(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 37 114 T2** 2008.01.24

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 324 402 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 37 114.6**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 001 185.2**
(96) Europäischer Anmeldetag: **04.04.1996**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **02.07.2003**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **30.05.2007**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **24.01.2008**

(51) Int Cl.[8]: ***B29C 41/20*** (2006.01)
B29C 41/22 (2006.01)
B32B 1/00 (2006.01)
H01L 41/083 (2006.01)
H01L 41/22 (2006.01)
H01L 41/24 (2006.01)
H01L 41/09 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
416598 **04.04.1995** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB, IT

(73) Patentinhaber:
The United States of America, represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, D.C., US

(74) Vertreter:
Patentanwälte von Kreisler, Selting, Werner et col., 50667 Köln

(72) Erfinder:
Hellbaum, Richard F., Hampton, VA 23665, US; Bryant, Robert G., Poquoson, VA 23662, US; Fox, Robert L., Gloucester, VA 23072, US; Jalink, Antony Jr., Newport Newes, VA 23606, US; W Rorhbach, Wayne, Yorktown, VA 23692, US; Simpson, Joycelyn O., Hampton, VA 23666, US

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung von aus monomorphen ferroelektrischen Dünnschichten zusammengesetzten Treibern und Sensoren**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK

1. Erfindungsgebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein ferroelektrische Bauelemente und insbesondere ferroelektrische Bauelemente, die große mechanische Lastverschiebungen bereitstellen.

2. Beschreibung des Stands der Technik

[0002] Zu Verfahren nach dem Stand der Technik zählen piezoelektrische "Rainbow"-Aktoren und -Sensoren, herkömmlichere piezoelektrische Aktoren und Sensoren und elektromagnetische Aktoren.

[0003] Herkömmliche piezoelektrische Aktoren zeigen begrenzte mechanische Verschiebungen. Die Leistung herkömmlicher piezoelektrischer Bauelemente wird durch die im Grunde niedrige Konstante der piezoelektrischen Verschiebung des Materials beschränkt. Herkömmliche Bauelemente mit vernünftiger Dicke (d. h. in der Größenordnung einiger weniger Millimeter) liefern deshalb nur eine mechanische Lastbewegung im Mikrometerbereich. "Rainbow"-Aktoren, "Moonies", monomorphe und bimorphe piezoelektrische Aktoren weisen eine größere mechanische Lastbewegung auf. Jedoch liefern sogar die dünnsten keramischen Wafer, die die größte beobachtete Lastbewegung aufweisen, eine Verschiebung, die für ein 3–4 cm langes Bauelement in der z-Richtung auf eine Bewegung von etwa 1 mm begrenzt ist. Außerdem sind 1/4 mm dicke keramische Bauelemente extrem spröde und brüchig, so dass sie leicht brechen und spezielle Handhabung erfordern. Zu bisherigen Verfahren zum Ausbilden von "Rainbow"-Aktoren zählt ein zusätzlicher chemischer Reduktionsprozess, der Bleidämpfe aus dem Wafer in die Atmosphäre freisetzt.

[0004] WO 94/19834 offenbart eine elektroaktive Vorrichtung gemäß der Präambel von Anspruch 1. US-A-3 940 637 offenbart eine passive Vorrichtung, die eine piezoelektrische Schicht umfasst, welche an eine Vorbelastungsschicht geheftet ist.

[0005] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht dementsprechend in der Bereitstellung eines ferroelektrischen Aktors mit verbesserter mechanischer Verschiebung.

[0006] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Bereitstellung eines ferroelektrischen Aktors mit verbesserter Haltbarkeit.

[0007] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Bereitstellung eines ferroelektrischen Aktors mit verbesserter Bearbeitbarkeit.

[0008] Noch eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, die obigen Aufgaben auf einfache Weise zu bewerkstelligen.

[0009] Weitere Aufgaben und Vorteile der vorliegenden Erfindung gehen aus den Zeichnungen und der Spezifikation hervor, die folgen.

KURZE DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0010] Gemäß der vorliegenden Erfindung werden die obigen und weitere Aufgaben erreicht, indem eine elektroaktive Vorrichtung gemäß Anspruch 1 bereitgestellt wird.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0011] Fig. 1 ist eine Perspektivansicht einer bevorzugten Ausführungsform vor dem Kleben der Schichten;

[0012] Fig. 2 ist eine Querschnittsansicht einer bevorzugten Ausführungsform nach dem Kühlen der Schichten;

[0013] Fig. 3 ist eine Querschnittsansicht einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0014] Fig. 4 ist eine Querschnittsansicht einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0015] Fig. 5 ist eine Querschnittsansicht, die einen Herstellungsprozess der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0016] Fig. 6 ist eine Perspektivansicht einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0017] Fig. 7 ist eine Draufsicht, die mehrere vorbelastete Wafer zeigt, die zur Ausbildung eines größeren Wafers verbunden sind; und

[0018] Fig. 8 ist eine Seitenansicht, die drei der vorbelasteten Wafer in einer gestapelten Konfiguration zeigt.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0019] Fig. 1 zeigt ein piezoelektrisches Bauelement **10** vor der Verarbeitung. Das Bauelement enthält vier Schichten, eine piezoelektrische Schicht **12**, eine Vorbelastungsschicht **14** und zwei Elektrodenschichten **18a** und **18b**. Die piezoelektrische Schicht **12** kann aus einer Scheibe aus piezoelektrischem Material bestehen, das von Aura Ceramics (Material C3900) oder Morgan Matrox im Handel erhältlich ist.

Diese Schicht kann aber auch aus einem piezoelektrischen Material bestehen, das zuerst zu einem feinen Pulver gemahlen und dann zu einer Schicht konsolidiert wurde, indem das Pulver unter Druck mit einem Kleber wie etwa einem Polyimid verklebt wurde, wie in "Tough, Soluble, Aromatic, Thermoplastic Copolyimides", Serialnummer 08/359,752, eingereicht am 16. Dezember 1994, gezeigt wird. Man beachte, dass das Klebebindemittel bei letzterem Ansatz einen sehr kleinen Anteil von in der Regel 5 Gew.-% der fertiggestellten piezoelektrischen Schicht **12** ausmacht. Dieser letztere Ansatz ist deshalb attraktiv, da der erforderliche Klebevorgang einfach gleichzeitig mit anderen erforderlichen, im letzten Absatz erörterten Klebevorgängen durchgeführt werden kann. Zur Ausbildung dieser Schicht können zusätzlich zu piezoelektrischen Materialien andere ferroelektrische Materialien einschließlich piezostriktiver Materialien verwendet werden.

[0020] Die Vorbelastungsschicht **14** kann aus einem mechanisch starken Kleber wie etwa Polyimid hergestellt werden. Für diese Schicht **14** können auch Thermoplaste, Duroplaste und Hartlotlegierungen verwendet werden. Außerdem können mehrere Vorbelastungsschichten **14** verwendet werden, damit man eine größere Vorbelastung erhält. Der Kleber wird entweder nass aufgetragen oder ist ein Dünnfilm, der auf eine Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **12** aufgeschmolzen und dann bei einer erhöhten Temperatur mit ihr verklebt wird, die von dem verwendeten Kleber abhängig ist und gestattet, dass das Material einer Härtung, einer Trocknung und/oder einem Schmelzfließen unterzogen wird. Die so ausgebildete Schicht aus Kleber ist in der Regel zwölf Mikrometer dick, doch kann die Dicke im Bereich zwischen einigen Mikrometern und mehreren Millimetern liegen. Das Verkleben der Schichten erfolgt bei einer hohen Temperatur, die von dem Kleber abhängt, aber in der Regel 200–350°C beträgt, so dass die differentiellen thermischen Kompressionsraten der Schichten den Schichten automatisch die gewünschte mechanische Vorbelastung verleihen, wie in Fig. 2 gezeigt, wenn die zweischichtige Verbundmatrix auf Raumtemperatur abkühlt. Falls gewünscht kann die Vorbelastungsschicht **14** aus Kleber verstärkt werden, und zwar in erster Linie damit die Höhe der Vorbelastung vergrößert werden kann, aber auch im Hinblick auf mechanische Zähigkeit und verringerte Hysterese. Dazu wird eine dünne Schicht aus verstärkendem Material **16** auf (Fig. 3) oder in (Fig. 4) die Vorbelastungsschicht **14** geschmolzen oder geklebt. Zu Beispielen für verstärkende Materialien zählen u. a. Kunststoffe, Keramiken, Metalle und Kombinationen aus diesen Materialien wie etwa Aluminiumblech und Kohlenstofffasern. Das Kleben des verstärkenden Materials **16** kann gleichzeitig mit dem Kleben der piezoelektrischen Schicht auf die Vorbelastungsschicht erfolgen.

[0021] Durch die Klebeschicht kann der dünne keramische Wafer unter Verwendung herkömmlicher Schneidwerkzeuge wie etwa Scheren und Musterschneidemaschinen ohne Absplittern oder Brechen zu rechtgeschnitten werden, was zu rechtgeschnittene Gestalten anstatt geformte Gestalten gestattet. Dieses Verfahren ermöglicht die Verwendung von Techniken, die den Musteraufbau von dreidimensionalen Objekten aus der Konsolidierung der zweidimensionalen flachen keramischen Gestalten gestatten. Mit diesen Schichten kann man auch einen zusätzlichen Umgebungsschutz erhalten, wodurch diese Bauelemente unter rauen Bedingungen verwendet werden können. Falls die verwendete Kleberschicht ein gutes Dielektrikum darstellt, ist die Wahrscheinlichkeit für eine interne und externe Lichtbogenbildung aufgrund der angelegten Spannung reduziert.

[0022] Bei einer Ausführungsform enthält das piezoelektrische Bauelement **10** gemäß der vorliegenden Erfindung zwei Elektroden **18a** und **18b**. Die Elektroden **18a** und **18b** können von dem herkömmlicheren, durch Vakuum abgeschiedenen Metalltyp sein und vor dem Auftragen der Vorbelastungsschicht **14** auf die piezoelektrische Schicht **12** aufgebracht werden. Die Elektroden können aber auch eine Graphit- oder Metall-plus-Kleber-Mischung wie etwa Silberepoxidharz sein, das ein ausgezeichneter Leiter ist. Diese alternative Technik weist den Vorteil auf, dass die leitende Klebermischung auf die piezoelektrische Schicht **12** aufgetragen und danach auf die piezoelektrische Schicht **12** geklebt werden kann, und zwar gleichzeitig mit dem Kleben der Vorbelastungsschicht **14** und der piezoelektrischen Schicht **12**. Für die gewünschte Anwendung können gegebenenfalls auch mehrere oder strukturierte Elektroden verwendet werden.

[0023] Die obigen Lehren können kombiniert werden, um die Herstellung piezoelektrischer Bauelemente zu vereinfachen. Vollständige Bauelemente können hergestellt werden, indem getrennte Schichten aus verschiedenen Materialien zusammengetragen werden, wie etwa die entsprechenden Mischungen aus klebend aufgetragenem pulverförmigem piezoelektrischem Material plus Kleber für die piezoelektrische Schicht, leitendem Kleber für die Elektroden und der Kleber für sich selbst oder als Verstärkung für die Vorbelastungsschicht, gefolgt von einem einzigen Hochtemperaturklebevorgang, wie in "Tough, Soluble, Aromatic, Thermoplastic Copolyimides", Serialnummer 08/359,752, eingereicht am 16. Dezember 1994, beschrieben.

[0024] Während des Herstellungsprozesses sollten Vorkehrungen getroffen werden, um sicherzustellen, dass die Vorbelastungsschicht des fertiggestellten piezoelektrischen Bauelements unter Zugspannung steht, wodurch das piezoelektrische Material die ge-

wünschte Kompression erhält. Das Ausmaß der Vorbelastung in dem piezoelektrischen Material kann während der Herstellung zugeschnitten werden, um die Lastbewegung und Effizienz des fertiggestellten Bauelements zu maximieren. Die Materialschichten können auf einer gekrümmten Form ausgebildet werden.

[0025] Eine Beschreibung, die typisch ist für die Herstellung eines vorbelasteten Bauelements **10** von Hand, wird hier geliefert und ist in Fig. 5 gezeigt. Es wird eine Formoberfläche **20** für den Krümmungsgrad ausgewählt, der benötigt wird, damit man die gewünschte Vorbelastung erhält. Die verstärkende Vorbelastungsschicht **16** aus Aluminiumfolie wird dann auf der Formoberfläche **20** platziert. Als nächstes wird auf der verstärkenden Schicht **16** die klebende Vorbelastungsschicht **14** platziert, die aus einem Polyimid besteht, wie in "Tough, Soluble, Aromatic, Thermoplastic Copolyimides", Serialnummer 08/359,752, eingereicht am 16. Dezember 1994, beschrieben. Die Elektrodenschicht **18b** aus Silber wird im Vakuum auf der unteren Oberfläche des piezoelektrischen Wafers **12** abgeschieden (dieser Schritt ist unnötig, falls im voraus mit Elektroden versehene piezoelektrische Wafer verwendet werden). Der piezoelektrische Wafer **12** wird auf der klebenden Vorbelastungsschicht **14** platziert. Schließlich wird eine Elektrodenschicht **18a** aus Silber gegebenenfalls im Vakuum auf der oberen Oberfläche des piezoelektrischen Wafers **12** abgeschieden. Eine Folie aus einem Hochtemperaturmaterial **22**, wie etwa Kapton® (DuPont) wird über dem Stapel platziert und mit einem Hochtemperatur-Packband **24** versiegelt, damit man einem Vakuumbeutel erhält. Die Anordnung wird in einen Ofen platziert, und die Luft in dem Kapton®-Beutel **22** wird durch einen Vakuumanschluss **26** evakuiert. Der Ofen wird auf 300°C erhitzt, damit der Kleber schmilzt und die Anordnung verklebt. Beim Abkühlen wird die Anordnung einer weiteren Vorbelastung unterzogen, und das sich ergebende piezoelektrische Element wird aus dem Vakuumbeutel und der Form entfernt.

[0026] Obwohl die ferroelektrischen Wafer in der Regel so gepolt sind, wie sie vom Verkäufer empfangen werden, müssen sie nach einer Wärmebehandlung in dem Vorbelastungsprozess umgepolt werden. Diese Polung erfolgt bei einer erhöhten Temperatur mit einer Gleichspannung, die ausreicht, eine Dipolorientierung zu induzieren. Nach dem Polen wird der Wafer in Gegenwart des elektrischen Felds auf Raumtemperatur abgekühlt, um die induzierte Orientierung beizubehalten. Die bei der Polarisierung verwendete Stärke des Gleichfelds wird so ausgewählt, dass man eine optimale Polarisation erhält, ohne dass über das Feld hinausgegangen wird, bei dem der Spannungsdurchschlag bei einer gegebenen Polungstemperatur in dem Material auftritt.

[0027] Das Ausmaß und die Art der Eingangsspannung pro Einheit der Auslenkung, der Bewegung, der Kraft und der Ausgangsspannung, des Ausgangsstroms oder der Leistungsumwandlung kann justiert werden, indem die Dicke und/oder Anzahl der Schichten der piezoelektrischen Schicht, die Anzahl der Schichten und/oder die Dicke der Vorbelastungsschicht, das Vorbelastungsmaterial, die piezoelektrische Zusammensetzung und die Krümmung und Gestalt der Formoberfläche variiert werden. Indem die Krümmung der Form variiert wird, wird die Vorbelastung variiert, die das fertig gestellte piezoelektrische Bauelement erhält. Indem die Dicke oder die Anzahl der Vorbelastungsmaterialschichten oder das verwendete Material variiert werden, können auch die Lastbewegung und mechanische Kraft variiert werden. Während der Verarbeitung bewegen sich die piezoelektrische und die Vorbelastungsschicht relativ zueinander und verkleben beim Abkühlen unter zusätzlicher Vorbelastung. Dieses Verfahren zur Herstellung von Bauelementen hat zu einer erheblichen Erhöhung der Lastbewegung von ansonsten identischen piezoelektrischen Bauelementen geführt.

[0028] Ein zylindrischer Biegermodus kann betont werden, indem in nur einer Richtung vorbelastet wird, was dadurch geschehen kann, dass die Schichten während des Erwärmungszyklus über eine zylindrische Formoberfläche gebogen werden. Die Vorbelastungsschicht **14**, die sich unter der piezoelektrischen Schicht **12** befindet, weist beim Abkühlen einen engeren Krümmungsradius auf und belastet in einer Richtung mehr, wodurch der Sieger ausgebildet wird: Diese Zylindermodus-Bieger weisen in der Regel andere Gestalten als kreisförmig auf, wie in Fig. 6 gezeigt.

[0029] Eine Reihe einzelner polygonförmiger piezoelektrischer Bauelemente **28** können zu einem großflächigen Mosaik gruppiert werden, indem ihre entsprechenden Kanten wie in Fig. 7 gezeigt verbunden werden. Ein nützliches Verfahren zur Kantenbefestigung ist die Verwendung einer einzigen verstärkenden Schicht, die das ganze Mosaik bedeckt.

[0030] Bestimmte Anwendungen erfordern möglicherweise eine größere mechanische Lastkraft als die, die von einem einzigen Bauelement **10** bereitgestellt werden kann. Zwei oder mehr Bauelemente **10** können dann in einer effizienten Tandemanordnung verwendet werden, indem ihre kuppelartigen Gestalten in einer Konfiguration wie "gestapelte Löffel" vereinigt werden. Fig. 8 zeigt drei Bauelemente in dieser gestapelten Konfiguration. Um das unbehinderte Biegen der einzelnen Bauelemente während des Betriebs zu ermöglichen, können die Bauelemente aneinander geklebt werden, wobei eine nachgiebige Schicht **30** verwendet wird, wie etwa ein Elastomer, d. h. ein Silikonkautschuk, durch den sich eine Schicht relativ zu der anderen bewegen kann. Bei ei-

nem derartigen Aktorstapel bleiben die einzelnen Bauelemente **10** elektrisch voneinander isoliert: Eines oder mehrere der Bauelemente **10** können als ein Bewegungsrückkopplungssensor wirken.

[0031] Wenn ein Matrixverbundherstellungsverfahren verwendet wird, das gezeigt wird in "Tough, Soluble, Aromatic, Thermoplastic Copolyimides", Seriennummer 08/359,752, eingereicht am 16. Dezember 1994, können große flexible Folien zum Einsatz in Niederfrequenzaktoranwendungen (d. h. das Rauschen unterdrückende Bauelemente oder Lautsprecher) hergestellt werden. Erreicht werden kann dies durch die Verwendung großer flacher Formen für die Konsolidierung oder durch einen kontinuierlichen Walzprozess. Formteile können aneinander geklebt werden, indem sie erwärmt werden, um den Bindemittelkleber zu erweichen und/oder zu härten, während sie zusammengepresst werden.

[0032] Durch das vorliegende Verfahren hergestellte ferroelektrische Bauelemente können in Pumpen, Ventilen, Bremsen, Motoren, Sensoren, Aktoren, Optiken, Schallwandlern und aktiven Strukturen verwendet werden.

[0033] Für den Fachmann ergeben sich viele Verbesserungen, Modifikationen und Additionen, ohne dass er vom Schutzbereich der vorliegenden Erfindung abweicht, wie er hier beschrieben und in den nachfolgenden Ansprüchen definiert wird.

Patentansprüche

1. Elektroaktive Vorrichtung (**10**), die dazu geeignet ist, als Ausgabe mechanische Auslenkungen zu erzeugen, umfassend eine Schichtstruktur mit einer Vorspannschicht (**14**) und einer piezoelektrischen Schicht (**12**), wobei die Vorspannschicht so gespannt ist, dass eine Vorspannung so auf die piezoelektrische Schicht ausgeübt wird, dass die piezoelektrische Schicht komprimiert ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorspannschicht aus einem Klebstoff besteht, der ein Verstärkungsmaterial (**16**) umfassen kann.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die piezoelektrische Schicht (**12**) Oberflächenelektroden einschließt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, weiterhin umfassend:
i. eine Elektrodenschicht (**18b**), die zwischen der Vorspannschicht (**14**) und der piezoelektrischen Schicht (**12**) angeordnet ist, und ii. eine Elektrodenschicht (**18b**), die auf der piezoelektrischen Schicht (**12**) angeordnet ist.

4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei der Klebstoff der Vorspannschicht (**14**) ein Polyimid umfasst.

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die piezoelektrische Schicht (**12**) ein ferroelektrisches Material ist.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die piezoelektrische Schicht (**12**) ein piezorestriktives Material ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Vorspannschicht (**14**) eine konvexe Oberfläche hat und die piezoelektrische Schicht (**12**) eine konkave Oberfläche hat und wobei die konvexe Oberfläche der Vorspannschicht mit der konkaven Oberfläche der piezoelektrischen Schicht verbunden ist.

8. Stapel, umfassend wenigstens zwei Vorrichtungen nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei jede der Vorrichtungen (**10**) elektrisch isoliert ist.

9. Stapel nach Anspruch 8, wobei wenigstens zwei Vorrichtungen unter Verwendung einer nachgiebigen Schicht (**30**) miteinander verbunden sind.

10. Betätigerstapel nach Anspruch 8 oder 9, wobei wenigstens eine der Vorrichtungen (**10**) als Sensor zur Rückmeldung von Bewegungen wirkt.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

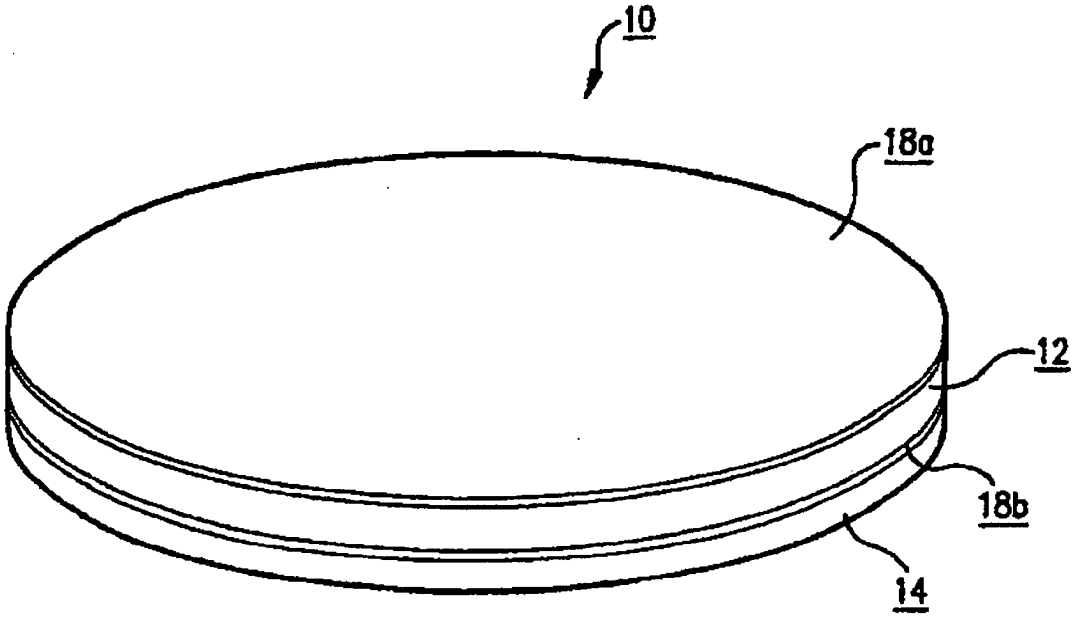


FIG.1



FIG.2

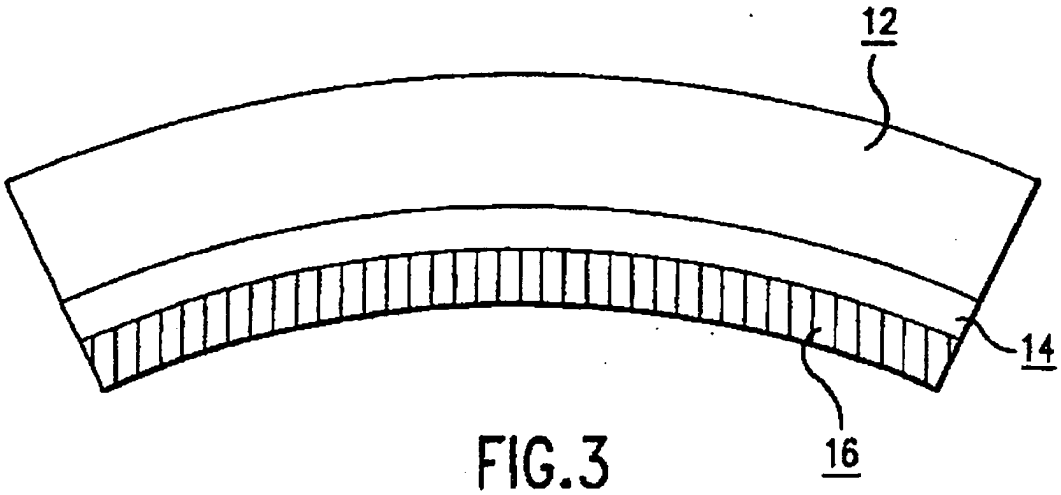


FIG.3

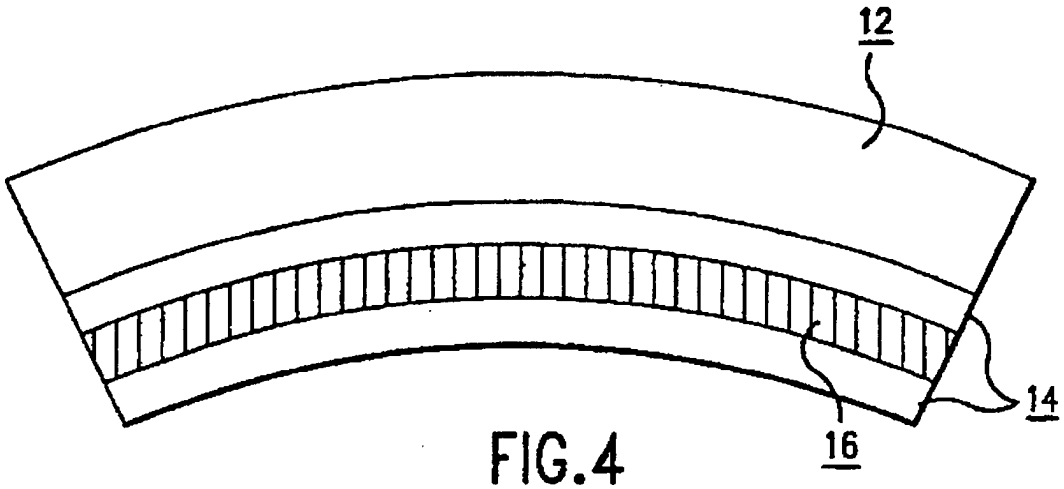


FIG.4

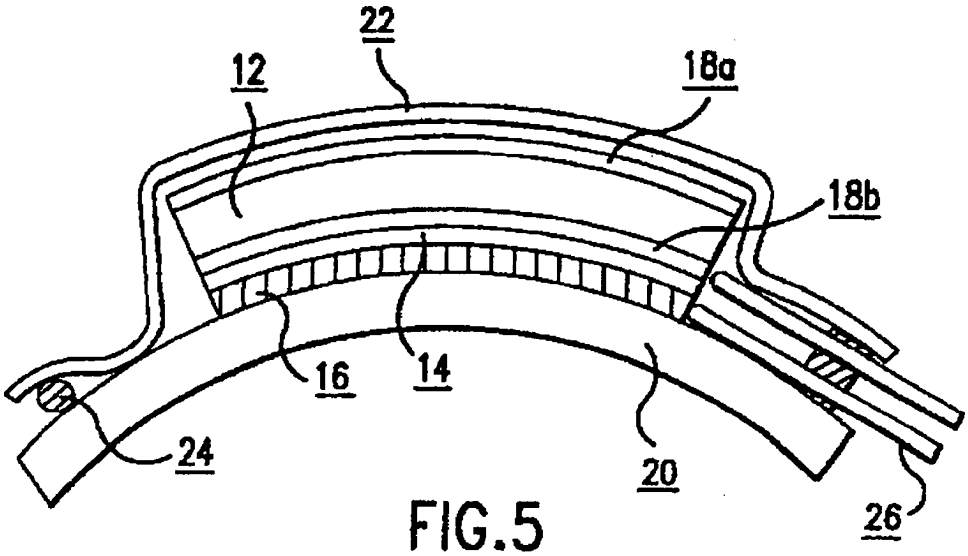


FIG.5

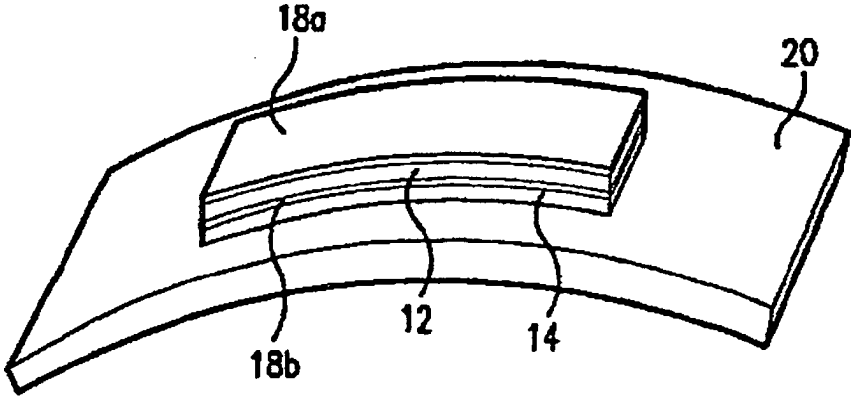


FIG.6

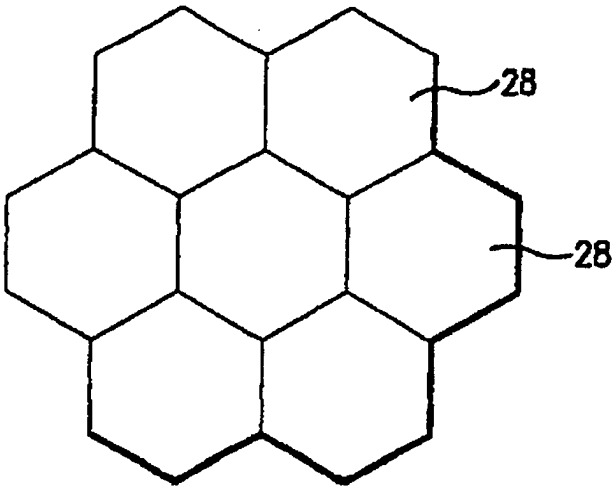


FIG.7

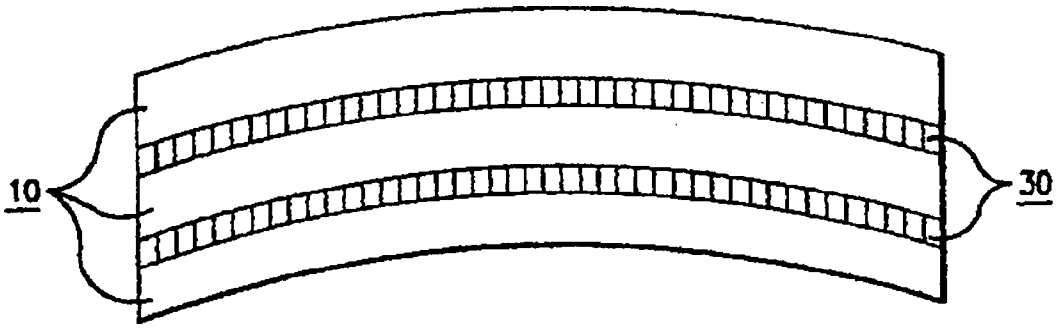


FIG.8