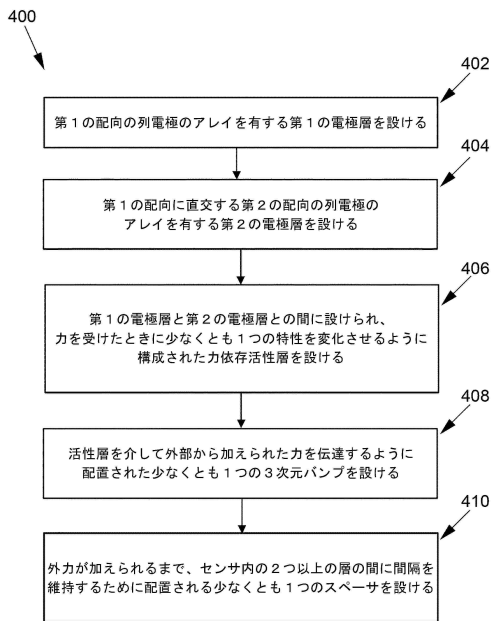


Fig. 3C

【図 4】



10

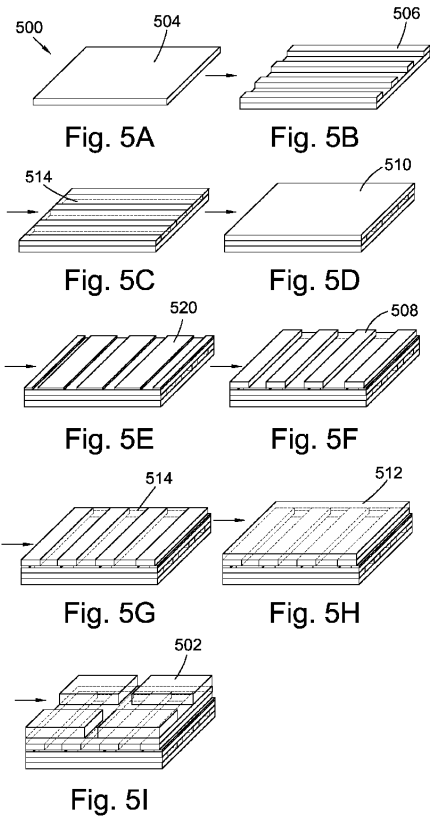
20

30

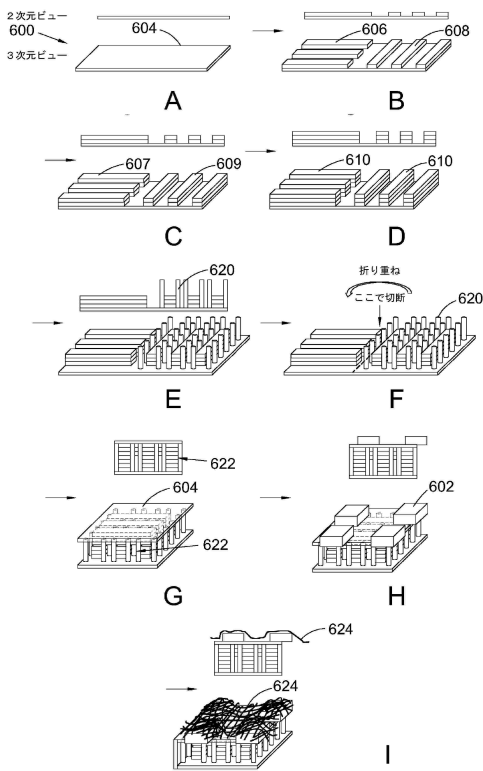
40

50

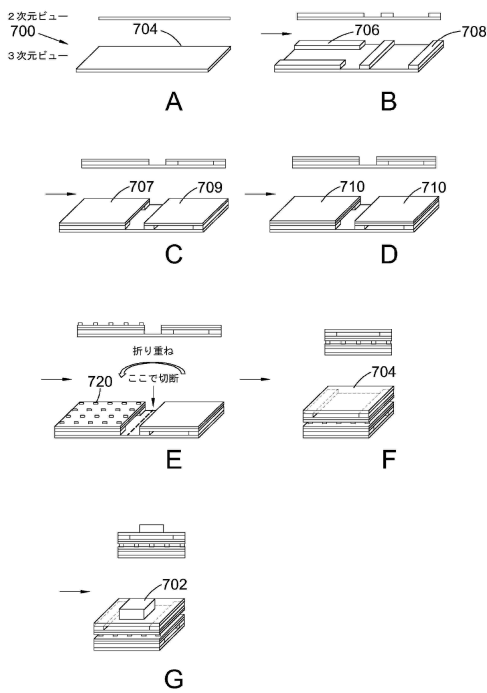
【図 5 A - 5 I】



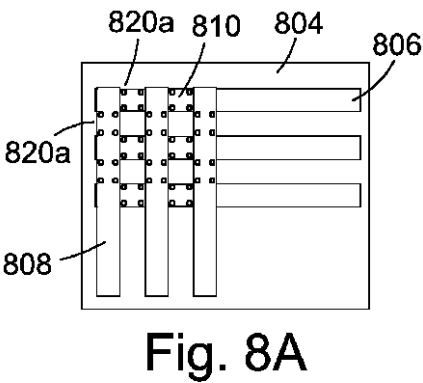
【図 6】



【図 7】



【図 8 A】



10

20

30

40

50

【 図 8 B 】

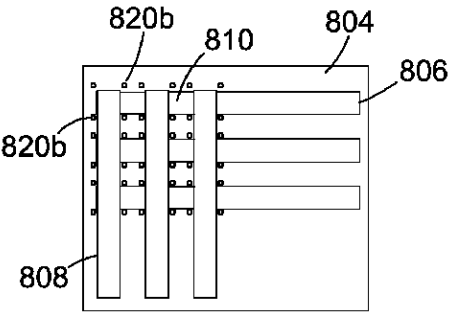


Fig. 8B

【 図 9 A 】

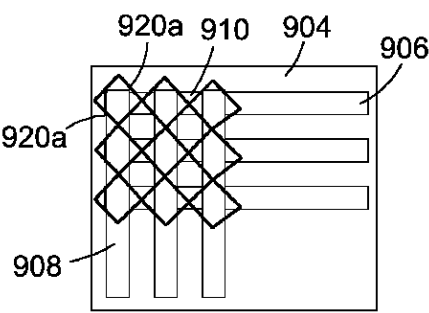


Fig. 9A

【 図 9 B 】

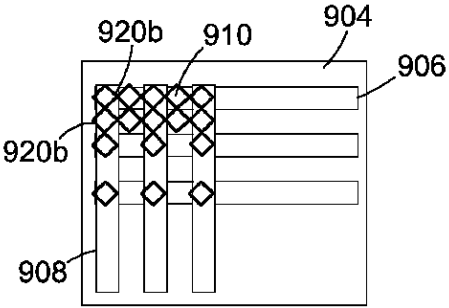


Fig. 9B

【 図 1 0 A 】

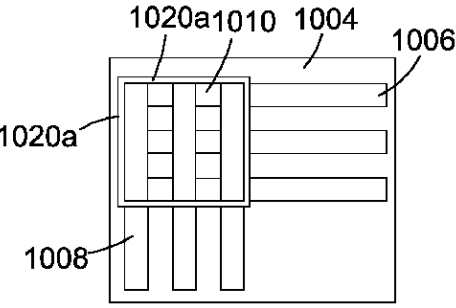


Fig. 10A

10

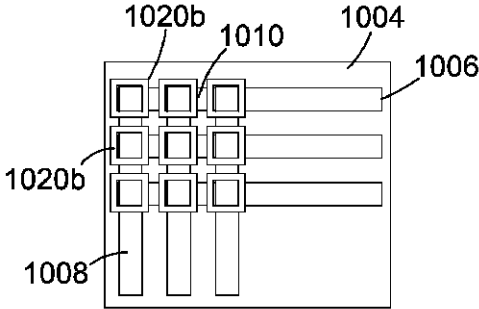
20

30

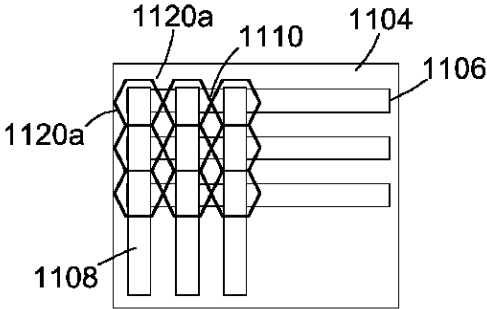
40

50

【図 1 0 B】

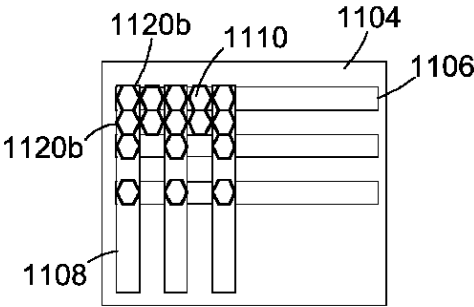


【図 1 1 A】

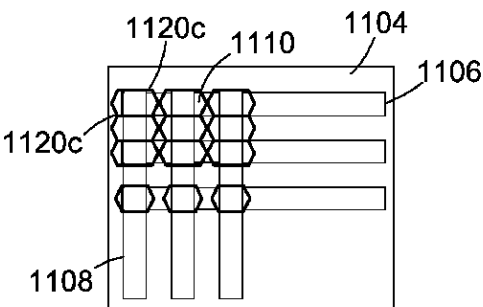


10

【図 1 1 B】



【図 1 1 C】



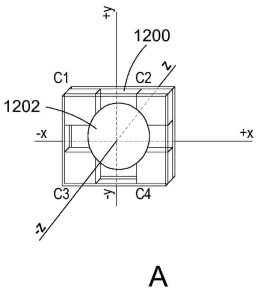
20

30

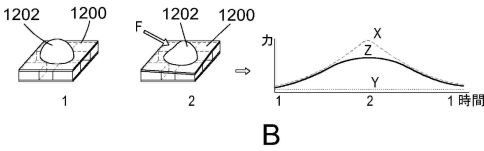
40

50

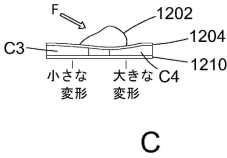
【 図 1 2 】



10



B



20

C

30

40

50

フロントページの続き

イ エジンバラ ブラックフォード ヒル ユーケイエイティーシー ロイヤル オブザーヴァトリー
エディンバラ タッチラブ リミテッド内

審査官 吉田 久

- (56)参考文献 特開 2 0 1 4 - 8 5 3 0 6 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 2 0 9 3 8 4 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 9 / 0 3 4 8 2 8 (W O , A 1)
特開 2 0 1 2 - 1 7 3 0 7 9 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 2 5 0 7 0 5 (J P , A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
G 0 1 L 1 / 0 0 - 1 / 2 6、
5 / 0 0 - 5 / 2 8