

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-504442

(P2005-504442A)

(43) 公表日 平成17年2月10日(2005.2.10)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
H O 1 L 41/09	H O 1 L 41/08	J
H O 1 L 41/187	H O 2 N 2/00	B
H O 1 L 41/22	H O 1 L 41/08	M
H O 2 N 2/00	H O 1 L 41/22	Z
	H O 1 L 41/18	I O 1 D
審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 52 頁)		

(21) 出願番号 特願2003-531541 (P2003-531541)  
 (86) (22) 出願日 平成14年9月26日 (2002.9.26)  
 (85) 翻訳文提出日 平成16年3月26日 (2004.3.26)  
 (86) 国際出願番号 PCT/GB2002/004370  
 (87) 国際公開番号 W02003/028122  
 (87) 国際公開日 平成15年4月3日 (2003.4.3)  
 (31) 優先権主張番号 0123294.1  
 (32) 優先日 平成13年9月27日 (2001.9.27)  
 (33) 優先権主張国 英国 (GB)

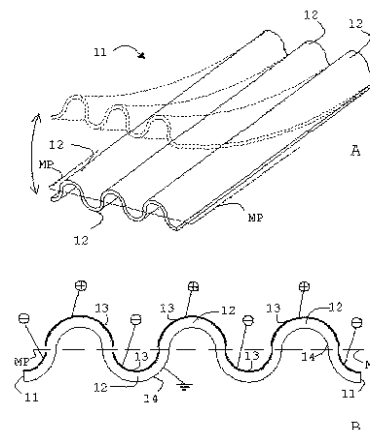
(71) 出願人 502113699  
 1. . . リミテッド  
 イギリス国、ケンブリッジ、カウリイ ロード、セント ジョーンズ イノベーション センター  
 (74) 代理人 100066692  
 弁理士 浅村 皓  
 (74) 代理人 100072040  
 弁理士 浅村 肇  
 (74) 代理人 100080263  
 弁理士 岩本 行夫  
 (74) 代理人 100087217  
 弁理士 吉田 裕

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 圧電構造

## (57) 【要約】

バイモルフ（中間面の一方側に第1の圧電層、および中間面の他方側に第2の圧電層を有する）に固有である、名目上の中間面のいずれかの側で空間的な分離の等価物が、中間面のいずれか一方の側で、概して平坦な2つのグループに構成された複数の圧電部分を有するように、簡単な単一の圧電層（11）の断面を構造的に成形することによって得られ、その面の一方側の部分によって受ける任意の寸法変化が、その面の他方側の部分によって受ける同じ意味の寸法変化に対する、反対方向におけるデバイス全体を曲げる傾向がある。簡単な単一層は、それが、その長さに沿って曲がり、一方の端部が、他方に対して上方/下方、または後方/前方へ動く、細長くかつビーム状であるが、内部電極の必要がないバイモルフのように作用する。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

圧電デバイスであって、前記圧電デバイスの本体は、2つの概して平坦なグループに配置される複数の分離された別個の圧電部分を有するように成形された、単一の圧電材料の層であり、前記平坦なグループは、前記本体全体を通る名目上の中間面の各側の一方側に沿って延び、前記平坦なグループは、したがって、前記中間面によって空間的に分離されかつ前記中間面を横切って互いに面し、その結果、前記中間面の一方側の前記グループにおける任意の圧電部分の寸法変化が、前記中間面の他方側の前記グループにおける同じ意味の圧電部分の寸法変化に対して、反対方向における前記中間面に対する垂直方向に前記デバイスを曲げる傾向がある圧電デバイス。

10

## 【請求項 2】

前記デバイスの全体形状は、前記本体に沿って延びる前記分離された別個の圧電部分グループを有するように、細長い本体の長さを横切る方向に成形された細長い本体の全体形状である請求項 1 に記載のデバイス。

## 【請求項 3】

前記圧電材料は、セラミック材料である前記請求項のいずれか一項に記載のデバイス。

## 【請求項 4】

前記単一層の前記本体は、波形に形成されたシートである前記請求項のいずれか一項に記載のデバイス。

## 【請求項 5】

前記波形に形成されたシートは、概して平坦である請求項 4 に記載のデバイス。

20

## 【請求項 6】

前記波形に形成されたシートは、その長さ全体に沿って均一に波形に形成されている請求項 4 または 5 に記載のデバイス。

## 【請求項 7】

前記波形の形状は、正弦波または半球状のいずれかである請求項 4 から 6 までのいずれか一項に記載のデバイス。

## 【請求項 8】

前記波形は、前記本体に沿った半分で反転される請求項 4 から 7 までのいずれか一項に記載のデバイス。

30

## 【請求項 9】

前記本体は、(部分的な)リングまたは環状として、あるいはディスクとして成形され、前記形状が波形に形成され、前記波形が、前記本体を横切って真っ直ぐでありしたがって概して径方向であるか、または理論的な径に対してある角度であり、真っ直ぐであるかまたは交互にわずかに湾曲して円弧である請求項 1 から 8 までのいずれか一項に記載のデバイス。

## 【請求項 10】

全体に断続する環状形状を有する、概して平坦な単一層の弓形ストリップ状の本体である圧電デバイスであって、前記本体は、前記ストリップを横切って延びる波形を有するように、その弓形の長さに沿った方向に物理的に成形されており、これらの波形は、分離された別個の圧電部分グループを形成し、前記圧電部分グループは、前記本体全体を通る中間面に沿って延び、かつ前記中間面の各側に延び、前記圧電部分グループは、したがって、前記中間面によって空間的に分離されかつ前記中間面を横切って互いに面し、その結果、前記中間面の一方側の前記グループにおける任意の圧電部分の寸法変化が、前記中間面の他方側の前記グループにおける同じ意味の圧電部分の寸法変化に対して、反対方向におけるその長さを横切る前記中間面に対する垂直方向に前記ストリップを曲げる傾向がある圧電デバイス。

40

## 【請求項 11】

前記波形は、前記中間面に対する垂直な中央ラインに周りに均一にかつ対称的に配置される前記請求項のいずれか一項に記載のデバイス。

50

## 【請求項 1 2】

前記中間面は、前記デバイスの中立軸面と同一面である前記請求項のいずれか一項に記載のデバイス。

## 【請求項 1 3】

前記波形は、平行ではなく、前記波形のピッチは、前記デバイスの最も小さい平面内寸法と比べて相対的に小さい前記請求項のいずれか一項に記載のデバイス。

## 【請求項 1 4】

スタックに形成された、複数の前記請求項のいずれか一項に記載のデバイス。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

10

## 【0001】

本発明は、「曲がり装置」効果を示す新規な圧電構造に関し、特に、通常のようなユニモルフまたはバイモルフ・タイプの二層よりむしろ、単一の作動層である曲がり装置の構造に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

例えば水晶などの多くの自然の結晶材料は、圧電特性を示す。すなわち部片が押圧されたとき、部片は、関連する対向する面を横切って有意な電位を発生する。この典型的な例は、いくつかのガス、またはたばこライターにおけるスパーク生成器である。反対の効果も良く知られている。そのような材料の部片は、適切な方向の電界を受けるなら、非常にわずかに寸法が変化する（電界方向に応じて、拡大または収縮し、通常は長くなりまたは短くなって観測される）。この一般的な例は、医学的な身体走査デバイスで 사용되는ような超音波生成器である。これらなど圧電材料の単一の部片または層を用いる形状変化圧電デバイスに関して、形状変化の範囲は、通常非常に小さい。恐らく 0.01 mm (10 マイクロメートル) より小さい。

20

## 【0003】

ほとんどの関心は、現在、スピーカー駆動装置からカメラ・レンズ集束システムまで、電気歯ブラシからコンピュータ・ディスク・ドライブ・ヘッド・ポジショナーまで、および航空機翼の除氷装置からガス・バルブ・コントローラまでの範囲の広範囲な機械的デバイスに関するアクチュエータを構成するために、圧電材料の使用に向けられている。これらのアクチュエータの多く、それどころかこれらのアクチュエータのほとんどは、「曲がり装置」として知られているデバイスの形態をとる。このデバイスは、圧電材料の単一の薄い平坦な細長い層（プランクなどの）と、作動電極が設けられた、ビーム（ユニモルフ）を形成するために表面同士をともに接合された同様であるが不活性な層との複合物、または、同様に接合された2つのそのような圧電材料層（バイモルフ）と、各外面上および2つの接合された面間の両方の電極との複合物のいずれかである。

30

## 【0004】

製造の間、そのようなデバイスは分極される、すなわち、層が非常に高い電界を受ける。その後、使用に際して、層は、圧電層を横切る電界を適用するために電極を使用して作動され、圧電層を拡張／延長させる（または、分極方向に対する電界の極性に応じて収縮／短縮される）。そのようなバイモルフ・デバイスが、作動されると（各層を横切る電界を印加するために電極を使用することによって、2つの電界は、分極方向に対して反対の極性である）、一方の層は拡張／延長し、一方、他方の層は収縮／短縮する。各場合において、結合面（中間面）の両側のデバイスの2つの層の空間的な分離のために、複合物は曲げられ（細長いビーム・デバイスの場合には、一方の端部は、互いに対して、上方または下方に、あるいは後方または前方に移動し）、この曲がり、ある適切に接続された機構を作動するように、動きおよび力を提供することができる。この2層の形状変化種類の曲がり、最も良くても、およそ1ミリメートルに制限される傾向があるが、かなり相当な動きを提供することができる。

40

## 【0005】

50

曲がり、特にバイモルフ曲がり、多くの状況で良好に作動するが、それらの中央電極を有しかつ中央電極に接続する必要性のために、それらは、作成しかつ所望のように使用することが容易ではない。

【 0 0 0 6 】

知られている曲がり装置およびアクチュエータの例は、米国特許第 3 8 1 6 7 7 4 号に記載され、この特許には、様々なほとんどバイモルフ・タイプの構成が記載されている。単一層の蛇行構成が、米国特許第 4 0 2 8 5 6 6 号、米国特許第 4 2 8 4 9 2 1 号、米国特許第 5 6 3 3 5 5 4 号、および国際特許出願第 9 9 / 0 5 7 7 8 号に記載されている。様々な形状のポリマー圧電変換器が、米国特許第 4 0 5 6 7 4 2 号および米国特許第 4 2 8 4 2 9 1 号に記載されている。

10

【 0 0 0 7 】

バイモルフ曲がり装置の中央電極を取り除き、したがって實際上、比較的より簡単な一層デバイスを有することができることが非常に有利である。単一層デバイスで、バイモルフまたはそれどころかユニモルフの曲がり性能を使用して達成可能な形状変化移動の比較的大きな量を達成することは、従来不可能であった。

【 発明の開示 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 8 】

本発明は、前述の制約を解消し、バイモルフまたはユニモルフを使用してだけ従来達成可能であった作動に匹敵する曲がり装置のような動きをまだ示す、圧電材料の単一層だけを有するデバイスを提供する。これは、実際にちょうどバイモルフ曲がり装置のような分離された作動可能な部分を有するように、単一圧電層を物理的に構成する、すなわち成形することによって行われる。

20

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 9 】

より詳細には、バイモルフ（中間面の一方側での第 1 の圧電層、および中間面の他方側での第 2 の圧電層を有する）に固有である名目上の中間面のいずれかの側で空間的な分離の等価物が、中間面のいずれか一方の側で、概して平坦な 2 つのグループに構成された複数の圧電部分を有するように、簡単な単一圧電層の断面を構造的に成形することによって達成されることを提案し、その中間面の一方側の部分によって受ける任意の寸法変化が、その中間面の他方側の部分によって受ける同じ意味の寸法変化に対する、反対方向におけるデバイス全体を曲げる傾向がある。したがって、中間面の一方側でのグループの各圧電層部分が、拡張され / 延長されると、全体は、外側にそのグループで凸状になり、一方、代わりに他方側でのグループの各層が、拡張され / 延長されると、全体は、外側にそのグループで凸状になる。さらに、一方側でグループの各部分が、拡張され / 延長され、一方、他方側でグループの各部分が、収縮され / 短縮されると、曲がりはかなり増大される。各場合に、中央の内部電極の必要なしに、簡単な単一層は、その長さに沿って曲がり、一方の端部が、他方の端部に対して上方 / 下方、または後方 / 前方に動く、細長くビーム状のバイモルフのように作用する。

30

【 0 0 1 0 】

したがって、一態様において、本発明は、圧電デバイスを提供し、その圧電デバイスの本体は、本体全体を通る名目上の中間面の各側の 1 つに沿って延びる 2 つの概して平坦なグループに配置された、複数の分離された個別の圧電部分を有するように物理的に成形された、圧電材料の簡単な単一層であり、そのグループは、したがって、中間面によって空間的に分離されかつ中間面を横切って互いに面し、その結果、中間面の一方側でのグループの任意の圧電部分の寸法変化は、その中間面の他方側でのグループの同じ意味の圧電部分の寸法変化に対して、反対方向における中間面に垂直にデバイスを曲げる傾向がある。

40

【 0 0 1 1 】

以降により詳細に議論されるように、デバイスは、任意の全体形状を有するが、1 つの好ましいそのような形状は、ビーム状の細長い本体の形状である。ビームは、一方の近位端

50

部で固定され、かつ遠位端部で自由に動くことができる。しかしながら、ビームは、曲がり中央セクションで両方端部で支持されることができる。したがって、本発明は、圧電デバイスを提供し、この圧電デバイスは、本体全体を通る名目上の中間面の各側で、本体に沿って延びる分離した別個の圧電部分のグループを有するように、細長い本体の長さを横切る方向において物理的に成形された簡単な単一層の細長い本体であり、圧電部分のグループは、したがって、その中間面によって空間的に分離されかつその中間面を横切って互いに面し、その結果、その中間面の一方側のグループの任意の圧電部分の寸法変化は、その中間面に垂直に、かつその中間面の他方側のグループの同じ意味の圧電部分の寸法変化に対して、反対方向におけるその長さに沿って、デバイス全体を曲げる傾向がある。

【0012】

本発明は、簡単な単一層の圧電デバイスを提供し、これは、そのデバイスが、一層だけを有し、かつこの層が圧電材料で作られることを意味する。これは、単一の圧電層が存在することができるが、作動しないとしても他の層も存在するユニモルフ・デバイスとは異なる。それにもかかわらず、本発明は、スタックに形成された複数の分離された簡単な単一層デバイスで作られるデバイスを含む。差異は、サンドイッチとカードのパックとの違いのようであり、サンドイッチは、充填層に加えてパンの2つの層が存在するが、それにもかかわらず組み合わせが全体として抽象的に区別できず、カードのパックは、まだ分離されたままである、次のカードに対してスタックされた多数の個別のカードが存在する。

【0013】

使用される圧電材料は、任意の従来の種類であることができる。好ましい典型的なものは、PZT（チタン酸鉛ジルコニウム、焼結可能な粉末として入手可能であり、バインダと混合されることができかつペーストに形成されることができ、その後、例えば圧延、プレス、または押出によって成形され、その後硬化され（バインダを取り除くために）、その後焼結され（濃度を増しかつその形状を固定するために、粘土を焼くように）、その後分極される（その圧電特性を設定するために））などの圧電セラミック材料であり、これは、その「未加工」状態で、これを所望の構造に形成することが容易であるからである。他の可能な圧電材料は、PVDf（ポリニフッ化ビニリデン）などをベースとするポリマーである。

【0014】

本発明のデバイスは、そのような好ましい形状を細長い本体として記載されたが、任意の都合の良い形状をとることができる。これは、テープまたは定規のようなものより、その長さがその幅よりかなり大きいことを意味する（実際に、ほとんどバイモルフ曲がり装置を有するものなど）。実際ほとんどの部分に関して、本体は、都合の良いテープ状であり、テープは、他の形状に自身が湾曲されることができる。しかしながら、添付の図面（以降にさらに議論される）に図示されるように、細長い本体は、テープのように真っ直ぐである必要はないが、湾曲されることができ、テープのように平行な側部である必要はないが、（例えば）三角形であることができ、テープのように長くかつ薄い必要はないが、ディスク状であることができる（ディスク状本体は、本発明の目的のために、円の周りに並んで固定される多数の三角形の「径方向」セグメントとして考えられることができる）。

【0015】

本発明の単一層デバイスの本体は、本体全体を通る名目上の中間面の各側で2つの概して平坦なグループに配置される分離された別個の圧電部分を有するように、物理的に成形され、本体が、その幅より長い長さを有するなら、この成形は、本体の長さを横切って延びる方向である必要はないが都合が良い。（「概して平坦な」との記載によって、いずれかのグループにおける個別の部分は、平坦でも、または互いに同一平面に配置されることもできず、全体としてのグループは面にわたって延びることを意味する）。グループを含む分離された個別の部分に本体の必要な分離を提供するために使用されることができる多くの可能な「形状」が存在し（および、これらのいくつかは、添付の図面を参照して以降に議論される）、恐らく、理解するために最も簡単な形状、したがって本発明の背後にある概念の理解を容易するのに最も良い形状は、波形に形成された鉄の簡単なシートの形状であ

10

20

30

40

50

る（ときどき、事前製造された建物の構造に用いられるような）。

【0016】

そのような本体は、その幅より長い長さを有する細長い本体であり、概して平坦であるが、幅を横切るその全長に関して（すなわち、波形のラインが本体の長さを延びる）、すなわち、その長さを横切る方向に均一に波形に形成されることができる。その長さを横切る本体の断面は、波形の形状を示す（従来の波形に形成された鉄において、これらは正弦波形状であるか、または半円形形状のいずれかであり、どちらも満足な形状である）。側部から側部へその断面に沿って延びる中心ラインは、シートに沿った方向に全て延び、したがってシートの中間面を形成し、波形の半分は、その中間面の一方側すなわち頂部上にあり、他方の半分は、他方の側すなわち底部上にある。ピークによって示される（頂部側上の）シートの部分は、したがって、概して平坦なグループに配置され、その概して平坦なグループは、トラフによって示される部分から形成された（底部側上の）同様に概して平坦なグループから空間的に分離され、かつそのグループから区別され、そのグループにまだ面する。

10

【0017】

そのような波形に形成された本体であり、全てのピーク部分（頂部グループ）が、拡張させるなら、その上側の本体の寸法（および特にその長さ）は増大し、その側から離れて、中間面に垂直方向に下方に曲がり、上側を外側にして凸になる。代わりに、全てのトラフ部分（底部グループ）が、拡張させるなら、その下側の本体の寸法は増大し、その側から離れて、中間面に垂直方向に上方に曲がり、下側を外側にして凸になる。

20

【0018】

代わりに、全てのピーク部分（頂部グループ）が、収縮させるなら、その上側の本体の寸法は低減し、その側に向かって上方に曲がり、上側を内側にして凹になる。代わりに、全てのトラフ部分（底部グループ）が、収縮させるなら、その下側の本体の寸法は低減し、その側に向かって下方に曲がり、下側を内側にして凹になる。

【0019】

ピーク部分（頂部グループ）が拡張し、トラフ部分（底部グループ）が収縮し、本体が、よりきつくより強力に下方に曲がることは、容易に分かるであろう。

【0020】

したがって、本体は、本体全体を通る名目上の中間面の各側で2つのグループの分離した別個の圧電部分を有するように、その長さ（断面において）を有利に横切って物理的に形成される。最も単純なそのような形状は、恐らくV字形状であり、中間面は、1つの中心ラインから他の中心ラインへアームを横切って延び、2つの自由先端/端部が一方側であり、角部角度が他方側である。この場合、2つの先端が、グループの一方側にあり、角部角度が他方側にある（2つのグループが、概して平坦であり、かつ中間面を横切って互いに面しているように記載され得ることが、ある適切な意図とともに理解されることができる）。次に簡単な形状は、恐らく、広げられたVに似たU字形状であり、Uのアームがわずかに外側に押し広げられ、中間面は、Uを水平方向に頂部と底部の半分に切断し、アームは、一方側でグループの部分になり、ベースが、他方側でグループの部分になる。

30

【0021】

VおよびU字形状デバイスの両方において、3つの別個の圧電部分が存在し、2つが頂部グループであり、1つが底部グループである。

40

【0022】

これら簡単な形状に続いて、上述した普通の波形に形成されたシートがあり、これは、並んで結合された複数のUのように見られることができ、および波形が、曲線よりむしろ方形であるその変形例がある。他の変形例は、波形が、本体に沿った中間で反転され、ピークがトラフになり、トラフがピークになるものである。以降に議論されるように、そのような本体は、同一の刺激の下で、2つの半分は反対の仕方で反応するので、作動時にその長さに沿って湾曲する。

【0023】

50

上記に言及される他の重要な形状は、テープ状の本体が、断続するワッシャーのような対象物を形成するためにその自身の面で丸く曲がるように、その2つの端部を互いに向かうようにさせるための(部分的な)リングまたは環状の形状である。以降により詳細に議論されるように、そのような形状は、多数の方法で波形に形成されることができ、波形は、環状の形状を横切って真っ直ぐであり、したがって概して径方向であることができ、または波形は、理論的な径に対してある角度であることができ、波形は、実際に真っ直ぐであるか、または交互にわずかに円弧に湾曲されていることができる。

#### 【0024】

この種類の環状デバイスは、従来知られておらず、本発明の他の態様において、それら環状デバイス自体を提供する。したがって、それは、圧電デバイスを提供し、この圧電デバイスは、全体として断続的な環状の形状を有する、概して平坦な単一層の弓形のストリップ状の本体である。本体は、ストリップを横切って延びる波形を有するように、その弓形の長さに沿った方向で物理的に成形される。これらの波形は、本体全体を通る名目上の中間面の各側に沿って、およびこの中間面の各側に延びる分離された別個の圧電部分グループを形成する。その圧電部分グループは、したがって、その中間面を横切って互に空間的に分離され、かつその中間面を横切って互いに面する。その結果、中間面の一方側のグループにおける任意の圧電部分の寸法変化は、その中間面の方側のグループにおける同じ意味の圧電部分の寸法変化に対して、反対方向のその長さを横切る中間面に対して垂直方向にストリップを曲げる傾向がある。

#### 【0025】

記載されるように、波形は、ストリップを横切って真っ直ぐであり、したがって概して径方向であることができ、または波形は、理論的な径に対してある角度、例えば45度であることができ、波形は、実際に真っ直ぐであるか、または交互にわずかに円弧に湾曲されていることができる。さらに、弓形のストリップは、自身が、その長さに沿ってわずかに湾曲された皿状であることができる。これらの可能性の例は、添付の図面に見られることができる。異なる形態は、作動されたときに異なる変形を有することはここで注意する価値がある。したがって、波形が、想像上の径方向に対して45度の角度であるストリップ・デバイスの場合に、ストリップが、波形の長さに平行なラインに沿って比較的容易に曲がることのできる、発生される力は制限されているが、端部は、ストリップの想像上の軸の方向に互いに対して移動する。しかしながら、波形が、ストリップの平面内で湾曲される、またはストリップが皿状である場合には、あまり容易には曲がらず、したがって作動されたときにより大きな力を加えることができる。

#### 【0026】

本発明の圧電デバイスにおける有用な波形に形成された本体に関する理由で、波形の正確な形態は、特定の重要な事項ではなく、それは、考慮する領域の二次モーメントである(数学的な用語で、本体の断面の任意の小さな領域によって発生される力は、中立軸からその領域の距離の二乗の断面の高さにわたって積分であり、任意の圧電デバイスに関する中立軸面は、デバイスが動作されるとき応力が発生されない面である)。波形が、円弧であるか、正弦波であるか、または方形であるかは重要な問題ではない。しかしながら、他の形状に対するある形状を選択することによって、デバイスの機械的特性は、調整されることができ、したがって特定の使用に「調整される」。

#### 【0027】

各グループにおける圧電部分の数は、十分に存在する場合には重要ではない。(本明細書で、用語「多数」は、少なくとも3を意味するものとして解釈され、したがって、VおよびU形状デバイスの両方に関して上述されたように、1つのグループの少なくとも2つの2つの部分と、他のグループの1つの部分とが存在する)。明らかに、所定のサイズよりも多くの部分が存在するが、それらの部分が、中間ラインの各側により均一に配置されると、デバイスによって動作に適用可能な力がより大きくなる。ビーム形状の波形に形成されたデバイスにおいて、7つの部分が存在する可能性があり、一方側に3つの部分がある他方側に4つの部分がある。ディスク形状のデバイスにおいて、24の部分が存在する

10

20

30

40

50

可能性があり、各側に 12 の部分がある。(図面に関連してさらに記載される種類である)湾曲したストリップ・デバイスにおいて、40 またはそれ以上の部分が存在する可能性がある(20 の部分および 20 の部分)。波形が、他方より 1 つの縁部に隣接してより多く、またはより大きな波形が存在するよりむしろ、中間面に対して垂直方向の中央ラインに関して均一にかつ対称に配置されることが一般に好ましい。

#### 【0028】

本発明のデバイスにおいて、圧電部分は、本体全体を通る名目上の中間面の各側で 1 つにグループに分けられる。もちろん、そのどちらかの側で実際に 2 つの圧電部分のグループが存在するなら、この中間面は、想像上、本体内のどの場所でもあることができるが、最も都合良く、それはデバイスの中立軸面と同一面である。通常、中立軸面は、一般にデバイス、したがって本場合において圧電部分が、物理的および圧電的の両方で平衡される面であり、それらが発生する力は、中間面の各側に均一に配分される。

10

#### 【0029】

本発明のデバイスの寸法は、1 ミリメートルの数分の 1 から数ミリメートルに変化することができる。しかしながら、寸法の相対サイズは、特定の幾何形状に関して決定されなければならない。それにもかかわらず、波形が平行ではないデバイスに関して、波形のピッチは、デバイスの面内の寸法における最も小さい寸法に比べて比較的小さくしなければならない。実際に、いくつかのそのようなデバイスにおいて(添付の図面を参照して以降にさらに議論されるようなテープ形状のデバイス)、波形のピッチは、波形が、デバイスのスケールに一方向性曲がりとして確実に現れるように、テープの幅の数分の 1 であるべきである。

20

#### 【0030】

想像上の中間面を横切って空間的に分離されたグループの部分を有する、本発明のデバイスの動作において、曲がり、一方側のグループにおける圧電層部分の任意の寸法変化の結果である。さらに、中間面の一方側のグループにおける任意の圧電部分の寸法変化は、その中間面の他方側のグループにおける同じ意味の圧電部分の寸法変化に対して、反対方向にデバイス全体を曲げる傾向がある。

#### 【0031】

部分寸法変化は、圧電的に分極された層を横切る電界を印加することに関連する変化であり、電界の方向と圧電層部分の極性の方向とに応じて、変化の正確な性質、すなわち拡張または収縮のいずれであるかを予測することができる。圧電材料は、それらを非常に強い電界に受けさせることによって分極されることができ、この非常に強い電界は、材料内の個々の領域を電界と整列させる。その後印加された作動電界が分極電界と同じ方向であれば、材料は拡張し、一方、その後印加された作動電界が分極電界と反対方向であれば、材料は収縮する。したがって、本発明のデバイスにおける各圧電層部分の「曲がり」、すなわち寸法変化の方向/性質が、その部分がどのように分極されたかと、作動電界の方向との両方に応じることは理解されるであろう。したがって、適切な「曲がり」の結果は、同一の方向に圧電層を完全に分極し、その後、反対方向に頂部および底部部分に作動電界を印加することか、または、それを他の方法でほぼ行い、層の部分を反対に分極し、すなわち頂部の部分のある方法で、底部の部分の他の方法で分極し、かつ全体にわたって同一の方向で単一の作動電界を印加することによって達成されることができるとは分かるであろう。

30

40

#### 【0032】

本発明のデバイスは、デバイス全体を通る名目上の中間面の各側で 2 つのグループにおける分離された個別の圧電部分を有するように、物理的に成形される圧電材料の簡単な単一層を有する。この形状は、可能な任意の方法で達成されることができる。例えば、これは、可塑性圧電材料(PZT ペーストなど)の供給物を押し出す(適切な形状のオリフィスを介して)ことによって、またはそのような材料のシートをプレス(型内に)することによって形成されることができる。これは、その後に焼成/焼結される複雑な波形に形成された形状を作るために非常に有用である。代わりに、例えば十分な厚みのシートの硬化さ

50



れた圧電材料の本体を、所望の波形に形成された形状に彫るまたは切断することができる。

【 0 0 3 3 】

本発明のデバイスにおいて、作動電圧（電界）の印加によって発生される曲がり変形および／またはモーメントは、上述のように、断面の領域の二次モーメントに応じ、この二次モーメントは、規則的に波形に形成されたデバイスの場合には、主に波形のサイズによって決定され、および圧電シートまたは層の厚みのより少ない範囲に応じる。これは、目的の発明が、圧電材料の性質および層の厚みによって決定される、特定の電圧で使用するのに適した曲がり装置を設計することを可能にし、発生された力、および特にデバイスのスティフネスおよび剛性に応じる（これらがより大きいなら、何かに対して押すときに、デバイスがより少なく曲がりおよびゆがむ）、所望の動きまたは遮断力に全く無関係である。そのようなデバイスは、現在、存在しない。

10

【 0 0 3 4 】

波形に形成された性質を有する圧電デバイスは、従来技術で既に記載されている。しかしながら、圧電デバイスは、それらの波形に形成された性質と別に、一般にバイモルフである常に二層デバイスであり、したがって、本発明の単一層デバイスとは異なる方法で構成されかつ機能する。したがって、ピークが、トラフに対して反対の方向に作動される従来技術で知られている波形に形成されたバイモルフ・デバイスは、波形の波長が増加または減少するように変形され、波形の面で形状が変化し、すなわち拡張または収縮する。したがって、線形アクチュエータとして作用する。しかしながら、本発明において、真っ直ぐな波形を有する単一層圧電シートは、それらを横切らない波形に沿って、波形の面の外側に曲がる。

20

【 0 0 3 5 】

本発明のこれらまたは他の特徴は、以下の図面を参照して行われる非限定例の以下の詳細な記載から明らかである。

【 実施例 】

【 0 0 3 6 】

図 1 A は、本発明の単一層の波形に形成された圧電デバイスの斜視図を示す。図 1 A は、真っ直ぐな曲がり装置が、どのように、単に圧電材料の単一層および適切な電極から作られることができることを示す。

30

【 0 0 3 7 】

デバイスは、ほとんど圧電材料の細長いシート 1 1 であり、このシート 1 1 は、半円形の波形 1 2 がシートの長さに延びる、単一の波形に形成された形状にプレスされる（折られる）。シートは、破線で示された想像上の中間面 M P を有し、かつ 7 つの明らかに個別の圧電部分を有し、一方側（示されるように上方の半分）に 3 つの圧電部分、および他方側（下方の半分）に 4 つの圧電部分である。上方の 3 つは、概して平坦な一方のグループに属し、下方の 4 つは、他方のグループに属する。これらのグループは、以下に議論される図 2 A、図 2 B における破線の箱 U および L で示される。

【 0 0 3 8 】

シートは、適切な製造段階で分極され、すなわち、その圧電結晶が、強い印加された電界によって、シートの厚みに沿って自身を向けて整列するようにさせ、全体の一連の分離された電極 1 3（図 1 B だけに示される）が、シート 1 1 の頂部表面に形成され（見られるように）、一方、単一の連続する電極 1 4 が、底部表面に形成される（見られるように）。これらの電極は、ともに電極の有効な対を作り、それぞれそのような対に場合に、その対を使用して印加される小さな電界は、分極方向に対する電界の方向に応じて、波形の圧電材料を拡張または収縮させる。

40

【 0 0 3 9 】

図 1 A に示されるように、頂部電極 1 3 は分離されているが、底部電極 1 4 は、単一の連続電極である。これがどのように作用するかは、連続する電極が中立であることを想像し、すなわち示されるようにアースされ、次にそれぞれ交互の波形を横切る電界を考慮する

50

ことによって、簡単に理解されることができる。印加される電圧は、円のプラスおよびマイナスの符号によって示されるように、正の電圧から負の電圧へ隣接する電極対間で交互である。そのような電界の1つが、中立からプラスであり、示されるように上方へ、一方、隣接する電界が、マイナスから中立であり、示されるように下方である。したがって、連続である電極セットの1つを有しても、交互の反対の作動電界が設定されることができる（上方、下方、上方、下方、・・・など）。

【0040】

示されるように、印加される作動電界が、隣接する電極対間で交互であり、したがってそれぞれの電界が、各側でその隣接する電界と反対方向であるなら、シート11の一方側での全ての波形（およびしたがって中間面MPの一方側）は、電界方向に応じて拡張または収縮の同様な効果を受け、一方、シート11の他方側での全ての波形（および中間面MPの他方側）は、反対の効果を受ける。したがって、全ての上方（見られるように）の波形が収縮するなら、全ての下方の波形は拡張し、上方および下方の波形が、中間面を横切って離間されているので、全体としてシートが、図1Aにおける点線で示されるように、これら収縮および拡張によって強制されるように、その中間面に対して垂直に曲がり、すなわち上に曲がるのが必然的に続く。

【0041】

電界が、ほぼ他の方向である場合に、シートは、代わりに下方に曲がる。

【0042】

このように、単一の圧電材料のシートが、ちょうどユニモルフまたはバイモルフのように働くが、まだ2つの層の必要性はなく、また中央電極の必要性に付随したこともなく、中央電極の問題もない。

【0043】

図2A、図2Bは、分極方向（薄く短い矢印25）と、作動電界方向（濃く長い矢印26）とに関する2つの可能性を示す。図2Aにおいて、シート全体は同じ方向25に分極され、一方、電界方向26は交互であり、図2Bにおいて、それは、同一の方向である電界26と、交互の分極26とである。しかし効果を同一である。

【0044】

図2A、図2Bは、また、圧電部分が、どのように破線の箱UおよびLによって画定される2つの本質的な平坦なグループに配置されるかを示し、破線の箱UおよびLは、中間面を横切って互いに面するように配置され、一方のグループの部分は拡張し、一方、他方のグループの部分は収縮する。

【0045】

図1および図2に示される例は、波形に形成された断面に関するものであるが、断面の中立ラインの上または下の領域が異なって変形されるなら、直線ではない任意の断面が作用する。図3Aおよび図3Bは、本発明のV断面デバイスと、U断面デバイスとを示し、図4は、矩形断面の波形に形成されたデバイスを示す。これら全ては、ほとんど同じ方法で作用する。

【0046】

したがって図3Aにおいて、中間面は、Vを通して水平方向（見られるように）に延び、その2つの先端部分21は、中間面MPの一方側にあるほぼ平坦なグループを形成し、一方、その下方のV断面22は、他方側のグループである。図3BのU形状デバイス、図3AのV形状デバイスの「広い」バージョンにかなり似ており、その2つのアーム31は、中間面MPの一方側のほぼ平坦なグループを形成し、その底部32は、他方のグループを形成する。

【0047】

図4は、矩形断面の波形に形成されたデバイスである。上方（見られるように）波形41は、その下方波形42のグループに対して中間面MPの反対側の概して平坦なグループであり、示される例において、単一の底部電極（分離して示されていないが、アースされ/接地され）があり、一方、頂部電極（再び分離して示されていない）は、円内の符号によ

って示されるようにプラスおよびマイナスで交互である。

【0048】

図5Aおよび図5Bは、本発明の2つの「S」字形状の曲がりデバイスを（斜視図で）示し、すなわちデバイスは、S字形状に曲がるように、設計され、成形され、かつ動作される。このタイプの変形の利点は、デバイスが、動きを増幅するために、（ピアノ・アコーディオン・ペローズのひだのようによりむしろ）次の頂部上にスタックされることを可能にすることである。この目的のために、圧電材料が、デバイスの各半分で異なって変形し、一方の半分で頂部が拡張し、一方、他方の半分で頂部が収縮する。これを1つの方法で達成するために、ライン53が分割電極を示す図5Aのデバイスにおける場合にあるように、ライン53に沿ってデバイスを下方に半分で分割する。第1の波形51、52において、電界方向は、それぞれ符号によって示されている。代わりの方法において、波形の方向は、図5Bに示されるように半分に沿って変化する。

10

【0049】

また、2つのS字形状の曲がりデバイスは、2倍の長さのストリップを結果として生じる、当接する自由（遠位）端部セクションと組み合わせられることができ、他方（近位）端部が固定されるなら、作動時に中間セクションは出っ張る。

【0050】

図6A、図6B、図6C、および図6Dは、本発明の2つの異なるドーム状の波形に形成されたデバイスを（側面図、斜視図、および切断図で）示す。

【0051】

デバイスは、基本的に圧電材料の「平坦な」ディスクである。それは、2つの異なる方法のいずれかで波形に形成されることができ、図6B、図6C、および図6Dは、これら2つのタイプの波形を示し、一方は径方向であり（図6B）、他方は周方向である（図6C、図6D）。図6Aは、側方から、各デバイスがどのように作動時に動くかを示し、概して平らな平坦な対象物（実線の外形）からドーム状の形状（破線の外形）を取るように動く。いずれかの波形に形成された形態は、このタイプの形状変化を達成するために使用されることができる。

20

【0052】

PZT4Dで作られた図6Bに示されるタイプのドーム状のデバイスに関する典型的な寸法は、15mmの外径、20μmの厚み、および27mgの重量である。次に、ドームは、20μmの波形の大きさ、およびほぼ0.5mmの波形ピッチを示すべきである。±20Vの動作電圧内で、7mNの遮断力とともに±0.1mmの変位が得られるべきである。

30

【0053】

図7A～図7Bは、本発明の直線ストリップの波形に形成されたデバイスを（平面図、斜視図、側面図、および端面図で）示す。

【0054】

デバイスは、ストリップの長さに沿うよりむしろ横切って波形に形成された圧電材料の直線ストリップ71である。しかしながら、波形72は、真っ直ぐに横切るよりむしろある角度が付けられる（ストリップの長軸A-Aに対して約45度）。デバイスの曲げ作用は、波形72の長さに沿うだけであり、波形72に対して垂直ではないので、角度が付けられた波形72は、その軸A-Aの周りでストリップをねじる効果を有する。ねじりの一般的な方向は、図7B、図7Dに示される（図7Dは、波形の正確な性質に応じて、軸A-Aの方向で軸に沿って作動時に何が見られるであり、実際に起こることが微妙に異なる）。

40

【0055】

図7に示される幾何形状は、円弧の面を横切って上方および下方に変形する変形例を作るために、円弧に湾曲されることができる。図8～図10は、本発明の3つの異なる弓形ストリップの波形に形成されたデバイスを（少なくとも平面図および斜視図で）示す。

【0056】

50

その自身の権利内の新規なおよび進歩性のあるこのタイプの構造は、大きな変位を作るために、圧電材料の垂直方向の比較的小さな変形をかなり増幅するデバイス幾何形状を示す。

【0057】

そのような構造が作用する方法は複雑であり、理解は容易ではない。以下のコメントが助けになるであろう。

【0058】

一方の端部87に固定された(図8に示されるように)、(平坦な)円形の円弧81を考える。円弧が、同一の径のらせんに変形されるなら、自由端部は、円弧の面の外側に動く。これは、構造が、通常円弧の一部を形成する波形に形成される圧電テープで生じる変形である。一方の端部に固定されたらせん湾曲を考慮するなら、同じ原理が適用される。ねじりが円弧に生じるなら、この面の外側の変形が達成される。

10

【0059】

記載されたように、図8～図10は、3つの異なる湾曲されたストリップの波形に形成されたデバイスを示す。図8は、波形82が、ストリップを横切って真っ直ぐではないが、湾曲に対する接線方向に対してある角度(ほぼ45度)である。これらの波形は、真っ直ぐであり、ストリップ81は、そうでなければ平坦である。しかしながら、図9において、波形92は、自身が弓形である(同様に、概して45度であるが)、一方図10において、波形102は真っ直ぐであるが(45度で)、ストリップは、固定端部107で最も良く分かる3次元態様をとるように、自身が湾曲され/皿状にされる。デバイスに沿った任意の断面108は、弓形ストリップの重なりおよび波形によって生じた任意の曲がりを示す。

20

【0060】

図9および図10のような波形の湾曲の理由は、デバイスの遮断力を増大することである。波形の方向に対して垂直な真っ直ぐな波形(図8のような)を曲げることは容易であり、波形の湾曲はこの曲がり抵抗する。図10の波形に対する「面の外側の」湾曲は、最も良い結果を与え、さらに動きの量を増加するように思える。したがって、図10に示される幾何形状は、アクチュエータの最も良い性能を与える。

【0061】

この幾何形状から、圧電材料の単一層をプレスして大きな作動デバイスを製造できる。したがって、圧電材料としてPZT4Dを使用して、かつ外径15mm、内径10mm、テープ厚み20μm、波形の大きさ0.25mm、波形のピッチほぼ1mm、および重量15mgの弓形のストリップを構成して、±20Vの動作電圧内で、0.3mNの遮断力とともに±0.25mmの変位で得られるべきである。これは、優れた結果である。

30

【0062】

図8～図10のデバイスで示される波形は、全て規則的であり、全て径方向に対してある角度である。ねじりを加えることによって、らせんに円弧の変形の対象の特性は、変形が、円弧の長さの周りで線形に増加しない。しかしながら、円弧の周りの波形の角度を適切に変えることによって、この非線形性を取り除くことが可能である。これは、デバイスの効率を増大する効果を有することができる。

40

【0063】

上述のように、本発明のデバイスの実際の構造は、多数の方法で行われることができる。したがって、必要な波型に形成された形状は、焼結する前に圧電材料の柔軟なシートにエンボス加工されることができ、必要な形状は、同一のプレス・ツールを使用して、同時にシートから切断される。デバイスは、次に、形状を維持するために適切に成形されたさや内で硬化されかつ焼結されることができる。焼結後、電極が、印刷またはめっきのいずれかによって加えられることができる(または、それら2つの組み合わせ)。印刷は、異なって変形しなければならないデバイスの異なる領域を描画するために、電極がある面に適用されることを可能にする。デバイス全体が、次に同一の方法で分極されることができ、各領域は、分離して作動される必要がある。

50

## 【 0 0 6 4 】

代わりに、波形は、既に焼結された（および恐らく分極された）圧電材料の平坦なシートで切断される（ソーイングされる）。ソーイング・プロセスは、断面の中立軸の上方および下方の必要な領域を作る。作られる幾何形状は、次に、図 4 に示される幾何形状に類似する方形の波形を有するが、まだ、丸められた波形を有するものと同じ方法で動作する。この方法で、ある幾何形状を製造することはより容易であることができ、なぜなら、湾曲された薄いシートより厚い平らなプレートを焼結するわずかな問題があるからである。容量が少ない場合、カスタム・ツールのコストが低減されるので、この方法は、製造コストも低減する。

## 【 0 0 6 5 】

本発明の波形に形成された構造のデバイスに関連する主な製造の問題の 1 つは、異なって変形されなければならない異なる領域があるので、デバイスに作られるべき異なる多数の電気接続の必要性である。この問題に対する 1 つの解決方法は、分極中に一時的に様々な領域に接続することであり、デバイスの全ての領域は、ともに接続され、かつ使用中にかつ電圧で作動されることができる。このプロセスは、2 つの電極印刷プロセスを必要である可能性があり、第 2 の印刷プロセスは、分極後に全ての領域を結合する。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 6 6 】

【 図 1 A 】 本発明の単一層の波形に形成された圧電デバイスの斜視図を示す。

【 図 1 B 】 本発明の単一層の波形に形成された圧電デバイスの端面図を示す。

【 図 2 A 】 図 1 のデバイスに関する電極構成（および可能な分極と作動電界方向）の端面図を示す。

【 図 2 B 】 図 1 のデバイスに関する電極構成（および可能な分極と作動電界方向）の端面図を示す。

【 図 3 A 】 本発明の V 字形状断面デバイスの端面図を示す。

【 図 3 B 】 本発明の U 字形状断面デバイスの端面図を示す。

【 図 4 】 本発明の矩形波形に形成されたデバイスの端面図を示す。

【 図 5 A 】 本発明の 2 つの「 S 」字形状の曲がり装置を（斜視図で）示す。

【 図 5 B 】 本発明の 2 つの「 S 」字形状の曲がり装置を（斜視図で）示す。

【 図 6 A 】 本発明の 2 つの異なるドーム状の波形に形成されたデバイスを示す。

【 図 6 B 】 本発明の 2 つの異なるドーム状の波形に形成されたデバイスを（側方斜視図で）示す。

【 図 6 C 】 本発明の 2 つの異なるドーム状の波形に形成されたデバイスを（側方斜視図で）示す。

【 図 6 D 】 本発明の 2 つの異なるドーム状の波形に形成されたデバイスを（切断図で）示す。

【 図 7 A 】 本発明の直線ストリップの波形に形成されたデバイスを（平面図で）示す。

【 図 7 B 】 本発明の直線ストリップの波形に形成されたデバイスを（斜視図で）示す。

【 図 7 C 】 本発明の直線ストリップの波形に形成されたデバイスを（側方端面図で）示す。

【 図 7 D 】 本発明の直線ストリップの波形に形成されたデバイスを（端面図で）示す。

【 図 8 A 】 本発明の 2 つの異なる湾曲したストリップの波形に形成されたデバイスを（平面図で）示す。

【 図 8 B 】 本発明の 2 つの異なる湾曲したストリップの波形に形成されたデバイスを（斜視図で）示す。

【 図 9 】 本発明の 2 つの異なる湾曲したストリップの波形に形成されたデバイスを（斜視図で）示す。

【 図 10 A 】 本発明の第 3 の湾曲したストリップの波形に形成されたデバイスを（平面図で）示す。

【 図 10 B 】 本発明の第 3 の湾曲したストリップの波形に形成されたデバイスを（斜視図

10

20

30

40

50

で) 示す。

【図 10 C】本発明の第 3 の湾曲したストリップの波形に形成されたデバイスを(断面図で) 示す。

## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
3 April 2003 (03.04.2003)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 03/028122 A2(51) International Patent Classification<sup>7</sup>: H01L 41/09

(21) International Application Number: PCT/GB02/04370

(22) International Filing Date:  
26 September 2002 (26.09.2002)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

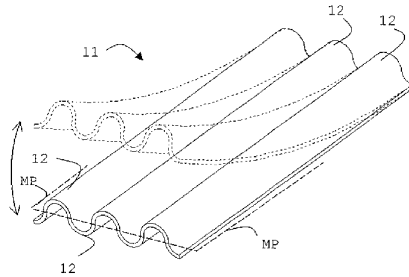
(30) Priority Data:  
0125294.1 27 September 2001 (27.09.2001) GB(71) Applicant (for all designated States except US): L.LIM-  
TED (GB/GB); 84 John's Innovation Centre, Cowley  
Road, Cambridge CB4 0WS (GB).

(72) Inventors; and

(75) Inventors/Applicants (for US only): TOPLISS, Richard  
[GB/GB]; 43 Bishops Road, Trumpington, Cambridge  
CB2 2NQ (GB). LIVINGSTONE, David [GB/GB]; 71  
Fowlmere Road, Helydon, Royston, Hertfordshire SG7SNS (GB). MATHESON, Andrew [GB/US]; 6 Hurd  
Road, Belmont, MA 02478 (US). MCKEVITT, Gareth  
[CA/GB]; 12 Fen Road, Chesterton, Cambridge CB4 1TX  
(GB). SHEPHERD, Mark, Richard [GB/GB]; Clare  
House, 124 High Street, Meldreth, Rysson, Hertfordshire  
SG8 6HL (GB). HOOLEY, Anthony [GB/GB]; 79 De  
Freville Avenue, Cambridge CB4 1HP (GB).(74) Agents: MERRYWEATHER, Colin, Henry et al.; J.A.  
Kemp & Co., 14 South Square, Gray's Inn, London WC1R  
5JH (GB).(81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU,  
AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU,  
CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GL, GR,  
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KG, KP, KR, KZ, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,  
MX, MZ, NO, NZ, OM, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG,  
SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM,  
KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),

[Continued on next page]

(54) Title: PIEZOELECTRIC STRUCTURES



(57) Abstract: An equivalent to the spatial separation either side of a nominal median plane that is inherent in a bimorph (with one piezoelectric layer on one side, and the second on the other side of the plane) is attained by structurally shaping the cross-section of a simple, single piezoelectric layer (11) such that it has a multiplicity of piezoelectric portions arranged in two generally-planar groups one either side of a median plane, so that any dimension change undergone by a portion on one side of that plane will tend to bend the whole device in the opposite direction to the same sense dimension change undergone by a portion on the other side of that plane. The simple, single layer acts as though it were a bimorph if elongate and beam-like, bending along its length, one end moving up/down, or back/forth, relative to the other but with any need for an internal, electrode.

WO 03/028122 A2

---

**WO 03/028122 A2**

Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM),  
European patent (AT, AU, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,  
ES, FI, FR, GB, GR, HU, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK,  
TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,  
GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

**Published:**  
*without international search report and to be republished  
upon receipt of that report*



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-1-

## PIEZOELECTRIC STRUCTURES

## FIELD OF THE INVENTION

This invention is concerned with novel piezoelectric structures that exhibit  
5 "bender" effects, and relates in particular to the construction of benders that are a single,  
active layer rather than, as is usual, a double layer of the unimorph or bimorph type.

## BACKGROUND OF THE INVENTION

Many natural crystalline materials - quartz is an example - exhibit piezoelectric  
properties - that is, when a piece is squeezed it develops a significant electric potential  
10 across the relevant opposite faces. A typical example of this is the spark generator in  
some gas or cigarette lighters. The opposite effect is also well known; pieces of such  
materials if subjected to an electric field in an appropriate direction very slightly change  
dimensions (expanding or contracting, usually observed as a lengthening or a shortening,  
depending on the field direction). A typical example of this is an ultrasound generator as  
15 used in medical body scanning devices. For shape-changing piezoelectric devices  
which, like these, utilise a single piece, or layer, of piezoelectric material the range of  
shape changing is usually extremely small - possibly no more than 0.01mm (10  
micrometre).

Much interest is presently being shown in the use of piezoelectric materials to  
20 construct actuators for a wide variety of mechanical devices, ranging from loudspeaker  
drivers to camera lens focusing systems, from electric toothbrushes to computer disk  
drive head positioners, and from aircraft-wing de-icers to gas valve controllers. Many,  
even most, of these actuators take the form of a device known as a "bender" - either a  
composite of a single thin flat elongate layer (like a plank) of piezoelectric material and  
25 a similar but inactive layer bonded together face to face to form a beam (a unimorph)  
and provided with activation electrodes, or a composite of two such piezoelectric  
material layers similarly bonded (a bimorph) and with electrodes both on each external

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-2-

face and also between the two bonded faces.

During manufacture, such devices are poled - that is, the layers are subjected to a very high electric field. Subsequently, in use the layers are activated by using the electrodes to apply an electric field across the piezoelectric layer, causing the piezoelectric layer to expand/lengthen (or contract/shorten, depending on the field's polarity relative to the poling direction). When such a bimorph device is activated (by using the electrodes to apply an electric field across each layer, the two fields being of the opposite polarity relative to the poling direction), one layer expands/lengthens while the other contracts/shortens. In each case, because of the spatial separation of the device's two layers either side of the joint face (the median plane) the composite is caused to bend (in the case of an elongate beam device one end moves up or down, or back or forth, relative to the other) - and this bending can provide movement and force so as to actuate some suitably-connected machinery. Benders of this two-layer shape-changing sort are capable of providing quite considerable movement, though even the best tend to be restricted to a millimetre or so.

Benders, especially bimorph benders, work well in many situations, but because of the need to have, and connect to, their central electrode they are not as easy to make and use as might be desired.

Examples of known benders and actuators are described in US-3,816,774, in which various, mostly bimorph-type, structures are described. Single-layer serpentine structures are described in US-4,028,566; US-4,284,921 and US-5,633,554 and WO-99/05778. Polymeric piezoelectric transducers of various shapes are described in US-4,056,742 and US-4,284,291.

It would be highly advantageous to be able to do away with the central electrode of bimorph benders, and thus in effect have a relatively simpler one-layer device. Unfortunately, it has hitherto not been possible to achieve with a single layer device the relatively large amounts of shape-change movement attainable using the bending ability

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-3-

of a bimorph or even a unimorph.

#### SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention overcomes the above-mentioned constraint, and provides a device having merely a single layer of piezoelectric material yet which develops on  
5 activation a bender-like movement comparable with that hitherto only achievable using a bimorph or unimorph. It does so by so physically structuring - that is to say, shaping - the single, piezoelectric, layer so that it has in effect separately-actuatable portions just like a bimorph bender.

More specifically, the invention proposes that an equivalent to the spatial  
10 separation either side of a nominal median plane that is inherent in a bimorph (with one piezoelectric layer on one side, and the second on the other side of the plane) be attained by structurally shaping the cross-section of a simple, single piezoelectric layer such that it has a multiplicity of piezoelectric portions arranged in two generally-planar groups one either side of a median plane, so that any dimension change undergone by a portion  
15 on one side of that plane will tend to bend the whole device in the opposite direction to the same sense dimension change undergone by a portion on the other side of that plane. Thus, if each piezoelectric-layer portion in the group on one side of the median is expanded/lengthened then the whole will become convex with that group on the outside, while if instead each layer portion in the group on the other side is expanded/lengthened  
20 then the whole will become convex with that group on the outside. Moreover, if each portion in the group on one side is expanded/lengthened while each portion in the group on the other side is contracted/shortened, then the bending is significantly increased. And in each case, the simple, single layer acts as though it were a bimorph - if elongate and beam-like, bending along its length, one end moving up/down, or back/forth,  
25 relative to the other - but without any need for the middle, internal, electrode.

In one aspect, therefore, the invention provides a piezoelectric device the body of which is a simple, single layer of piezoelectric material physically shaped so as to have a

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-4-

multiplicity of separate, distinct piezoelectric portions disposed in two generally planar groups that extend along, one on each side of, a nominal median plane through the whole body, which groups are thus spatially separated by and face each other across that median plane, with the result that any piezoelectric portion dimension change in the

5 group on one side of the median plane will tend to bend the device normal to the median plane in the opposite direction to the same-sense piezoelectric portion dimension change in the group on the other side of that median plane.

Though, as discussed in more detail hereinafter, the device may have any overall shape, one preferred such shape is that of an elongate body, like a beam. The beam may

10 be fixed at one proximate end and free to move at a distal end. However, beams can be supported at both ends with a bending middle section. Thus, the invention provides a piezoelectric device that is a simple, single-layer elongate body physically shaped in a direction across the length of the elongate body so as to have separate, distinct

15 piezoelectric-portion groups extending along the body and on each side of a nominal median plane through the whole body, which groups are thus spatially separated by and face each other across that median plane, with the result that any piezoelectric portion dimension change in the group on one side of the median plane will tend to bend the whole device normal to the median plane and along its length in the opposite direction to the same sense piezoelectric portion dimension change in the group on the other side of

20 that median plane.

The invention provides a simple, single layer, piezoelectric device - by which is meant that the device has one layer only, and that this layer is made of a piezoelectric material. This is distinct from a unimorph device, where there may be a single piezoelectric layer but there is also another, albeit inactive, layer. Having said that, the

25 invention nevertheless encompasses devices which are made of a plurality of separate simple, single layer devices formed into a stack. The distinction is as that between a sandwich, where, though there are two layers of bread plus a layer of filling,

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-5-

nevertheless the combination makes a notionally indivisible whole, and a pack of cards, where there are many individual cards stacked one against the next yet remaining separate.

The piezoelectric material used may be of any convenient sort; a typical one, preferred because it is easy, in its "green" state, to form it into the structures desired, is piezoelectric ceramic material such as PZT (lead zirconium titanate, available as a sinterable powder which can be mixed with binders and formed into a paste, then shaped by, for example, rolling, pressing or extruding, then cured [to remove the binders], then sintered [like firing clay, to densify and fix its shape] and then poled [to set its piezoelectric properties]). Another possible piezoelectric material are polymeric based such as PVDF (Polyvinylidene difluoride).

The invention's device may take any convenient shape, though as noted one preferred such is an elongate body - by which it is meant that, rather like a tape or rule, its length is considerably greater than its width (as, indeed, is so with most bimorphic benders). For the most part, indeed, the body is conveniently tape-like, albeit a tape that may itself be curved into other shapes. However, as is seen graphically in the accompanying Drawings (discussed further hereinafter), the elongate body: need not be straight, like a tape, but can be curved; need not be parallel-sided, like a tape, but can (for instance) be triangular; and need not be long and thin, like a tape, but can be disk-like (though a disk-shaped body could, for the purposes of this invention, be considered as a number of triangular "radial" segments fixed side by side round in a circle).

The body of the single layer device of the invention is physically shaped - if the body has a length greater than its breadth then this shaping is conveniently though not necessarily in a direction lying across the length of the body - so as to have separate, distinct, piezoelectric portions disposed in two generally planar groups one on each side of a nominal median plane through the whole body (by "generally planar" is meant that,

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-6-

while the individual portions in either group may not be either flat or disposed to be co-planar with each other, the group as a whole extends over a plane). There are many possible "shapes" that can be used to provide the required separation of the body into separate, distinct, portion-containing groups (and some of these are discussed hereinafter with reference to the accompanying Drawings), and perhaps that shape easiest to understand - and therefore best for facilitating comprehension of the concept behind the invention - is that of a simple sheet of corrugated iron (as sometimes employed in the construction of prefabricated buildings).

Such a body is an elongate body - with a length greater than its width - which is generally planar but has been uniformly corrugated for its entire length (that is, the lines of corrugations run the length of the body) across its width - that is, in a direction across its length. A cross-section of the body across its length would reveal the shape of the corrugations (in conventional corrugated iron these are either sinusoidal or they are semicircular; each is satisfactory). The centre line running along that section from side to side extends all the way along the sheet, and thus forms the sheet's median plane; half of the corrugations are on one side of that plane - the top, say - and the other half are on the other side - the bottom. The portions of the sheet represented by the peaks (on the top side) are thus disposed in a generally-planar group which is spatially separated from, and distinct from, yet faces the similar generally-planar group formed from the portions represented by the troughs (on the bottom side).

If, with such a corrugated body, all the peak portions (in the top group) were caused to expand, the body's dimensions (and particularly its length) on its upper side would increase, and it would bend down, normal to the median plane, away from that side - it would become convex, with that upper side on the outside. If, instead, all the trough portions (in the bottom group) were caused to expand, the body's dimensions on its lower side would increase, and it would bend up, normal to the median plane, away from that side - it would become convex, with that lower side on the outside.

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-7-

If, alternatively, all the peak portions (top group) were caused to contract, the body's dimensions on its upper side would reduce, and it would bend up, towards that side - it would become concave, with that upper side on the inside. If, instead, all the trough portions (bottom group) were caused to contract, the body's dimensions on its  
5 lower side would reduce, and it would bend down, towards that side - it would become concave, with that lower side on the inside.

It will be easy to see that were the peak portions (top group) to expand and the trough portions (bottom group) to contract, the body would exhibit a tighter, more forceful, downwards bend.

10 So, the body is physically shaped, advantageously across its length (in cross section), so as to have separate, distinct piezoelectric portions in two groups one on each side of a nominal median plane through the whole body. The simplest such shape is probably a V-shape, with the median plane extending across the arms from the centre line of one to the centre line of the other, so that the two free tips/edges are one side and  
15 the corner angle is the other. In this case the two tips lie in one of the groups, and the corner angle lies in the other (and it can be seen, with some good will, that the two groups can be described as generally planar, and facing each other across the median plain). The next simplest shape is perhaps a U-shape - like an expanded V - the arms of the U being pushed slightly outwards; with the median plane cutting the U in half  
20 horizontally, top and bottom, the arms become the portions in the group on one side, the base the portion in the group on the other side.

In both the V- and U-shaped devices there are three distinct piezoelectric portion, two in the top group and one in the bottom group.

After these simple shapes there is the plain corrugated sheet discussed above -  
25 this can be seen to be much like a multiplicity of Us joined side by side - and a variant on that, in which the corrugations are square rather than curved. Another variant is that wherein the corrugations are reversed halfway along the body, so that the peaks become

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-8-

troughs, and the troughs peaks. As discussed hereinafter, such a body upon activation curves along its length into an S-shape, as under identical stimuli the two halves react in the opposite manner.

A further important shape, alluded to above, is that of a (part) ring or annulus, as  
5 though a tape-like body were bent round in its own plane, to bring its two ends towards each other to form an object like a broken washer. As is discussed in more detail hereinafter, such a shape can be corrugated in a number of ways - the corrugations can be straight across the annulus, and thus generally radial, or they can be at some angle to the theoretical radii, and they can be either actually straight or alternatively slightly  
10 curved into arcs.

Annular devices of this sort are hitherto unknown, and in another aspect the invention provides them per se. Thus, it provides a piezoelectric device that is a generally planar single-layer arcuate strip-like body having overall a broken annular shape, the body being physically shaped in a direction along its arcuate length so as to  
15 have corrugations extending across the strip, these corrugations forming separate, distinct piezoelectric-portion groups extending along and on each side of a nominal median plane through the whole body, which groups are thus spatially separated by and face each other across that median plane, with the result that any piezoelectric portion dimension change in the group on one side of the median plane will tend to bend the  
20 strip normal to the median plane across its length in the opposite direction to the same sense piezoelectric portion dimension change in the group on the other side of that median plane.

As noted, the corrugations can be straight across the strip, and thus generally radial, or they can be at some angle - 45 degrees, for example - to the theoretical radii,  
25 and they can be either actually straight or alternatively slightly curved into arcs. Moreover, the arcuate strip can itself be dish-shaped - slightly curved across its length. Examples of these possibilities are shown in the accompanying Drawings; it is worth



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-9-

noting here that the different forms have different deformations when activated. Thus, in a strip device where the corrugations are angled at 45 degrees to the notional radial direction the ends move relative to each other in the direction of the notional axis of the strip, though the force generated is limited because the strip can relatively easily bend  
5 along a line parallel to the length of the corrugation. However, if the corrugations are curved in the plane of the strip, or if the strip is dished, then it bends much less easily, and so can apply a greater force when actuated.

Within reason, for a corrugated body useful in the piezoelectric devices of the invention the exact form of the corrugations does not particularly matter; it is the second  
10 moment of area that counts (in mathematical terms the force generated by any small area of a section of the body is the integral, over the height of the section, of the square of the distance of that area from the neutral axis; the neutral axis plane for any piezoelectric device is that plane within which there is no induced strain when the device is operated). It does not matter if the corrugations are arcs or sine waves or squared etc. However, by  
15 choosing one shape over another the mechanical properties of the device can be adjusted, and thus "tuned" to a particular use.

The number of piezoelectric portions in each group is not that important, provided there are sufficient (and here the term "multiplicity" is to be construed as meaning at least three, so that there are at least two portions in one group and one in the  
20 other, as noted above for both the V- and U-shaped devices). Clearly, though, the more portions of a given size there are, and the more evenly they are disposed either side of the median line, the greater will be the force applicable in operation by the device. In a beam-shaped corrugated device, then, there might be seven portions, three on one side and four on the other; in a disc-shaped device there might be 24 portions, 12 on each  
25 side; in a curved strip device (of the sort described further in connection with the drawings) there might be as many as, or even more than, 40 (20 and 20). It is generally preferable for the corrugations to be disposed evenly and symmetrically about a centre

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-10-

line normal to the median plane, rather than for there to be more, or greater, corrugations adjacent one edge than the other.

In the device of the invention the piezoelectric portion groups one on each side of a nominal median plane through the whole body. This median plane may notionally be  
5 anywhere within the body - provided, of course, that there are indeed two piezoelectric-portion groups one either side of it - but most conveniently it will be co-planar with the device's neutral axis plane. Usually, the neutral axis plane is that plane about which the device is generally both physically and piezoelectrically balanced - in the present case, then, the piezoelectric portions, and the forces they engender,  
10 would be evenly disposed either side of the median plane.

The dimensions of devices of the invention may vary from fractions of a millimetre to many millimetres. However, the relative sizes of dimensions must be determined for specific geometries. Nevertheless, for devices where the corrugations are not parallel the pitch of the corrugations should be relatively small compared to the  
15 smallest in-plane dimension of the device. Indeed, in some such devices (tape-form devices, as discussed further hereinafter with reference to the accompanying Drawings) the pitch of the corrugations should be several times smaller than the width of the tape, to ensure the corrugations appear as unidirectional benders on the scale of the device.

In operation the device of the invention, which has portions in groups that are  
20 spatially separated across the notional median plane, bends as the result of any dimension change of the piezoelectric-layer portions in the group on one side. Moreover, any piezoelectric portion dimension change in a group on one side of the median plane tends to bend the whole device in the opposite direction to the same-sense piezoelectric portion dimension change in the group on the other side of that median  
25 plane.

The portion dimension change is that associated with applying an electric field across a piezoelectrically-poled layer, and as might be expected the exact nature of the

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-11-

change - whether it is an expansion or a contraction - depends upon the direction of the field and of the piezoelectric-layer portion's polarity. Piezoelectric materials are poled by subjecting them to a very strong electric field, which causes the individual domains within the material to align with the field. If the subsequently-applied activation field is then in the same direction as the poling field the material expands, while if it is then in the opposite direction the material contracts. It will be understood, therefore, that the direction/nature of a "bend" - a dimension change - of each piezoelectric-layer portion in a device of the invention depends both on how that portion was poled and on the direction of the activation field. It will thus be appreciated that the appropriate "bend" result can be achieved either by poling the complete piezoelectric layer in the same direction and then applying the activating field to the top and bottom portions in opposite directions, the top in one and the bottom in the other, or doing it the other way round, poling the layer's portions oppositely - the top ones one way, the bottom ones the other - and applying a single activating field in the same direction all over.

The device of the invention has a simple, single layer of piezoelectric material physically shaped so as to have separate, distinct piezoelectric portions in two groups one on each side of a nominal median plane through the whole body. This shape can be attained in any way possible. For example, it may be formed by extruding (through a suitably-shaped orifice) a supply of plastic piezoelectric material (such as PZT paste), or by pressing (into a mould) a sheet of such material. This is quite useful for making complex corrugated shapes which are subsequently fired/sintered. Alternatively, a body of cured piezoelectric material for example a sheet of sufficient thickness may be carved or cut into the desired corrugated shape.

In the devices of the invention the bending deformation and/or moment generated by the application of activation voltages (electric fields) is, as noted above, dependent on the second moment of area of the cross-section, which, for the case of a regularly-corrugated device, is determined mainly by the size of the corrugations, and to

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-12-

a lesser extent the thickness of the piezoelectric sheet or layer. This means that the proposed invention enables there to be designed a bender suited for use with a specific voltage - which is determined by the nature of the piezoelectric material and the thickness of the layer - and quite independently of the desired motion or blocking force - which depend on the generated force, and particularly on the stiffness and rigidity of the device (the greater these are the less the device will bend and buckle when pushing against something). Such a device does not currently exist.

Piezoelectric devices which have a corrugated nature have already been described in the Art. However, they are invariably two-layer devices, typically bimorphs, and apart from their corrugated nature are therefore constructed, and function, in a different manner to the single layer devices of the present invention. Thus, a corrugated bimorph device as known in the Art, where the peaks are activated in the opposite sense to the troughs, will deform so as the increase or decrease the wavelength of the corrugations, and so it will change shape - it will expand or contract - in the plane of the corrugations. It is therefore acting as a linear actuator. In the present invention, however, a single layer piezoelectric sheet with straight corrugations bends out of the plane of the corrugations, and along the corrugations not across them.

These and other features of the inventions will be apparent from the following detailed description of non-limitative examples making reference to the following drawings.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

In the drawings:

Figs. 1A, B shows in perspective and end view a single-layer corrugated piezoelectric device of the invention;

Figs. 2A, B show in end view the electrode arrangement (and possible poling and actuating field directions) for the Fig. 1 device;

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-13-

- Figs. 3A, B show in end view V- and U-section devices of the invention;  
 Fig. 4 shows in end view a rectangularly-corrugated device of the invention;  
 Figs. 5A and B show (in perspective) two "S"-bending devices of the invention;  
 Figs. 6A, B, C and D show (in side perspective and cut-away view) two different  
 5 doming corrugated devices of the invention;  
 Figs. 7A-D show (in plan, perspective, side edge and end view) a linear strip  
 corrugated device of the invention;  
 Figs. 8 and 9 show (in plan and perspective view) two different curved strip  
 corrugated devices of the invention; and  
 10 Figs. 10A-C show (in plan, perspective and sectional view) a third curved strip  
 corrugated devices of the invention.

## DETAILED DESCRIPTION

- Fig. 1A shows in perspective a single-layer corrugated piezoelectric device of the  
 invention; it shows how a straight bender can be made from merely a single layer of  
 15 piezoelectric material and the appropriate electrodes.

The device is little more than an elongate sheet **11** of piezoelectric material that  
 has been pressed (or folded) into a simple corrugated shape with the semi-circular  
 corrugations **12** running the length of the sheet. The sheet has a notional median plane  
**MP** shown dashed, and has seven clearly distinct piezoelectric portions, three on one  
 20 side (the upper half, as shown) and four on the other (the lower half). The upper three  
 belong to one group that is generally planar, and the lower four belong to the other  
 group. These groups are shown in dashed boxes **U** and **L** in Figs. 2A, B to be discussed  
 below.

- The sheet has, at the appropriate manufacturing stage, been poled - that is, its  
 25 piezoelectric crystals have been forced by a strong applied electric field to align  
 themselves pointing along the thickness of the sheet - and formed on the top (as viewed)  
 surface of the sheet **11** is a whole series of separate electrodes **13** (shown in Fig. 1B

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-14-

only), while formed on the bottom (as viewed) surface is a single continuous electrode 14. Together these make effective pairs of electrodes, and in each such pair's case a small electric field applied using that pair will cause the piezoelectric material in the corrugation to expand or contract, depending on the direction of the field relative to the poling direction.

As shown in Fig 1A, the top electrodes 13 are separate but the bottom electrode 14 is a single, continuous electrode. How this works can be understood simply by imagining the continuous one is neutral, say (it is shown earthed), and then considering the electrical fields across each alternate corrugation. The applied voltage alternates between adjacent electrode pairs from positive to negative voltage as indicated by the circled plus and minus signs. One such field will be from neutral to plus - upwards, as shown - while the adjacent ones will be from minus to neutral - downwards, as shown. So, even with one of the electrode sets being continuous there can still be set up alternate opposed activation fields (up, down, up, down, ... and so on).

If, as shown, the applied activation field alternates between adjacent electrode pairs, so each is in the opposite sense of that of its immediate neighbours either side, then all the corrugations on one side of the sheet 11 (and thus on one side of the median plane MP) will suffer the same effect - expansion or contraction, depending on the field direction - while all the corrugations on the other side of the sheet 11 (and on the other side of the median plane MP) will suffer the opposite effect. So if, say, all the upper (as viewed) corrugations contract, then all the lower corrugations expand, and because the upper and lower corrugations are spaced across the median plane it necessarily follows that the sheet as a whole bends normal to that plane as dictated by these contractions and expansions - namely up, as shown by the dotted lines in Fig. 1A.

Were the fields to have been the other way round then the sheet would have bent downwards, instead.

In this way a single sheet of piezoelectric material behaves just like a unimorph

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-15-

or bimorph, yet without the need for two layers, and without the concomitant need for, and the problem of, a central electrode.

Figs. 2A, B show two possibilities for poling direction (the faint short arrow **25**) and actuating electric field direction (the heavy long arrows **26**). In Fig. 2A the entire sheet has been poled in the same direction **25**, while the electric fields direction **26** alternate, while in Fig. 2B it is the electric fields **26** which are in the same direction and the poling **25** that alternates. The effect, though, is the same.

Figs. 2A, B also show how the piezoelectric portions are arranged in two essentially planar groups defined by the dashed boxes **U** and **L** which are so disposed as to face each other across the median plane and wherein the portions in one group expand while the portions in the other group contract.

Although the example shown in Figs. 1 and 2 is for a corrugated cross-section, any cross-section that is not linear will work if regions above or below a neutral axis of the cross-section are deformed differently. Figs. 3A and B show a V-section device of the invention and a U-section device, and Fig. 4 shows a rectangularly-sectioned corrugated device. All these work in much the same way.

Thus, in Fig. 3A the median plane runs horizontally (as viewed) through the V so that its two tip portions **21** form a generally planar group lying on one side of the median plane **MP** while its lower v section **22** is the group on the other side. The U-shaped device of Fig. 3B is much like a "wide" version of the V-shaped device of Fig. 3A, with its two arms **31** forming the generally planar group on one side of the median plane **MP** and its base **32** the group on the other.

The Fig. 4 is a rectangularly-sectioned corrugated device. The upper (as viewed) corrugations **41** are in a generally planar group on the opposite side of the median plane **MP** to the group of its lower corrugations **42**, and in the example shown there is a single bottom electrode (not shown separately, but earthed/grounded), while the top electrodes (again not shown separately) are alternately plus and minus as indicated by the symbols

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-16-

in the circles.

Figs. 5A and B show (in perspective) two "S"-bending devices of the invention - that is to say, devices designed, shaped and operated to bend into an S-shape. The advantage of this type of deformation is that it enables devices to be stacked, one on top of the next (rather like the crease of a piano accordion bellows), to amplify the movement. For this purpose it is required that the piezoelectric material deform differently in each half of the device - expanding on top at one end while contracting on top at the other. To achieve this in one way, the electrodes are split half way down the device along line 53, as is the case in the device of Fig. 5A where line 53 indicates the split electrodes. In a first corrugation 51, 52 the field direction are indicated by the respective symbols. In an alternative way the direction of the corrugations is changed halfway along, as is shown in Fig. 5B.

Also, two S-bending devices can be combined with the free (distal) end sections abutting, resulting in a strip of twice the length, and, if the other (proximate) ends are fixed, a bulging middle section upon activation.

Figs. 6A, B, C and D show (in side, perspective and cut-away view) two different doming corrugated devices of the invention.

The device is basically a "flat" disc of piezoelectric material. It can be corrugated in either of two different ways - the two Figs. 6B, C and D show these two types of corrugation, one radial (6B), the other circumferential (6C,D). Fig. 6A shows, from the side, how each device moves upon actuation - moving from a generally flat, planar object (the solid outline) to take up a domed shape (the dashed outline). Either corrugated form can be utilised to achieve this type of shape change.

Typical dimensions for a domed device of the type shown in Fig. 6B made from PZT4D would be an outer diameter of 15mm, a thickness of 20µm, and a mass of 27mg. The dome should then exhibit a corrugation amplitude of 20µm, and a corrugation pitch of approximately 0.5mm. With an operating voltage of ±20V there should be obtained a



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-17-

displacement of  $\pm 0.1\text{mm}$  with a blocking force of 7mN.

Figs. 7A-D show (in plan, perspective, side and end view) a linear strip corrugated device of the invention.

The device is a linear strip 71 of piezoelectric material corrugated across rather  
5 than along the length of the strip. However, the corrugations 72 are angled (at about 45  
degrees to the long axis A-A of the strip) rather than straight across; since the bending  
action of the device is only along the length of the corrugations 72, and not  
perpendicular to them, the angled corrugations 72 have the effect of twisting the strip  
about its axis A-A. The general sense of the twisting is shown in Figs. 7B, D (the latter  
10 is what can be seen on actuation looking along the axis in the direction of the axis A-A;  
what actually happens might be subtly different, depending on the exact nature of the  
corrugations).

The geometry represented by Fig. 7 can then be curved into an arc to create a  
variant that deforms up and down across the plane of the arc. Figs. 8-10 show (in at  
15 least plan and perspective view) three different arcuate strip corrugated devices of the  
invention.

This type of structure, novel and inventive in its own right, demonstrates a device  
geometry that significantly amplifies the normal relatively small deformation of  
piezoelectric materials to produce a large displacement.

20 The manner in which such structures works is complex, and not easy to  
appreciate. The following comments may assist.

Consider a (planar) circular arc 81, fixed at one end 87 (as shown in Fig. 8). If  
the arc is deformed into a helix of the same radius, the free end has moved out of the  
plane of the circular arc. It is this deformation that the structure induces in a corrugated  
25 piezoelectric tape that nominally forms part of a circular arc. The same principles apply  
if considering a spiral curve fixed at one end. This out of plane deformation is achieved  
if torsion is induced in the arc.

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-18-

As noted, Figs. 8-10 show three different curved strip corrugated devices. Fig. 8 shows one in which the corrugations 82 are not straight across the strip but at an angle (of about 45 degrees) to the tangent to the curve. These corrugations are straight, and the strip 81 is otherwise flat; in Fig. 9, however, the corrugations 92 are themselves arcuate (albeit generally also at 45 degrees), while in Fig. 10 the corrugations 102 are straight (and at 45 degrees), but the strip has itself been curved/dished to take on a three-dimensional aspect, best seen at the fixed end 107. Arbitrary cross-sections 108 along the device show the superposition of the arcuate strip and any curvature introduced by the corrugations.

10 The reason for curving the corrugations as in Figs. 9 and 10 is to increase the blocking force of the device. It is easy to bend straight corrugations (as in Fig. 8) perpendicularly to the direction of the corrugations, and curving them resists this bending. The Fig. 10 "out-of-plane" curve to the corrugations gives the best results, and in addition seems to increase the amount of movement. Therefore the geometry shown  
15 in Fig. 10 gives the best performing actuators.

This geometry can produce a large actuation device pressed from a single layer of piezoelectric material. Thus, using PZT4D as the piezoelectric material, and constructing an arcuate strip of outer diameter 15mm, inner diameter 10mm, and tape thickness 20µm, with corrugation amplitude 0.25mm, corrugation pitch approximately  
20 1mm, and mass 15mg, there should be obtained, with an operating voltage of ±20V, a displacement of ±0.25mm with a blocking force of 0.3mN. This would be an excellent result.

The corrugations shown in the devices of Figs. 8-10 are all regular, all at the same angle to the radial direction. An interesting property of the deformation of a  
25 circular arc into a helix by the application of a torsion is that the deformation does not increase linearly around the length of the arc. However by suitably varying the angle of the corrugations around the arc, it may be possible to remove this non-linearity. This

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-19-

may have the effect of increasing the efficiency of the device.

The actual construction of devices of the invention can, as noted above, be effected in a number of ways. Thus, the required corrugated shapes can be embossed into a compliant sheet of piezoelectric material prior to sintering, the required shape  
5 simultaneously being cut from the sheet using the same press tool. The devices can then be cured and sintered in appropriately shaped saggars to maintain the shape. After sintering, the electrodes can be applied either by printing or plating (or a combination of the two). The printing allows the electrodes to be applied on certain places to delineate the different regions of the device that must deform different. The entire device can then  
10 be poled in the same manner, so that each region would need to be activated separately.

Alternatively, the corrugations can be cut (sawn) into a flat sheet of piezoelectric material that has already been sintered (and possibly poled). The sawing process creates the required regions above and below the neutral axis of the cross-sections. The geometries produced then have squared corrugations similar to those shown in Fig. 4,  
15 but would of course still operate in the same fashion as those with rounded corrugations. It may be easier to manufacture certain geometries with this approach, since there will be fewer problems with sintering a thicker flat plate than a curved thin sheet. In low volumes, this approach will also reduce the manufacturing cost, since the costs of custom tooling will be reduced.

20 One of the main manufacturing issues associated with corrugated structure devices of the invention is the need for a number of different electrical connections to be made to the device, since there are different regions that must deform differently. One solution to this problem is to connect to the different regions temporarily during poling, so that all the regions of the device can be connected together and be activated with the  
25 same voltage during use. This process may require two electrode printing processes; the second one to join up all the regions after poling.

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-20-

## CLAIMS

1. A piezoelectric device the body of which is a single layer of piezoelectric material shaped so as to have a multiplicity of separate, distinct piezoelectric portions  
5 disposed in two generally planar groups that extend along, one on each side of, a nominal median plane through the whole body, which groups are thus spatially separated by and face each other across that median plane, with the result that any piezoelectric portion dimension change in the group on one side of the median plane will tend to bend the device normal to the median plane in the opposite direction to the same-sense  
10 piezoelectric portion dimension change in the group on the other side of that median plane.
2. A device as claimed in claim 1 the overall shape of which is that of an elongate body shaped in a direction across the length of the elongate body so as to have said  
15 separate, distinct piezoelectric-portion groups extending along the body.
3. A device as claimed in either of the preceding claims wherein the piezoelectric material is a ceramic material.
- 20 4. A device as claimed in any of the preceding claims, wherein the body of the single layer is a corrugated sheet.
5. A device as claimed in claim 4, wherein the corrugated sheet is generally planar.
- 25 6. A device as claim in claim 4 or 5, wherein the corrugated sheet is uniformly corrugated along its entire length.

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

-21-

7. A device as claimed in any one of claims 4 to 6, wherein the shape of the corrugations is either sinusoidal or semicircular.
8. A device as claimed in any one of claims 4 to 7, wherein the corrugations are reversed halfway along the body.
9. A device as claimed in any one of claims 1 to 8, wherein the body is shaped as a (part) ring or annulus, or as a disk, and the shape is corrugated such that the corrugations are straight across the body, and thus generally radial, or are at some angle to the theoretical radii, and are either straight or alternatively slightly curved into arcs.
10. A piezoelectric device that is a generally planar single-layer arcuate strip-like body having overall a broken annular shape, the body being physically shaped in a direction along its arcuate length so as to have corrugations extending across the strip, these corrugations forming separate, distinct piezoelectric-portion groups extending along and on each side of a nominal median plane through the whole body, which groups are thus spatially separated by and face each other across that median plane, with the result that any piezoelectric portion dimension change in the group on one side of the median plane will tend to bend the strip normal to the median plane across its length in the opposite direction to the same sense piezoelectric portion dimension change in the group on the other side of that median plane.
11. A device as claimed in any one of the preceding claims, wherein the corrugations are disposed evenly and symmetrically about a centre line normal to the median plane.
12. A device as claimed in any one of the preceding claims, wherein the median plane is co-planar with the device's neutral axis plane.

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

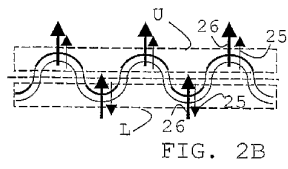
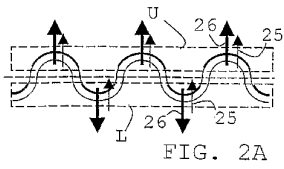
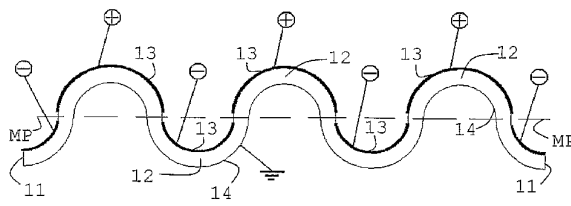
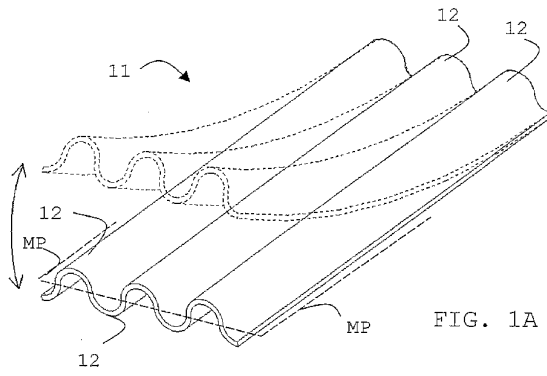
-22-

13. A device as claimed in any one of the preceding claims, wherein the corrugations are not parallel the pitch of the corrugations is relatively small compared to the smallest in-plane dimension of the device.
- 5 14. A multiplicity of devices as claimed in any one of the preceding claims formed into a stack.

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

1/8



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

2/8

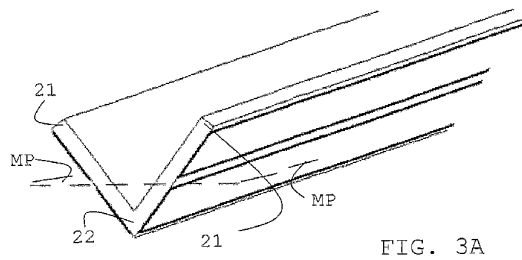


FIG. 3A

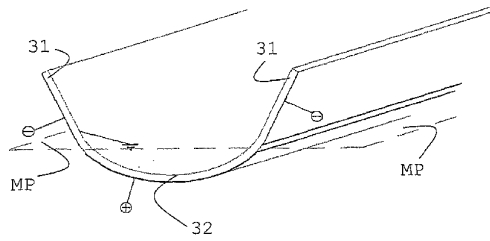


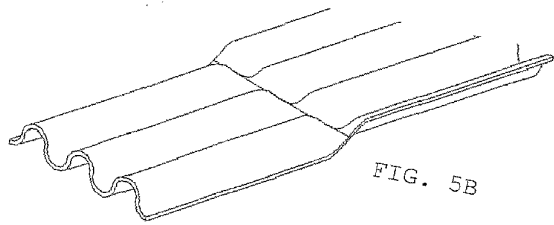
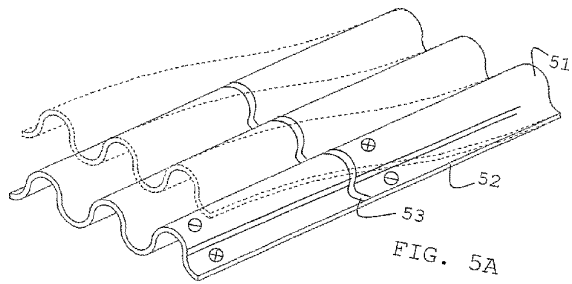
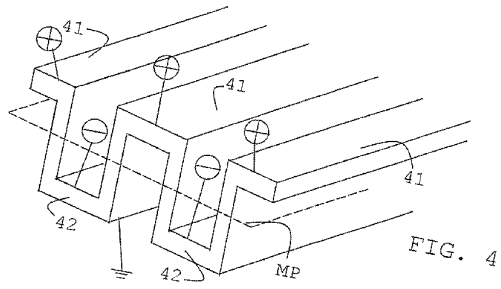
FIG. 3B



WO 03/028122

PCT/GB02/04370  
PCT/GB 2002 / 1

3/8



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

4/8

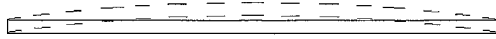


FIG. 6A

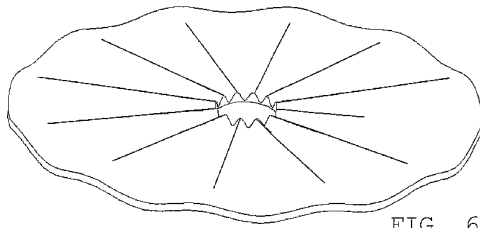


FIG. 6B

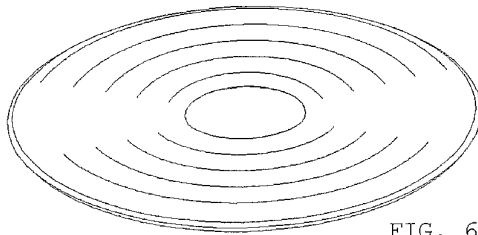


FIG. 6C

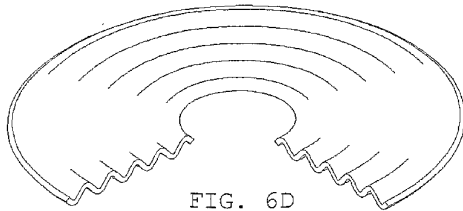
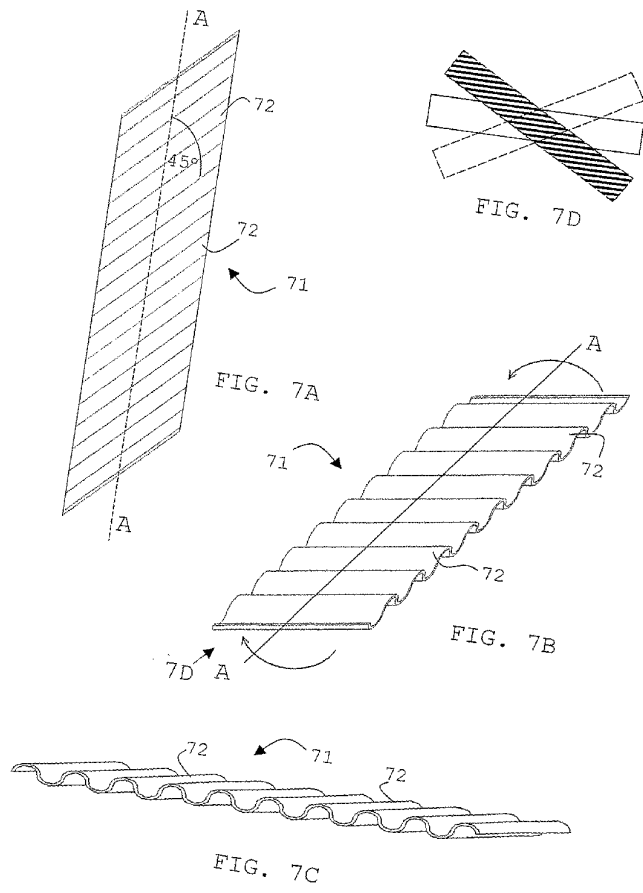


FIG. 6D

WO 03/028122

PCT/GB02/04370  
2002 / U 0 4

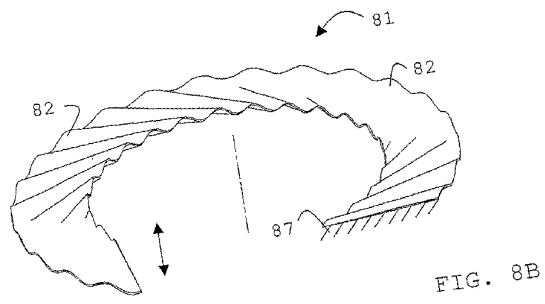
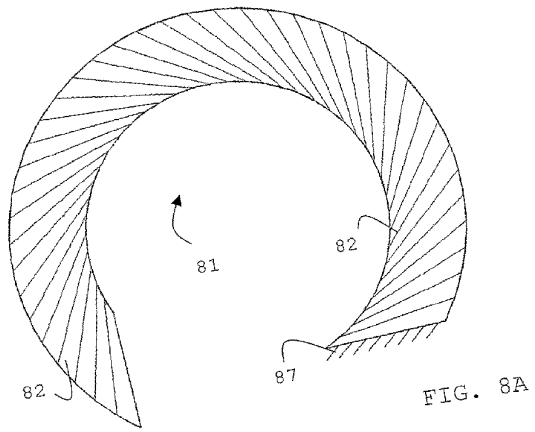
5/8



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

6/8



WO 03/028122

PCT/GB02/04370

7/8

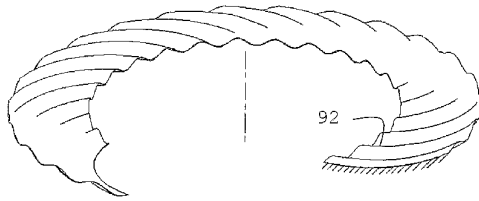


FIG. 9

WO 03/028122

PCT/GB02/04370

8/8

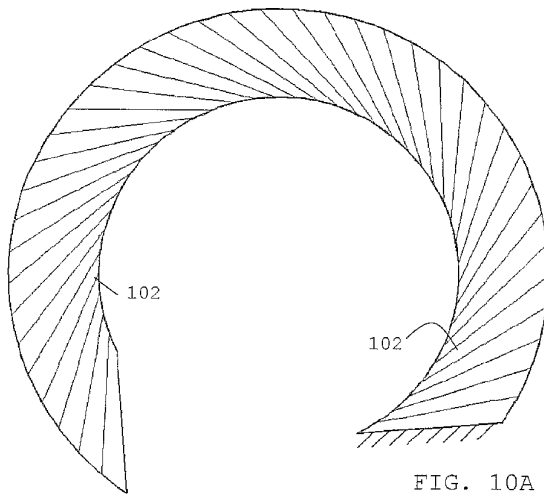


FIG. 10A

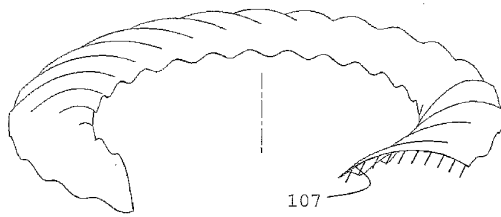


FIG. 10B



FIG. 10C

## 【国際公開パンフレット（コレクトバージョン）】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property  
Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
3 April 2003 (03.04.2003)

PCT

(10) International Publication Number  
**WO 2003/028122 A3**(51) International Patent Classification: **H01L 41/09**

(21) International Application Number: PCT/GB2002/004370

(22) International Filing Date: 26 September 2002 (26.09.2002)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data: 0123294.1 27 September 2001 (27.09.2001) GB

(71) Applicant (for all designated States except US): L.LM-ITED [GB/GB]; St John's Innovation Centre, Cowley Road, Cambridge CB4 0WS (GB).

(72) Inventors; and

(75) Inventors/Applicants (for US only): TOPLISS, Richard [GB/GB]; 43 Bishops Road, Trumpington, Cambridge CB2 2NQ (GB). LIVINGSTONE, David [GB/GB]; 71 Fowlmere Road, Heydon, Royston, Hertfordshire SG7 5NS (GB). MATHESON, Andrew [GB/US]; 6 Hurd Road, Belmont, MA 02478 (US). MCKEVITT, Gareth [CA/GB]; 12 Fen Road, Chesterton, Cambridge CB4 1TX (GB). SHEPHERD, Mark, Richard [GB/GB]; Clare

House, 124 High Street, Meldreth, Ryston, Hertfordshire SG8 6BL (GB). HOOLEY, Anthony [GB/GB]; 79 De Preville Avenue, Cambridge CB4 1HP (GB).

(74) Agents: MERRYWEATHER, Colin, Henry et al.; J.A. Kemp &amp; Co., 14 South Square, Gray's Inn, London WC1R 5JJ (GB).

(81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

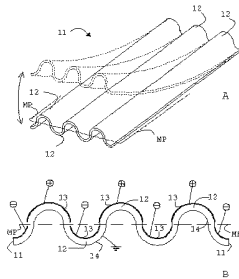
(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:

— with international search report

[Continued on next page]

(54) Title: PIEZOELECTRIC STRUCTURES



(57) Abstract: An equivalent to the spatial separation either side of a nominal median plane that is inherent in a bimorph (with one piezoelectric layer on one side, and the second on the other side of the plane) is attained by structurally shaping the cross-section of a simple, single piezoelectric layer (11) such that it has a multiplicity of piezoelectric portions arranged in two generally-planar groups one either side of a median plane, so that any dimension change undergone by a portion on one side of that plane will tend to bend the whole device in the opposite direction to the same sense dimension change undergone by a portion on the other side of that plane. The simple, single layer acts as though it were a bimorph if elongate and beam-like, bending along its length, one end moving up/down, or back/forth, relative to the other but with any need for an internal, electrode.

WO 2003/028122 A3

**WO 2003/028122 A3**



(88) Date of publication of the international search report:  
12 February 2004

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*



## 【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/GB 02/04370
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H01L41/09		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 H01L H04R		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, WPI Data, PAJ		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 56 012697 A (SUNA SEIKOSHA KK) 7 February 1981 (1981-02-07) figures 1,2	1
A	J K LEE & M W CSONTOS: "Multilayered piezoelectric flexure device (JK Lee & MW Csontos)", RESEARCH DISCLOSURE, KENNETH MASON PUBLICATIONS, HAMPSHIRE, GB, VOL. 187, NR. 15 XP007106893 ISSN: 0374-4353 figures 2A-C	1
A	WO 01 47041 A (LENEL URSULA RUTH ; SHEPHERD MARK RICHARD (GB); I IPR LTD (GB); HOO) 28 June 2001 (2001-06-28) the whole document	1-14
-/-		
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "S" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 5 November 2003		Date of mailing of the international search report 13/11/2003
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5518 Patentstein 2 NL-2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 851 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Zuccatti, S

Form PCT/ISA216 (second sheet) (July 1992)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 3 816 774 A (MIYAJIMA S ET AL) 11 June 1974 (1974-06-11) cited in the application the whole document	1-14
A	US 4 028 566 A (FRANSSEN NICO VALENTINUS ET AL) 7 June 1977 (1977-06-07) cited in the application the whole document	1-14
A	US 5 633 554 A (KAJI TAKATOSHI) 27 May 1997 (1997-05-27) cited in the application the whole document	1-14

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT				International application No	
on patent family members				PCT/GB 02/04370	
Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date		
JP 56012697	A	07-02-1981	NONE		
WO 0147041	A	28-06-2001	AU 2016501 A	03-07-2001	
			AU 2016801 A	03-07-2001	
			CN 1434985 T	06-08-2003	
			EP 1240676 A2	18-09-2002	
			WO 0147041 A2	28-06-2001	
			WO 0147318 A2	28-06-2001	
			GB 2364169 A, B	16-01-2002	
			GB 2376834 A, B	24-12-2002	
			JP 2003518752 T	10-06-2003	
			US 2003095678 A1	22-05-2003	
US 3816774	A	11-06-1974	JP 858504 C	16-05-1977	
			JP 48080286 A	27-10-1973	
			JP 51032516 B	13-09-1976	
			JP 858505 C	16-05-1977	
			JP 48080287 A	27-10-1973	
			JP 51032517 B	13-09-1976	
			JP 858506 C	16-05-1977	
			JP 48080288 A	27-10-1973	
			JP 51032518 B	13-09-1976	
			JP 842273 C	28-01-1977	
			JP 48080290 A	27-10-1973	
			JP 51013635 B	01-05-1976	
			JP 48081569 A	31-10-1973	
			JP 48087943 A	19-11-1973	
			JP 48090195 A	24-11-1973	
			JP 865857 C	23-06-1977	
			JP 48090723 A	27-11-1973	
			JP 51036066 B	06-10-1976	
			JP 48094382 A	05-12-1973	
US 4028566	A	07-06-1977	NL 7502453 A	07-09-1976	
			AT 345362 B	11-09-1978	
			AT 150776 A	15-01-1978	
			CA 1050155 A1	06-03-1979	
			DE 2606579 A1	16-09-1976	
			FR 2303436 A1	01-10-1976	
			GB 1489351 A	19-10-1977	
			IT 1057636 B	30-03-1982	
			JP 1166714 C	08-09-1983	
			JP 51111329 A	01-10-1976	
			JP 57061238 B	23-12-1982	
US 5633554	A	27-05-1997	JP 2905643 B2	14-06-1999	
			JP 5335647 A	17-12-1993	

---

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW, ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES, FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,N O,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 トップリス、リチャード

イギリス国、ケンブリッジ、トラムピングトン、ビショプス ロード 43

(72)発明者 リヴィングストン、デーヴィド

イギリス国、ハートフォードシャー、ロイストン、 フォウルメアー ロード 71、ヘイドン

(72)発明者 マシソン、アンドリュー

アメリカ合衆国、マサチューセッツ、ブレモント、ハード ロード 6

(72)発明者 マッケヴィット、ガレス

イギリス国、ケンブリッジ、チェスタートン、フェン ロード 12

(72)発明者 シェパード、マーク、リチャード

イギリス国、ハートフォードシャー、リストン、 ハイ ストリート 124、メルドレス、クレ  
アー ハウス

(72)発明者 ホーレイ、アンソニー

イギリス国、ケンブリッジ、デ フレヴィル アベニュー 79