(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) EP 0 741 839 B1

(12) # EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
15.04.1998 Patentblatt 1998/16

(21) Anmeldenummer: **95903302.8**

(22) Anmeldetag: **29.11.1994**

(51) Int Cl.[6]: **F04B 43/06**, F04B 43/04
// F16K7/17

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP94/03954

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 95/20105 (27.07.1995 Gazette 1995/32)

(54) **MIKROMEMBRANPUMPE**

MICRO-DIAPHRAGM PUMP

MICROPOMPE A MEMBRANE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DK FR IT LI NL

(30) Priorität: **25.01.1994 DE 4402119**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
13.11.1996 Patentblatt 1996/46

(73) Patentinhaber: **Forschungszentrum Karlsruhe GmbH**
76133 Karlsruhe (DE)

(72) Erfinder:
- **BÜSTGENS, Burkhard**
  D-76178 Karlsruhe (DE)
- **STERN, Gerhard**
  D-76327 Pfinztal (DE)
- **KELLER, Wolfgang**
  D-76707 Hambrücken (DE)
- **SEIDEL, Dieter**
  D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen (DE)
- **MAAS, Dieter**
  D-68723 Oftersheim (DE)

(74) Vertreter: **Rückert, Friedrich, Dr.**
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Patente und Lizenzen
Weberstrasse 5
76133 Karlsruhe (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
GB-A- 2 088 965
NO-B- 173 755
SE-B- 440 122
US-A- 3 606 592

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).

EP 0 741 839 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Mikromembranpumpe nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, wie sie aus R. Rapp, W. K. Schomburg, P. Bley, "Konzeption, Entwicklung und Realisierung einer Mikromembranpumpe in LIGA-Technik", KfK-Bericht Nr. 5251, (1993) bekannt ist. Diese Pumpe wird von einem externen pneumatischen Aktor angetrieben und ist in der Lage, gasförmige Medien zu fördern. Die Pumpe hat eine Pumpmembrane aus Titan und Ventile, die aus einer Titan- und einer Polyimidmembran bestehen. Die Pumpmembrane kann bis zum Boden der Pumpkammer ausgelenkt werden und besitzt auf diese Weise ein hohes Kompressionsverhältnis. Für die Auslenkung der Pumpenmembrane wird allerdings ein relativ hoher Druck benötigt, der von einem integrierten Aktor nicht erzeugt werden kann. Außerdem müssen zur Fertigung alle Pumpen einzeln verklebt werden, was einen hohen Aufwand erfordert. Die Herstellung dieser Pumpe erfordert viele nacheinander auszuführende Einzelschritte.

Es sind verschiedene weitere Mikromembranpumpen bekannt, so z.B. zwei unterschiedlich angetriebene Pumpen, welche in H.T.G. van Lintel, F.C.M. van de Pol, "A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon", Sensors and Actuators, 15 1988 153-167 und H.T.G. van Lintel, H.T.G. van Lintel, M. Elwenspoek, J. H.J. Fluitman, "A thermopneumatic pump based on micro-engeneering techniques", Sensors and Actuators, A21-A23 1990, 198-202 beschrieben wurden. Die erste Pumpe besitzt eine Pumpmembrane mit aufgeklebter Piezokeramik, die zweite Pumpe besitzt oberhalb der Pumpmembrane einen thermopneumatischen Antrieb in Form eines bei Wärmezufuhr expandierenden Luftvolumens. Beide Pumpen verfügen über integrierte Einlaß- und Auslaßventile.

Eine weitere Mikropumpe ist in Roland Zengerle, Axel Richter, "Mikropumpen als Komponenten für Mikrosysteme", Physik in unserer Zeit /24. Jahrg.1993/ Nr. 2 beschrieben worden, die ebenfalls über integrierte Ventile verfügt und deren Pumpmembrane durch elektrostatische Kräfte ausgelenkt wird.

Die festen und beweglichen Teile der angeführten Mikromembranpumpen, die den derzeitigen Stand der Technik repräsentieren, sind im wesentlichen aus den Grundmaterialien Silizium und Glas gefertigt. Die elastischen Teile der beschriebenen Pumpen, das sind vor allem die Pump- und Ventilmembranen, werden dabei mit unterschiedlichen Ätzverfahren dünngeätzt. Die kleinsten Membrandicken liegen dabei in der Größenordnung von 20 mm. Die Dicke der Membranen und die Materialeigenschaften von Glas bzw. Silizium liefern bei diesen Pumpen die die Pumpleistung im wesentlichen einschränkenden Randbedingungen. Es sind bei relativ großen Membrandurchmessern nur kleine Auslenkungen möglich. Als Folge lassen sich mit derartigen Pumpmembranen nicht die zur Förderung von Gasen erforderlichen Kompressionsverhältnisse erreichen. Ferner müssen die Durchmesser der Ventile sehr groß gewählt werden, um die Flexibilität der Ventilmambranen und damit den Druckverlust in Durchlaßrichtung klein zu halten.

Die US-A-3 606 592 und die GB-A-2 088 965 zeigen zwar die Möglichkeit über ein in der Membran eingebettetes Gitternetz eine erhöhte Temperatur und somit eine Wärmeerzeugung zu ermögliche, ein oder mehrere miteinander verbundene Hohlraumsysteme sind jedoch nicht vorhanden.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Pumpe der e. g. Art so auszugestalten, daß sie mit wenigen Arbeitsgängen bei einer einfachen Bauweise aufgebaut werden kann.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst.

Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der Pumpe.

Ein besonderer Vorteil der Pumpe besteht darin, daß die gleichzeitige, parallele Fertigung vieler Pumpen mit wenigen Herstellungsschritten mit möglichst wenig Aufwand ermöglicht wird. Der möglichst geringe Herstellungsaufwand bezieht sich dabei sowohl auf die Fertigung der Einzelkomponenten der Pumpe wie Pumpgehäuse, Pumpmembrane und Ventile als auch auf die gleichzeitige und exakte Verklebung vieler Mikrokomponenten in einem Schritt. Des weiteren sind durch Ausgestaltung der Membran im Bereich der Aktorkammer die Druckverluste minimiert.

Die Erfindung wird im folgenden anhand eines Beispiels mit Hilfe der Figuren näher erläutert.

Fig. 1 zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine Pumpe und Fig. 2 ein Formwerkzeug zu deren Herstellung.

Die Fig. 3, 4 und 5 zeigen Ventile, wie sie bei der Pumpe verwendet werden.

Die Fig. 6, 7 und 9 bis 12 erläutern die Klebetechnik zur Herstellung der Pumpe und die Fig. 8 zeigt beispielhaft die Herstellung einer Membran mit Heizwendel.

Aufbau der Mikropumpe, Benennung der Komponenten

Die Figur 1 zeigt schematisch den Grundaufbau der Mikropumpe. Eine Polyimid-Membrane 3 mit einer Dikke von 2 mm ist auf ihrer Oberseite mit dem Pumpgehäuse-Oberteil 1 und auf ihrer Unterseite mit dem Pumpgehäuse-Unterteil 2 verklebt. Die Pumpgehäuse enthalten die nichtbeweglichen Funktionskomponenten der Pumpe. Diese sind im Pumpgehäuse-Oberteil 1 die Aktorkammer 17, verschiedene Strömungskanäle 6, die Ventilkammer 8 und der Ventilsitz des Einlaßventils 10, die Ventilkammer des Auslaßventils 13, Fluid-Einlaß 5, Fluid-Auslaß 7, ein zusammenhängendes Hohlraumsystem 19 zur Befüllung mit Klebstoff, sowie Einfüllöffnungen 20 und Austrittsöffnungen für die Befüllung mit Klebstoff. Ferner nicht abgebildet sind Öffnungen für die elektrische Kontaktierung der Pumpe vorhanden. Die Funktionskomponenten sind im Pumpgehäuse-Unterteil die Pumpkammer 16, die Strömungskanäle 6 zwi-

schen Ventilen und Pumpkammer, die Ventilkammer des Einlaßventils 9, der Ventilsitz des Auslaßventils 14, ein Hohlraumsystem 18 zur Befüllung mit Klebstoff, Klebstoffeinlaß 22 und Klebstoffauslaß 23. Die Hohlräume 18,19 für den Befüllvorgang und die Hohlräume 6, 8, 9, 12, 13, 16, 17 sind voneinander durch Stege 24 abgegrenzt, mit deren Hilfe die lateralen Strukturen gebildet und die Strukturhöhe genau definiert werden. Die Polyimid-Membran 3 zeichnet sich durch eine hohe Elastizität aus und bildet im Bereich der Aktorkammer 17 die Pump-Membrane. Im Bereich des Einlaßventils 8, 9, 10 und des Auslaßventils 12,13,14 befindet sich jeweils ein Loch 11 und 15 in der Polyimid-Membran 3. Die Ventilwirkung entsteht dadurch, daß das Loch in der Membran durch den planen Ventilsitz verschlossen wird, sofern ein Überdruck auf der dem Ventilsitz gegenüberliegenden Seite herrscht, bzw. daß die Membran bei umgekehrt anliegendem Überdruck derart vom Ventilsitz abhebt, daß das Loch in der Membran freigegeben wird und ein Durchfluß entsteht. Der Antrieb der Mikromembranpumpe erfolgt durch die thermische Ausdehnung eines Fluids, welches sich in der Aktorkammer 17 befindet und durch eine auf die Polyimidmembran aufgebrachte metallische Heizwendel 4 erwärmt wird.

Die Funktionsweise der Mikropumpe :
Ein kurzer Strompuls wird auf die Heizwendel 4 gegeben. Diese erwärmt sich und gibt Wärme sowohl an das Medium in der Aktorkammer 17 als auch an das Medium in der Pumpkammer ab. Befinden sich in der Aktorkammer 17 und Pumpkammer 16 gasförmige Medien, so lenkt die aus der Erwärmung resultierende
Druckerhöhung des Aktorgases die Pumpmembrane aus. Die Auslenkung der Pumpmembrane 3 verringert das Volumen der Pumpkammer 16 und führt zusammen mit der gleichzeitigen Erwärmung des Pumpgases zu einem Druckanstieg in der Pumpkammer 16. Durch die Verwendung eines flüssigen, bei niedriger Temperatur siedenden Mediums in der Aktorkammer 17 wird die Ausdehnung des Mediums durch dessen Verdampfung erreicht, wodurch sich sehr hohe Aktordrücke erzeugen lassen. Die Folge der Druckerhöhung in der Aktorkammer 17 ist hier wieder die Auslenkung der PumpMembran 3 in Richtung der Pumpkammer 16. In beiden Fällen setzt sich die resultierende Druckerhöhung des zu pumpenden Fluids über die Strömungskanäle zu den Ventilen hin fort und führt dazu, daß sich die Membran im Bereich des Einlaßventils 11 an dessen Ventilsitz 10 anlegt und das Ventil verschließt, während die Membran im Bereich des Auslaßventils 15 vom Ventilsitz 14 abhebt und die Öffnung in der Ventilmembran freigibt. Das Pumpmedium wird ausgeschoben.

Nach dem Ende des Strompulses beginnt die Abkühlung des Mediums in der Aktorkammer 17 durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Im Fall des gasförmigen Mediums in der Aktorkammer verringern sich Druck und Volumen im Innern der Aktorkammer gemäß den Gasgesetzen, im Fall der verdampften Flüssigkeit führt Kondensation wieder zum Ausgangszustand zurück. Die Pumpenmembrane bewegt sich wieder in ihre Ausgangslage zurück und erzeugt so als Folge des zuvor ausgeschobenen Pumpmediums einen Unterdruck in der Pumpkammer 16 und an den Ventilen. Entsprechend der oben beschriebenen Ventilfunktion schließt nun das Auslaßventil, während das Einlaßventil öffnet und Pumpmedium in die Pumpkammer einläßt. Diese Vorgänge wiederholen sich mit jedem Pumpzyklus.

Die direkt auf die Pumpmembrane aufgebrachte Heizwendel hat neben des daraus resultierenden einfachen Herstellungsverfahrens weitere wesentliche Vorteile. Zum einen ist der Wärmeübergang auf das Pumpengehäuse in der Aufheizphase minimiert. Zum zweiten wird bei Verwendung einer niedrig siedenden Flüssigkeit als Aktormedium die Rekondensation des Aktormediums durch das geförderte Medium an der Stelle der Heizwendel eingeleitet. Dadurch wird erreicht, daß am Beginn der nächsten Aufheizphase die Heizwendel in optimalem Wärmekontakt mit der Aktorflüssigkeit steht.

Ventile

Die Figur 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Ventils. Die Ventile sind dadurch gekennzeichnet, daß sie aus einer flexiblen, freigespannten Membrane 3 bestehen, welche im zentralen Bereich eine mikrostrukturierte Öffnung 11 besitzt. Der Umriß der Ventilöffnung 11 und der Membraneinspannung 25 kann, wie in Figur 4 beispielhaft gezeigt, rund, oval oder durch einen Polygonzug beschreibbar sein. Figur 3 erleutert den grundsätzlchen Aufbau eines Ventils, wie es in den hergestellten Pumpen implementiert ist. Auf einer Seite der Membran befindet sich ein ebener, fester Ventilsitz 10, der die Öffnung der Ventilmembrane um mindestens die Breite der erforderlichen Dichtfläche zwischen Membran und Ventilsitz überdeckt. Der Ventilsitz ist Teil eines der beiden Pumpenkörper, die mit der Membran verbunden sind. Die Dichtigkeit der Ventile in Sperrrichtung wird durch das Maß der Überdeckung, die Oberflächenrauhigkeit von Ventilmembran und Ventilsitz und wesentlich durch die Flexibilität der Ventilmembran bestimmt. Durch eine sehr dünne Polyimid-Membran kann auch unter unsauberen Bedingungen die Dichtwirkung beibehalten werden, da sie in der Lage ist, sich um kleine Schmutzpartikel herum anzuschmiegen.

Durch die Höhe der Ventilsitze läßt sich das Öffnungs- und Schließverhalten der Ventile vorgeben, siehe Figur 5. Figur 5a zeigt die Verhältnisse des ausgeführten Beispiels. Membraneinspannung und Ventilsitz befinden sich in einer Ebene. Figur 5b zeigt das Ausführungsbeispiel eines hohen Ventilsitzes, der im lastfreien Zustand die Membrane nach oben wölbt. Hier ist zum Öffnen des Ventils bereits eine erhebliche Druckdifferenz notwendig, das Ventil bleibt bis zum Erreichen dieser Druckdifferenz in Durchlaßrichtung geschlossen. Der Druckabfall bei gegebenem Durchfluß und daduch der Leistungsabfall ist höher als in Figur 5a. Es verringert sich jedoch der Rückfluß bei Lastwechseln durch

das kleinere Schlagvolumen und durch die geringere Nachgiebigkeit der freien, stärker gespannten Membrane. Diese Konfiguration ist dann von Vorteil, wenn kleine Volumenströme unter großen Druckdifferenzen gleichgerichtet werden sollen oder wenn die Lastwechselfrequenzen hoch sind. In Figur 5c erreicht die Höhe des Ventilsitzes nicht die Ebene der Membraneinspannung, die Membran ist im lastfreien Fall auf ihrer ganzen Fläche frei gespannt. Das Ventil besitzt in Durchlaßrichtung einen geringeren Strömungswiderstand als im Fall a, schließt in Sperrrichtung jedoch erst nach Erreichen eines Sperrdruckes. Diese Auslegung von Ventilsitz und Membran ist dann von Vorteil, wenn große Volumenströme unter kleinen Druckdifferenzen gleichgerichtet werden sollen.

Kleben

Werden die Einzelteile oberes Pumpgehäuse, Membrane und unteres Pumpgehäuse in konventioneller Weise verklebt, d. h. wird auf die Einzelteile Kleber mit Techniken wie Dispensen, Siebdruck oder Tampondruck aufgetragen, dann entsteht eine Klebstoffschicht, deren Dicke mit ca. 10 µm bereits mit der Größenordnung der Mikrostrukturen selbst vergleichbar sein kann. Hohe Toleranzen der Klebefugendicke sind dabei nicht zu vermeiden, was vor allem negative Auswirkungen auf die Funktion der Mikroventile hat, da der gewünschte Abstand zwischen Ventilmembrane und Ventilsitz nicht exakt eingehalten werden kann. Ein weiterer Nachteil herkömmlicher Klebetechniken ist die zusätzliche Positionierung der lateralen Verteilung des Klebstoffs zu den Mikrostrukturen, da verschiedene Bereiche, so z. B. die Ventilsitze und Kanalstrukturen, nicht mit Klebstoff benetzt werden dürfen. Ist schließlich der Klebstoff aufgebracht, dann stellt die exakte Positionierung der Klebepartner zueinander und das anschließende verschmierungsfreie Zusammenfügen sehr hohe Anforderungen an die Handhabung der Proben. Es sind also zwei positionierte Arbeitsgänge notwendig.

Die in Anspruch 5 genannte Klebetechnik übergeht all diese Nachteile und ist durch ihre Einfachheit und durch die geringe Anzahl der Arbeitsschritte für die parallele Verklebung von Mikrostrukturen hervorragend geeignet. Dabei werden bereits im Design der Mikrostrukturen die Voraussetzungen für das erfolgreiche Verkleben geschaffen. Der Grundgedanke ist, daß sich auf einem Substrat, welches eine große Anzahl von Mikrostrukturen enthalten kann, konkave Strukturen um die Mikrostrukturen herum befinden, die zusammenhängend oder teilzusammenhängend sein können und von den funktionellen Bereichen der Mikrostrukturen durch Stege konstanter Höhe getrennt sind. Die konkaven Strukturen haben die Aufgabe, im eigentlichen Klebeschritt den Klebstoff aufzunehmen, so daß sich nach der Verklebung der Klebstoff, durch die Stege getrennt, rund um die Mikrostrukturen herum befindet. Der Klebstoff übernimmt die Funktion der mechanischen Verknüpfung der Fügepartner,der Abdichtung einzelner Mikrostrukturen und der Fügepartner untereinander und trägt durch innere Relaxationsvorgänge zum Abbau von Eigenspannungen, die z. B. durch Temperaturwechsel zwischen den Klebepartnern entstehen, bei. Die Stege haben die Aufgabe, durch ihre Höhe eine exakt reproduzierbare Referenzhöhe für die Einstellung der Klebefugendicke vorzugeben und ein Hineinfließen des Klebstoffs in die Mikrostrukturen während des Klebevorgangs zu vermeiden.

Figur 6 erläutert die Verhältnisse anhand einer Aufsicht des Gehäuseunterteils der Mikropumpen, wie sie hergestellt wurden. Dabei bedeuten 18 die konkave Struktur, in die Klebstoff eingefüllt wird, 24 die Stege, die den Klebebereich abgrenzen, 16, 9, 6, 14 sind die Funktionsbereiche Pumpkammer, Ventilkammer, Strömungskanäle der Pumpe und Ventilsitz, die frei von Klebstoff bleiben müssen. 22 ist die Öffnung, in die der Klebstoff einfließt und 23 ist die Öffnung, aus der überschüssiger Klebstoff wieder austreten kann oder in eine weitere Mikrostruktur eintreten kann.

Figur 12 zeigt als Detail den Querschnitt durch eine konkave Struktur zur Aufnahme des Klebstoffs zischen zwei Mikrostrukturen. Es bedeuten 24 die Stege, die den Klebstoffbereich von den eigentlichen Mikrostrukturen abgrenzen, 26 und 31 sind die lokal beteiligten Klebepartner. Figur 12a zeigt den Fall, daß die Klebeschichtdicke der Höhe der Stege (=Referenzhöhe) entspricht. In Figur 12b ist die konkave Struktur zur Aufnahme des Klebstoffs in Bereiche großer Strukturhöhe 36, welche vornehmlich der Klebstoffbeschickung dienen, und in Bereiche niedriger Strukturhöhe, welche eine an den Klebstoff angepaßte exakte Einstellung der tatsächlichen Klebstoffdicke erlaubt.

Der Klebevorgang beginnt mit der Justierung der Klebepartner zueinander (Figur 7a) und dem anschließenden Fixieren der Fügepartner durch eine Verspannvorrichtung (Figur 7b). Die Verspannung sorgt dafür, daß die Stege 24 des einen Fügepartners auf den zweiten Fügepartner gepreßt werden, wodurch ein enger Kontakt gewährleistet ist. Dieser enge Kontakt ermöglicht die exakte Einhaltung des gewünschten Strukturabstandes der beiden Fügepartner und bietet eine hinreichende Abdichtung während des eigentlichen Klebeprozesses. Der Vorgang des Justierens und Verspannens geschieht ohne die Anwesenheit von Klebstoff, was den Vorteil hat, daß sich die Probleme das Klebstoff-Handling nicht negativ auf die Präzision der Verklebung auswirken können. Im eigentlichen Klebe-Schritt (Figur 7c) wird der Klebstoff in die durch das Zusammenfügen entstanden Hohlstrukturen eingefüllt. Dabei können entweder Mikrostrukturen, welche einen Kleberein- 20 und -auslaß 21 besitzen, einzeln befüllt werden (siehe Figur 6), oder eine große Anzahl von Mikrostrukturen, die über entsprechend vorbereitete Hohlräume verfügen, über ein Kanalsystem befüllt werden (siehe Figur 9), oder es kann eine Anzahl von Mikrostrukturen über ein komplettes Hohlraumsystem befüllt

werden (siehe Figur 10). Der Ablauf des Befüllvorgangs hängt von den fluid-dynamischen Eigenschaften des verwendeten Klebstoffs ab. Zur Steuerung der Befüllung kann der Klebstoff über eine Kanüle, die dicht auf den Klebereinlaß aufgesetzt wird, zugeführt werden. Je nach Viskosität und Benetzungsfähigkeit des Klebstoffs, sowie der gewünschten Einfließgeschwindigkeit, wird der Klebstoff mit Überdruck in die Mikrostrukturen gefördert, bis er an der Austrittsöffnung austritt. Klebstoff-Fluß und -Verteilung werden dabei durch die Geometrie des Hohlraumsystems gesteuert. Eine weitere Steuerung des Fließprozesses läßt sich erreichen, indem Austrittsöffnungen 21 mit Unterdruck beaufschlagt werden. Dies kann vor allem dann notwendig sein, wenn bei der Konstruktion komplexer Kanalsysteme die fluiddynamischen Voraussetzungen für ein gleichmäßiges Befüllen nicht hinreichend genau berücksichtigt werden konnten. Nach dem Befüllen wird die Aushärtung des Klebstoffs nach dessen Spezifikation vorgenommen.

Geeignet für diese Technologie sind alle Klebstoffe zufriedenstellender Adhäsion, die sich in die Mikrokanäle und Mikrohohlräume mit vertretbaren Drücken hineinbefördern lassen. Eine besondere Bedeutung kommt der Oberflächenspannung des Klebstoffes und dem daraus resultierenden Kapillarverhalten im Zusammenspiel mit den Fügepartnern zu. Hochbenetzende Klebstoffe haben die Eigenschaft, in kleinste Spalten einzudringen. Dies kann dazu führen, daß Klebstoff, der wie beschrieben in die Klebeteile eingeführt wird, durch Rauhigkeiten im Nanometer-Bereich unter die auf den Klebepartner gepreßten Stege kriecht, was u. U. für die Funktion des Mikrobauteils unerwünscht sein kann. Im allgemeinen führt dieser Effekt nicht zu einer Störung der Funktion des Mikrobauteils, sofern der Klebstoff nicht über die Kante der Stege, die den Klebehohlräumen abgewandt sind, hinüberfließt und die Mikrostrukturen benetzt, die frei von Klebstoff bleiben sollen. Soll ein Hineinfließen des Klebstoffs unter die Stege vollständig unterbunden werden, so läßt sich der Klebeprozeß durch einen nicht-justierten Zwischenschritt erweitern, der für eine vollständige Abdichtung unterhalb der Stege sorgt. Dazu werden die Mikrostrukturen, die die Stege enthalten, im Stempelverfahren mit einer hochviskosen, chemisch stabilen Schicht, welche auf einem ebenen Substrat mit konstanter Dicke aufgetragen wurde, in Kontakt gebracht. Es kann sich hier z. B. um ein Industriefett handeln, welches sich nach der Verklebung mit einem Lösungsmittel wieder rückstandsfrei herausspülen läßt. Werden die Stege nun auf den Klebepartner aufgepreßt (siehe Figur 7b), so dichtet die in der Größenordnung der Oberflächen-Rauhigkeit aufgebrachte Schicht die Klebe-Hohlräume vollständig von den Kleber-freien Funktionsbereichen ab. Ein Eindringen des Klebers als Folge der Kapillarwirkung findet nicht mehr statt.

Es ist ferner die Verwendung von Schmelzklebern denkbar, sofern dessen Verarbeitungstemperatur die Fügepartner nicht zerstört oder beeinträchtigt. Hier müssen die Klebepartner vor dem Befüllvorgang auf die Verarbeitungstemperatur des Klebstoffs gebracht werden.

Es ist auch möglich, daß mehr als zwei Klebepartner an einer Verklebung beteiligt sind. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn wie in Figur 11 an einem Beispiel gezeigt, eine Hilfsstruktur 32 verwendet wird, um eine erste Struktur 28, 26 mit einer zweiten Struktur 31 zu verkleben. Die Hilfsstruktur 32 sorgt für eine Trennung der Bereiche, die Klebstoff enthalten sollen von den Bereichen, die frei von Klebstoff bleiben müssen und sorgt für die exakte Einhaltung eines gewünschten Abstandes zwischen den Klebepartnern. Sie kann aus einem oder mehreren Teilen bestehen, sie kann diskret eingelegt werden oder sie kann auf einem der Klebepartner aufgebaut worden sein.

Anhand eines Ausführungsbeispiels wird die Herstellung der Einzelkomponenten der Mikropumpe beschrieben:

Jede der drei Einzelkomponenten Pumpgehäuse-Oberteil 1, Pump-membrane 3 mit aufgebrachter Metallstruktur 4, Pumpgehäuse-Unterteil 2 in Figur 1 der Mikropumpe wurde unabhängig hergestellt. Die Einzelkomponenten können somit vor dem Zusammensetzen geprüft werden.

Körper, Formeinsatz, Arbeitsablauf

Oberer 1 und unterer Pumpkörper 2 wurden mit Hilfe eines mikrostrukturierten Abformwerkzeuges durch Methoden der Kunststoffverarbeitung Spritzgießen und Vakuumprägen hergestellt. Die Figur 2 veranschaulicht beispielhaft die Struktur eines Abformwerkzeuges für das Gehäuse-Oberteil von Figur 1. Ein für den Einsatz in die Kunststoff-Abformapparatur vorbereitetes, an der Abformfläche geschliffenes und poliertes Halbzeug aus Messing wurde mit Hilfe eines Hartmetall-Mikrofräsers (Durchmesser: 300 µm) strukturiert. Es sind sowohl die Strukturen für die Ventilsitze nach Anspruch 2 enthalten, als auch die Strukturen zur Separierung des Klebstoffbereichs vom Funktionsbereich der Mikropumpe nach Anspruch 1. Die Formeinsätze konnten dadurch, daß die Pumpengehäuse nur aus Stegen konstanter Breite (=Fräserbreite) und wenigen Ventilsitzen bestehen mit geringer Maschinenzeit in Form von Nuten einfacher Geometrie gefräst werden. Auf einem ersten Abformwerkzeug befanden sich die Strukturen für zwölf Pumpen-Oberteile 1, auf einem zweiten Formeinsatz die Strukturen für zwölf Pumpen-Unterteile

Zur Herstellung der Kunststoff-Pumpenkörper wurden die Parameter sowohl der Vakuum-Prägevorrichtung als auch der Spritzgießmaschine so gewählt, daß die Gesamtstärke der abgeformten Teile 1mm betrug. Als Materialien wurden die Kunststoffe Polysulfon (PSU) (in der Spritzgießmaschine) und Polyvenyldiflourid (PVDF) (in der Vakuum-Prägemaschine) verwendet. Die genannten Materialien zeichnen sich durch hohe chemische Beständigkeit, optische Transparenz und

Temperaturfestigkeit aus. Eine für den Pumpbetrieb ungünstige Materialeigenschaft aller Kunststoffe ist deren im Vergleich zu Metallen und Halbleitern geringe Wärmeleitfähigkeit. Die Konsequenz der Verwendung von Kunststoff-Pumpgehäusen ist, daß die beim Betrieb der Pumpe abgeführte Wärmeleistung in Relation zu Pumpgehäusen aus Metall gleicher Dicke klein ist und die Pumpe als Folge nur mit kleiner Leistung betrieben werden darf, um eine Überhitzung zu vermeiden. Der Nachteil kann übergangen werden, indem die Gesamtdicke der Pumpgehäuse sehr klein gewählt wird und ein intensiver Wärmekontakt zu einem Grundsubstrat hoher Wärmeleitfähigkeit evtl. Kühlkörper hergestellt wird. Eine Verringerung der Schichtdicke kann durch die Wahl der Abformparameter, durch eine Nachbearbeitung mit Hilfe einer Ultrafräse oder durch einen Plasma-Ätzschritt vorgenommen werden. Die Bohrungen für Fluideingang und -ausgang (5, 7 in Figur 1), Klebstoff-Zuführung und Entlüftung (20, 21, 22, 23 in Figur 1), sowie die Löcher zur elektrischen Durchkontaktierung wurden noch nicht im Design der Formeinsätze berücksichtigt, sondern nachträglich mit Spiralbohrern der Durchmesser 0.45 mm und 0.65 mm gebohrt.

Herstellungsablauf PI, Ti

Kernstück der Mikropumpe ist eine Polyimid-Folie mit direkt aufgebrachter Heizwendel. Die Polyimid-Folie, die für eine große Anzahl von Einzelpumpen mit einer einzigen Maske lithographisch strukturiert wird, übernimmt sowohl die Aufgabe der einzelnen Pump-Membranen als auch der Ventil-Membranen. Auf die Polyimid-Folie wurde mit Verfahren der Dünnschichttechnik eine elektrisch leitende Schicht aufgebracht, die im Bereich der einzelnen Pumpmembranen zu Heizwendeln strukturiert wurde. Die Kontaktflächen für den elektrischen Anschluß der Heizwendeln lagen dabei jeweils außerhalb der Pumpmembrane. Der Herstellungsprozess der strukturierten Polyimid-Folie und der Heizwendeln soll nun am Beispiel der hergestellten Pumpen näher erleutert werden (siehe Figur 8). Als Trägersubstrat für die Dünnfilm-Prozesse wurde eine Siliziumscheibe Wafer mit einem Durchmesser von 100mm verwendet. Da die Folie nach der ersten Verklebung vom Wafer getrennt werden muß, wurde eine dünne Gold-Trennschicht 27 auf den Wafer aufgesputtert Figur 8a. Ein Rand 33 von 5 mm wurde dabei während des Sputterprozesses rund um den Wafer herum abgedeckt, um dort die Haftung des Polyimid zum Silizium-Substrat beizubehalten und dadurch ein vorzeitiges Ablösen der Polyimid-Folie vom Wafer zu verhindern. Anschießend (Figur 8b) wurde eine Polyimid-Schicht 28 des fotostrukturierbaren Polyimides Probimide 408 von CIBA-GEIGY mit einer Lackschleuder auf eine Dicke von 3 µm aufgeschleudert und in einem Temperschritt getrocknet. Die getrocknete Lackschicht wurde anschließend im Kontaktverfahren mit UV-Licht 34 belichtet. Da das verwendete Polyimid ein Negativlack ist, sorgte die dazu verwendete Chrom-Maske 29 für eine Belichtung der Bereiche, in denen eine Polyimid-Folie erhalten bleiben sollte, und für eine Abdeckung der Bereiche, die bei der Entwicklung herausgelöst werden sollten. Letztere sind die Löcher der Ventile 15 und verschiedene Justiermarken. Es folgte die Entwicklung des Polyimides und ein Postbake im Vakuumofen Figur 8c.

Nach der Strukturierung des Polyimids wurde eine Titan-Schicht 30 durch Magnetronzerstäubung in einer Dicke von 2 µm aufgebracht., um daraus Heizwendeln 15 zu strukturieren, die eine gute Haftung zum Polyimid besitzen. Die Titan-Schicht 30 wurde lithographisch durch den Positivlack AZ4210 und durch einen anschließenden Ätzprozeß in einer flußsäurehaltigen Lösung strukturiert. Die Belichtung des verwendeteten Photolacks wurde dabei justiert anhand der Justiermarken in der Polyimid-Schicht und anhand von Justiermarken auf der Maske zur Strukturierung der Titan-Schicht vorgenommen. Figur 8e zeigt den auf dem Hilfssubstrat befindlichen fertigen Membranaufbau.

Bei der Herstellung der Titanschicht wurden die Sputterparameter (Temperatur, Biasspannung, Gasfluß und die das Plasma erzeugende elektrische Leistung) so eingestellt, daß sich eine innnere Zugspannung im Titan ausbildete. Die Heizwendeln standen deshalb nach der Titanschicht ebenfalls unter Zugspannung. Nach der Ablösung des Verbundes von Heizwendeln 4 und Polyimidmembran 3 von der Siliziumscheibe 26 zog sich das Titan, welches einen sehr viel höheren Elastizitätsmodul als Polyimid hat, mitsamt der Polyimid-Folie zusammen. Die Polyimid-Folie wurde dabei gestaucht. Durch die Formgebung der aufgebrachten Heizwendeln wurde erreicht, daß die Pumpenmembran nicht nur zugspannungsfrei war, sondern schlaff durchhing. Für die Auslenkung einer solchen schlaffen Pumpenmembran braucht fast keine Energie aufgewendet zu werden. Gestaltet man die Heizwendel als Doppelspirale, so führt die Spannungreduzierung der Heizspirale nach dem Loslösen vom Substrat zur Reduzierung ihrer Länge, was nach geometrischen Gesetzen dazu führt, daß die innnen gelegenen Bereiche der Polyimid-Membrane eine im Verhältnis zu den elastischen Materialdehnungen große radiale Verschiebung zum Zentrum hin erfahren. Diese Verschiebung führt zur Wölbung der Membrane. Eine Wölbung einer Membrane läßt sich auch erreichen, indem beliebige andere Strukturen tangentialer Orientierung um die Membran herum oder in der Membran angebracht sind. Bei den Strukturen kann es sich um geschlossene oder unterbrochene Kreise, um geschlossene oder unterbrochene Polygonzüge oder spiralförmig angeordnete geschlossene oder unterbrochene Polygonzüge handeln.

Die direkt auf die Heizwendel aufgebrachte Heizwendel hat zwei wesentliche Vorteile. Zum einen ist der Wärmeübergang auf das Pumpengehäuse in der Aufheizphase minimiert. Zum zweiten wird bei Verwendung einer niedrig siedenden Flüssigkeit als Aktormedium die Rekondensation des Aktormediums durch das

geförderte Medium an der Stelle der Heizwendel eingeleitet. Dadurch wird erreicht, daß am Beginn der nächsten Aufheizphase die Heizwendel in optimalem Wärmekontakt mit der Aktorflüssigkeit steht.

Anstelle von Polyimid als Membranmaterial können auch andere Kunststoffe oder Metalle verwendet werden, wobei bei Metallmembranen eine zusätzliche elektrisch isolierende Schicht zwischen Membrane und Heizwendel vorzusehen ist.

Zusammenbau der Mikropumpen

Die so fertiggestellten Einzelkomponenten Pumpgehäuseoberteil, Pumpgehäuseunterteil und Polyimid-Membrane mit Titan-Heizwendeln konnten auf Fehler untersucht werden und standen nun zur Verklebung bereit. Die drei Einzelkomponenten wurden durch zwei Klebevorgänge (Figur 7) der beschriebenen Art miteinander verklebt. Dazu wurde eine einfache Vorrichtung 35 geschaffen, in die die Klebepartner eingelegt, zueinander justiert und anschießend gegeneinander verspannt wurden. Im ersten Klebevorgang wurde die auf dem Silizium-Substrat 26 befindliche Polyimid-Folie mit dem Pumpgehäuse-Oberteil 1, welches u.a. die Aktorkammer und sämtliche Pumpen-Anschlüsse enthält, verklebt (Figur 7a-c). Um noch eine weitere Spannungsreduzierung in den freien Membranbereichen der Mikropumpen zu erhalten, wurden Justierung, Verspannung und Klebstoff-Befüllung bei etwa 100° C vorgenommen. Da die Pumpengehäuse aus PSU bzw. PVDF einen sehr viel höheren Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten als das Silizium-Substrat haben, wurden schon die lateralen Abmessungen der Klebepartner so aufeinander abgestimmt, daß sie erst nach einer gemeinsamen Erwärmung auf 100° C vollkommen paßgenau sind. Bei Raumtemperatur sind die Struktur-Abmessungen der Membrane und der Heizwendeln auf dem Substrat 26 größer als die korrespondierenden Abmessungen der Pumpengehäuse. Kühlen die Klebepartner nach erfolgter Verkebung wieder auf Raumtemperatur ab, dann sorgt die Kontraktion der Kunststoff- Pumpgehäuse für eine Stauchung der Membranen.

Nach einer vollständigen Aushärtung der Verklebung bei 150 °C wurden der Wafer mit dem zusammenhängenden, aufgeklebten Pumpengehäuseoberteil 1 der Verspannvorrichung 35 entnommen und die Polyimid-Folie rund um das rechteckige Kunststoffteil eingeschnitten. Mit fortschreitendender Abkühlung löste sich die Polyimid-Folie vom eingeschnittenen Rand beginnend und unterstützt durch die abkühlungsbedingte Kontraktion des Kunststoffteils 1 selbständig von der Siliziumscheibe (Figur 7d).

Im zweiten Klebeschritt wurde schließlich noch in gleicher Weise das Pumpgehäuse-Unterteil 2 mit der Membran-Seite verklebt (Figur 7e und 7f). Um die Pumpen in Betrieb zu nehmen, wurden die notwendigen elektrischen und fluidischen Anschlüsse angebracht und die Pumpen vereinzelt.

Die Pumpen wurden mit einer elektrischen Spannung von 15 V und einer Frequenz von 3 Hz betrieben. Die Spannung wurde für jeweils 58 ms angelegt. Die durchschnittlich zugeführte Leistung betrug 0.27 W. Es wurde eine Förderrate für Luft von 26 ml/min gemessen. Deutlich konnte dabei die Auslenkung der Pumpmembran 3 bis an den Boden der Pumpkammer 16 mit dem bloßen Auge erkannt werden und das mit der Bewegung der Pumpmembrane synchronisierte Öffnen und Schließen der Ventilmembranen im Mikroskop beobeachtet werden.

Patentansprüche

1. Mikromenßbranpumpe bestehend aus einem Pumpgehäuse-Oberteil, einem Pumpgehäuse-Unterteil, zwischen diesen beiden Teilen angeordneten Membranen, welche zusammen eine Pumpkammer, zwei Ventile und Strömungskanäle bilden, wobei die Membrane im Bereich einer Pumpkammer eine Pumpmembran bildet und Membranen im Bereich der Ventile jeweils einen Teil der Ventilfunktion übernehmen und einem Antrieb für die Pumpmembran, gekennzeichnet durch ein Heizelement (4), welches mit der Pumpmembran (3) verbunden ist und durch ein oder mehrere miteinander verbundene Grabensysteme in jedem der Pumpgehäuseteile (1, 2), welche zur Membrane hin offen sind und welche vollständig mit einem Klebstoff gefüllt sind.

2. Mikromembranpumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Heizelement (4) eine elektrisch beheizbare Heizwendel ist.

3. Mikromembranpumpe nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpenmembran und die Ventilmembranen Teile einer einzigen zusammenhängenden Struktur sind.

4. Mikromembranpumpe nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Ventile aus Ventilsitzen (10, 14), welche in die beiden Pumpgehäuseteile (1, 2) hineinstrukturiert sind und aus Löchern (11, 15) in der Membrane gebildet werden.

5. Verfahren zur Herstellung von Mikromembranpumpen nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die beiden Pumpgehäuseteile jeweils ein oder mehrere miteinander verbundene Grabensysteme aufweisen, welche zur Membrane hin offen sind, mit folgenden Verfahrensschritten:

   a) Justieren eines oder beider Pumpgehäuseteile (1, 2) und der Membrane (3) und Zusammenpressen der justierten Teile derart, daß aus den Grabensystemen und der Membrane zu-

sammenhängende, in sich dichte Hohlraumsysteme entstehen und
b) vollständiges Befüllen der Hohlraumsysteme mit einem Klebstoff.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Pumpen gleichzeitig hergestellt werden.

Claims

1. Micromembrame pump consisting of the upper and the lower part of the pump housing with membranes being arranged between both parts, thus making up a pump chamber, two valves and flow channels, with the membrane in the range of the pump chamber acting as a pumping membrane and the membranes in the range of the valves taking over part of the valve function, as well as of the driving unit for the pump membrane, characterized by a heating element (4) connected to the pump membrane (3) and by one or several connected trench systems in each part of the pump housing (1, 2) which are open towards the membrane and completely filled with a bonding material.

2. Micromembrane pump according to claim 1, characterized by the heating element (4) being an electrically heatable heating spiral.

3. Micromembrane pump according to claim 1 or 2, characterized by the pump membrane and the valve membranes being parts of a single complex structure.

4. Micromembrane pump according to one of the claims 1 to 3, characterized by the valves consisting of valve seats (10, 14) which are structured into both parts of the pump housing (1, 2) and of holes (11, 15) in the membrane.

5. Process for the production of micromembrane pumps according to one of the claims 1 to 4, characterized by both parts of the pump housing accommodating one or several connected trench systems which are open towards the membrane, including the following process steps:

   a) Adjusting of one or both parts of the pump housing (1, 2) and the membrane (3) and pressing of the adjusted parts together such that the trench systems and the membranes form complex, tight cavity systems, and
   b) complete filling of the cavity systems with a bonding material.

6. Process according to claim 5, characterized by several pumps being produced simultaneously.

Revendications

1. Micropompe à membrane se composant d'une partie supérieure du corps de pompe, d'une partie inférieure du corps de pompe, entre ces deux pièces, qui ensemble forment une chambre de pompe, deux soupapes et des canaux d'écoulement, tandis que la membrane dans la zone d'une chambre de pompe constitue une membrane de pompe et des membranes dans la zone des soupapes assurent respectivement une partie de la fonction de soupape et une commande pour la membrane de pompe, caractérisée par
un élément chauffant (4), qui est relié à la membrane de la pompe (3) et par un ou plusieurs systèmes de rigoles reliés ensemble dans chacune des parties du corps de pompe (1, 2), qui sont ouvertes en direction de la membrane et qui sont remplies complètement d'une colle.

2. Micropompe à membrane selon la revendication 1, caractérisée en ce que
l'élément chauffant (4) est un filament en spirale chauffable électriquement.

3. Micropompe à membrane selon les revendications 1 ou 2,
caractérisée en ce que
la membrane de la pompe et les membranes de soupape sont des parties d'une structure unique continue.

4. Micropompe à membrane selon une des revendications 1 à 3,
caractérisé en ce que
les soupapes sont formées de sièges de soupape (10, 14), qui sont structurés à l'intérieur des deux pièces de corps de pompe (1, 2) et d'ouvertures (11, 15) dans la membrane.

5. Procédé de fabrication de micropompes à membrane selon une des revendications 1 à 4,
dans lequel
les deux pièces de corps de pompe comportent respectivement un ou plusieurs systèmes de rigoles reliées ensemble, qui sont ouvertes en direction de la membrane, avec des étapes de procédé suivantes :

   a) ajustage d'une ou des deux pièces de corps de pompe (1, 2) et de la membrane (3) et serrage entre elles des pièces ajustées, de manière, que prennent naissance à partir des systèmes de rigoles et de la membrane des systèmes d'espaces creux continus, étanches en

soi,
b) remplissage complet des systèmes d'espaces creux avec une colle.

6. Procédé selon la revendication 5,
caractérisé en ce que
plusieurs pompes sont fabriqués en même temps.

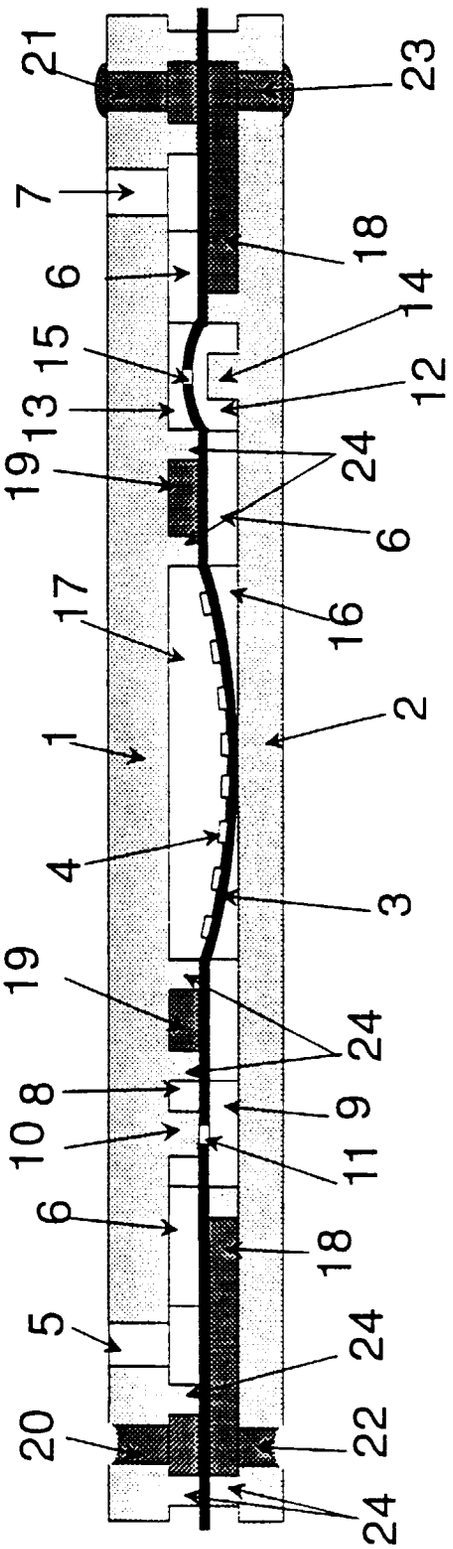

21
23
7
18
6
14
15
12
13
19
24
6
17
16
2
1
4
3
19
24
8
9
10
11
6
18
5
24
20
22
24

Fig. 1

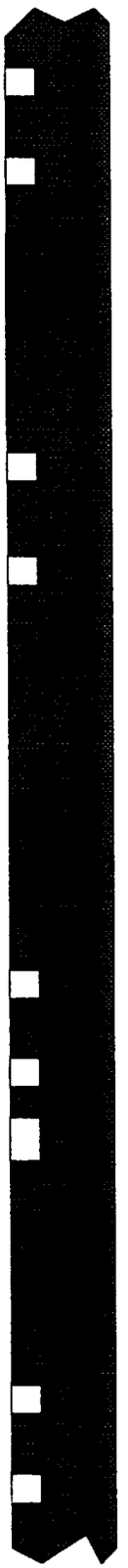


Fig. 2

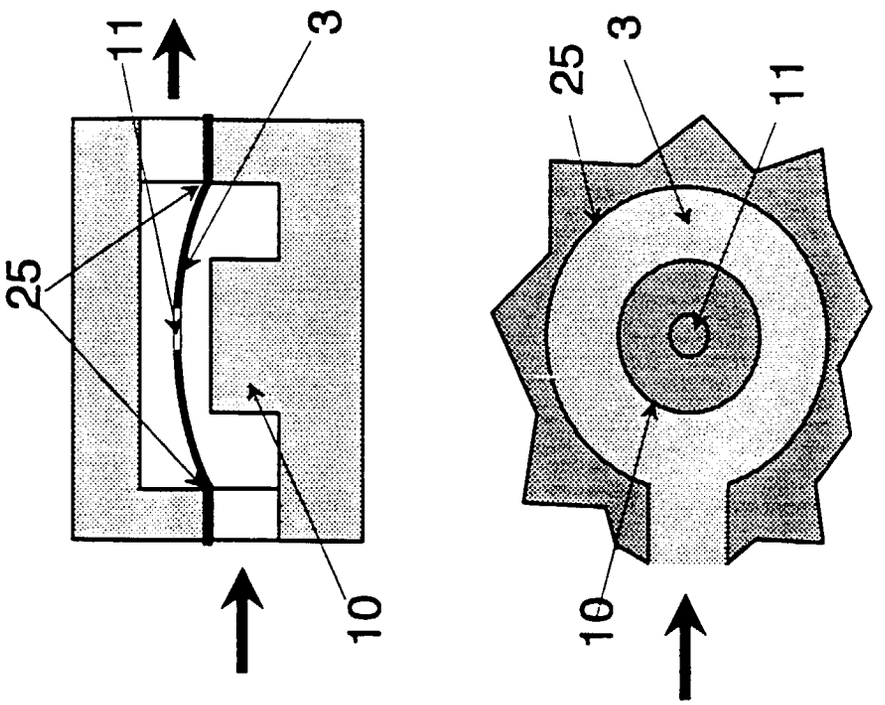


Fig. 3

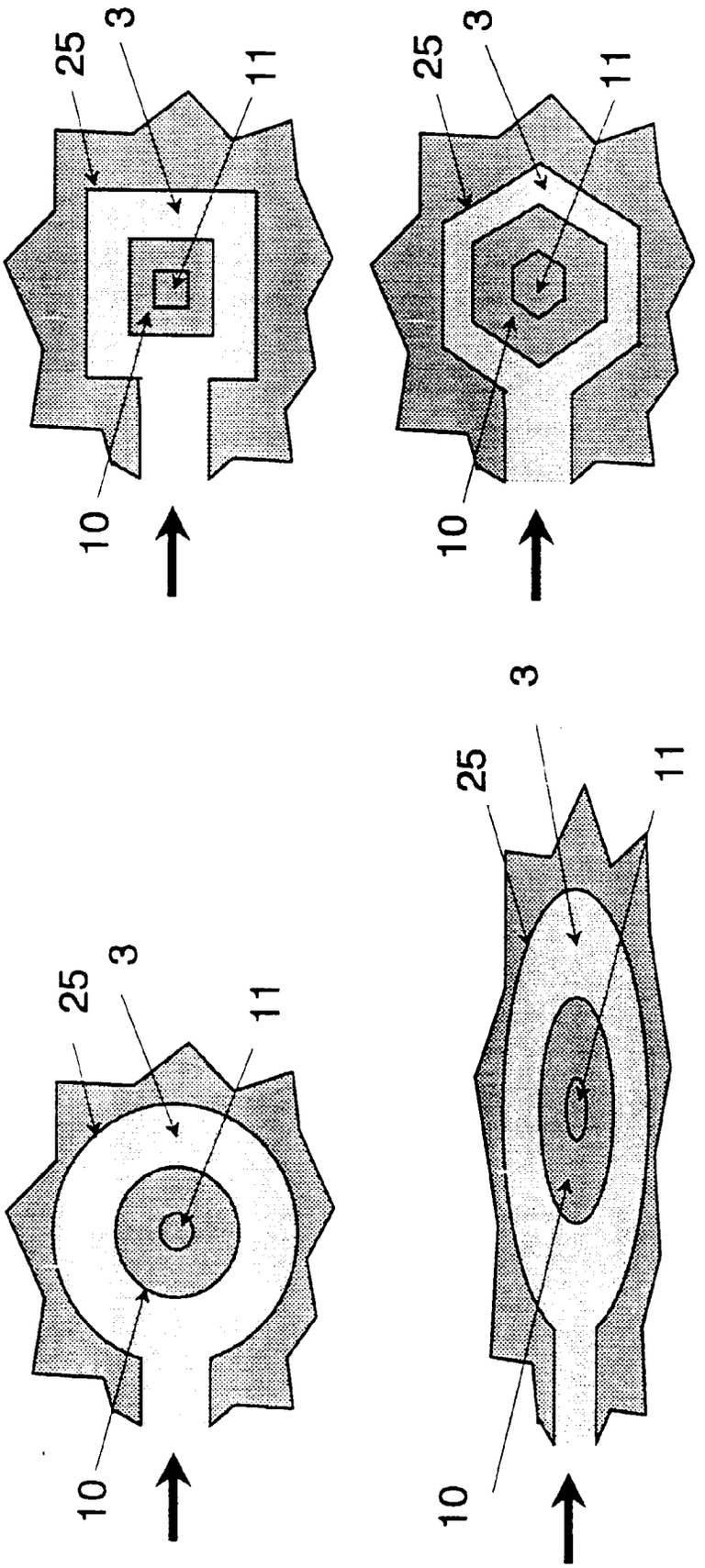


Fig. 4

Fig. 5a

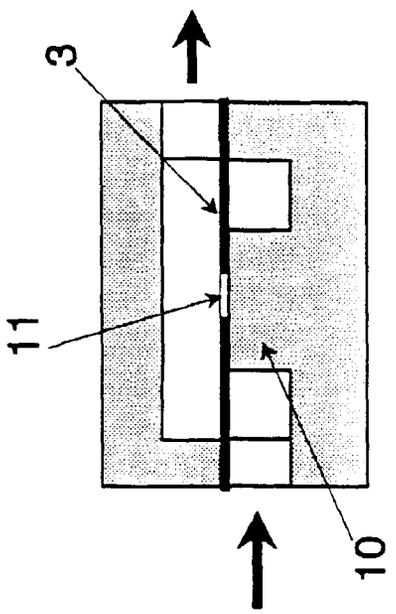


Fig. 5b

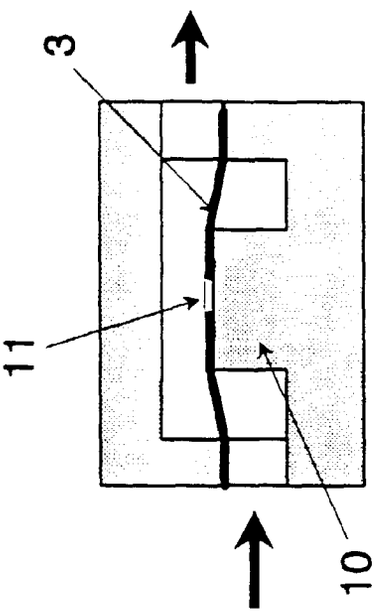
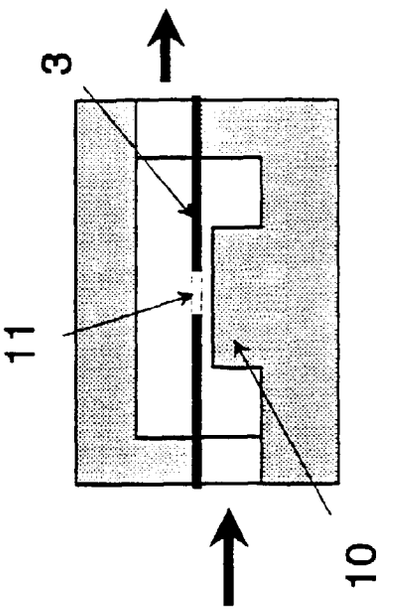


Fig. 5c



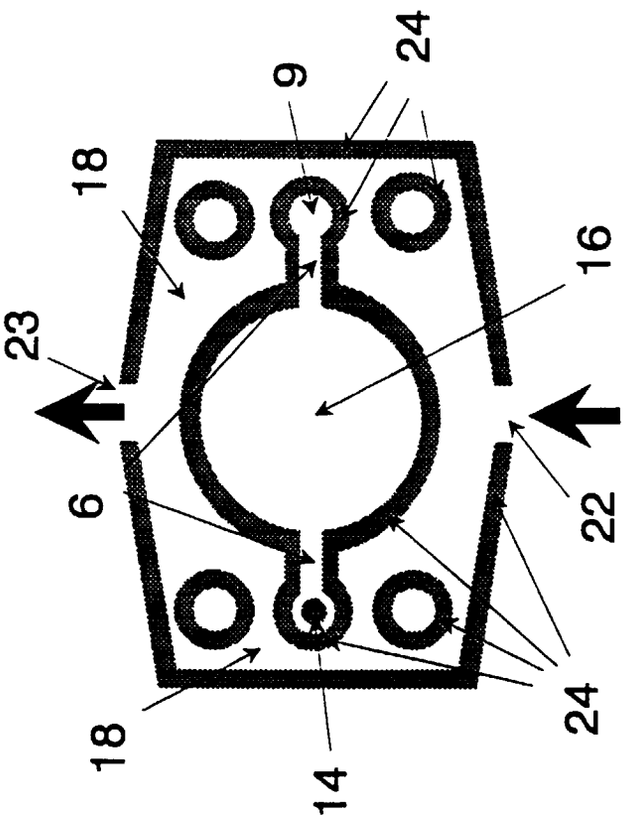


Fig.6

Fig. 7a

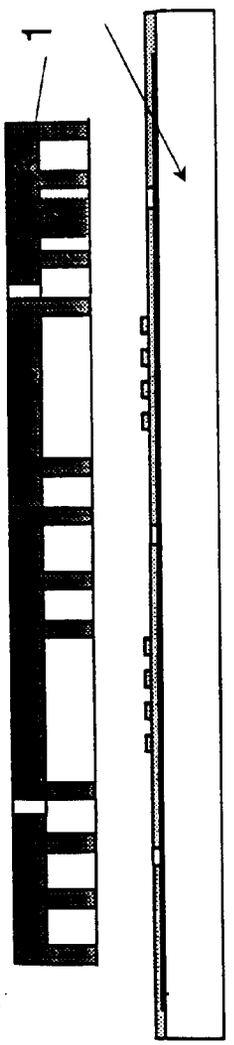


Fig. 7b

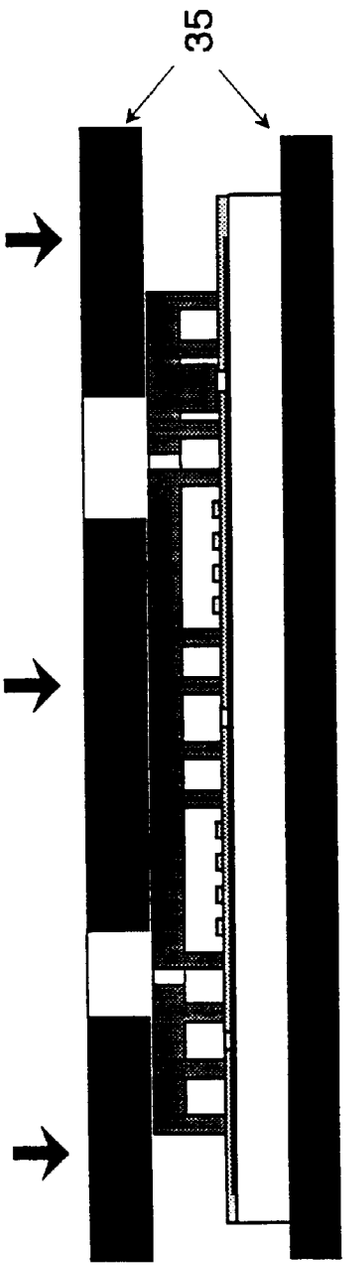


Fig. 7c

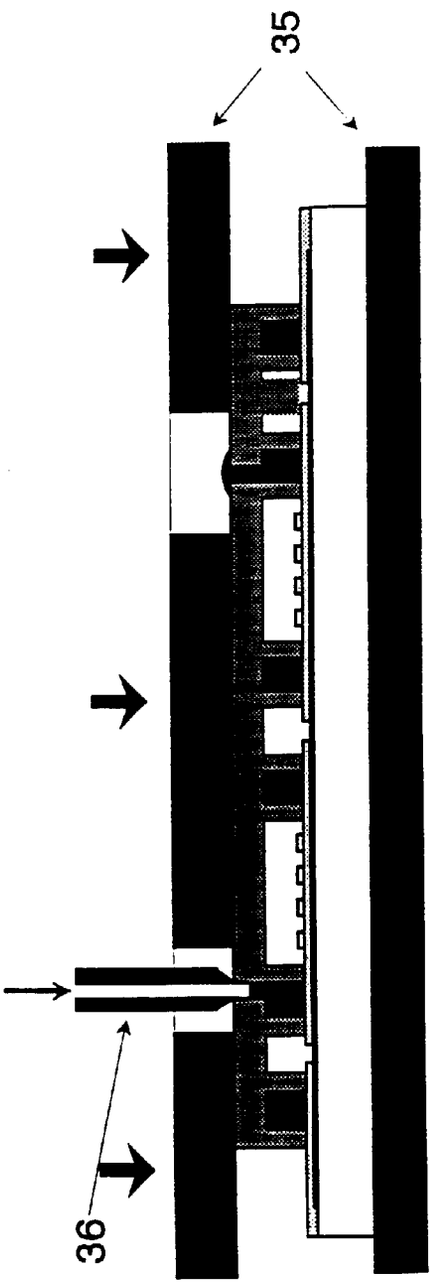


Fig. 7d



Fig. 7e

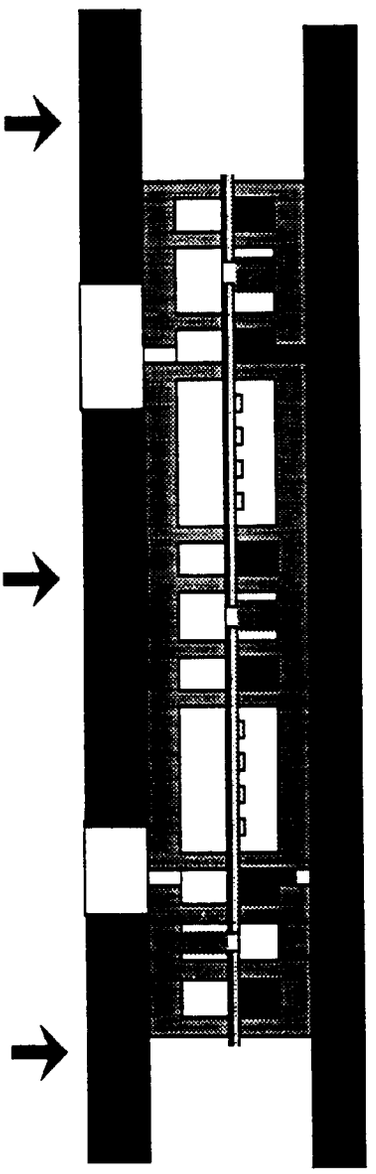
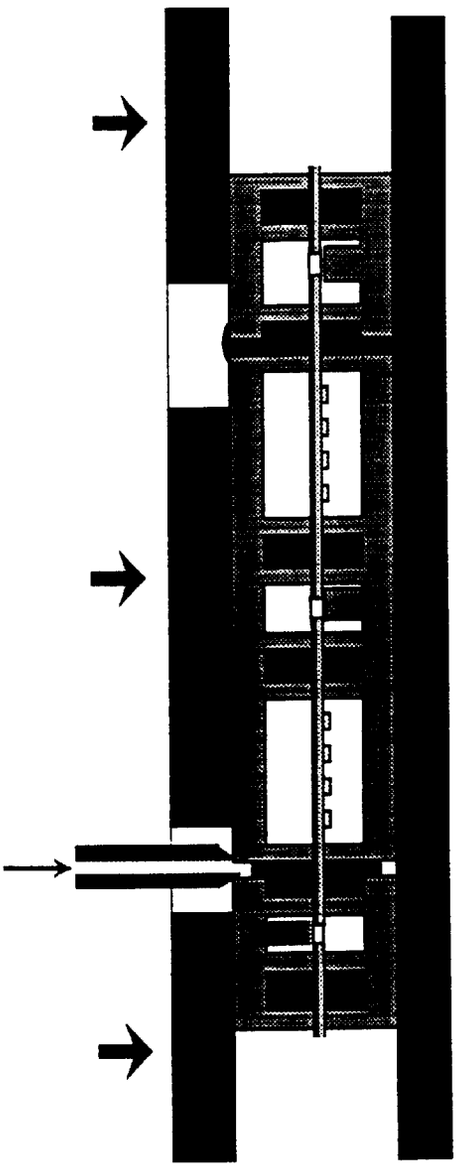
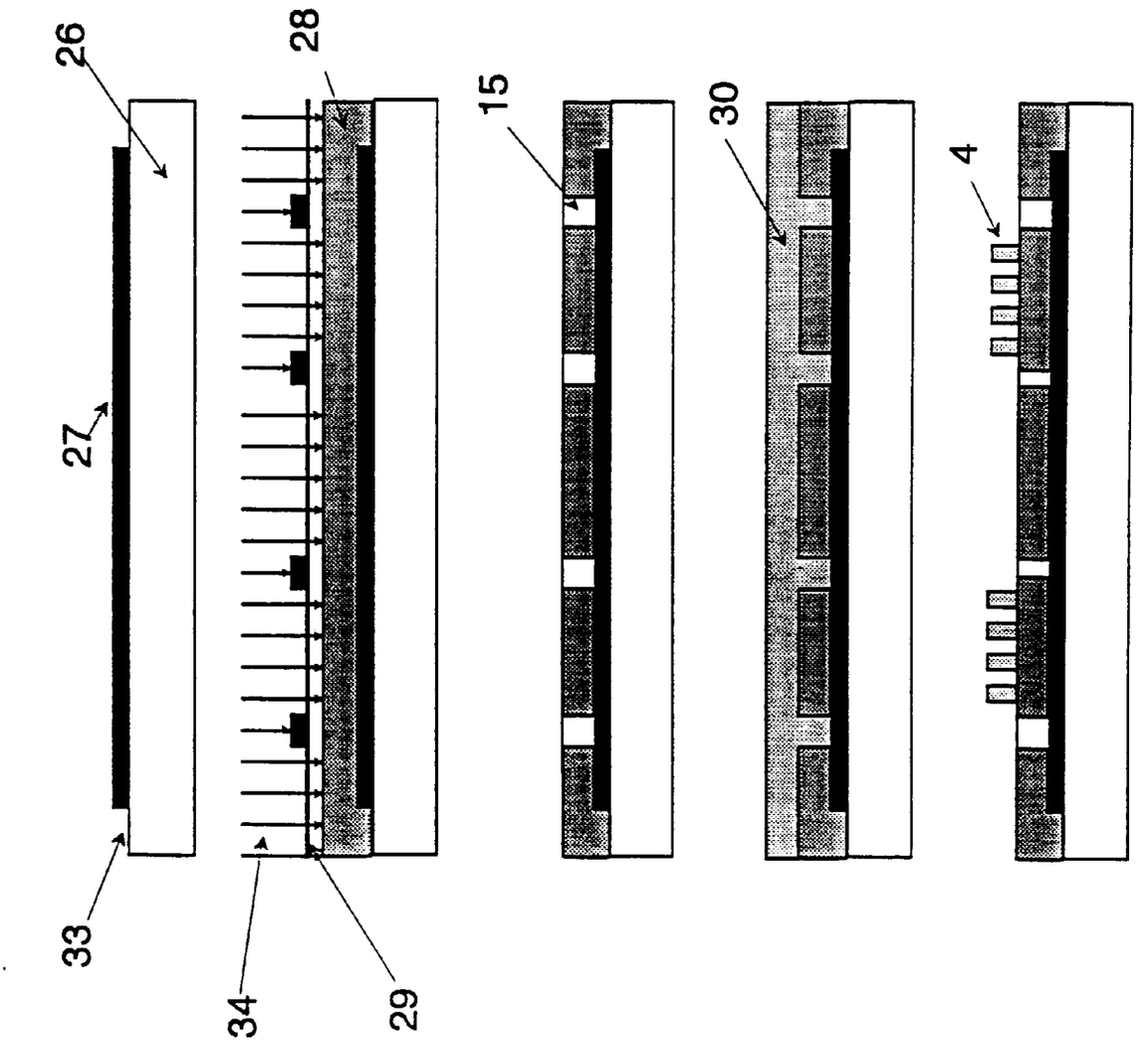


Fig. 7f




Fig. 8a
Fig. 8b
Fig. 8c
Fig. 8d
Fig. 8e
26
27
33
28
34
29
15
30
4

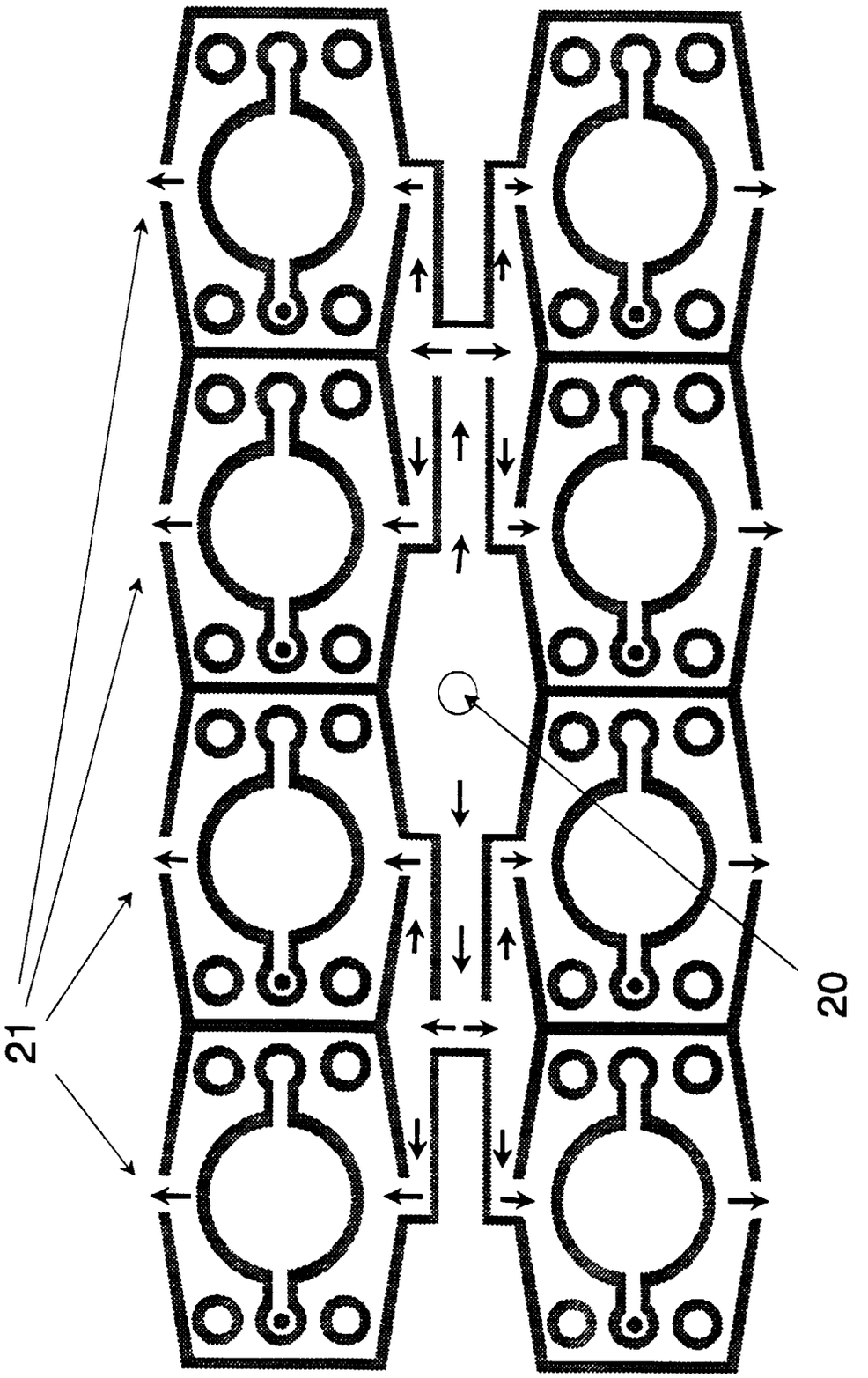


Fig. 9

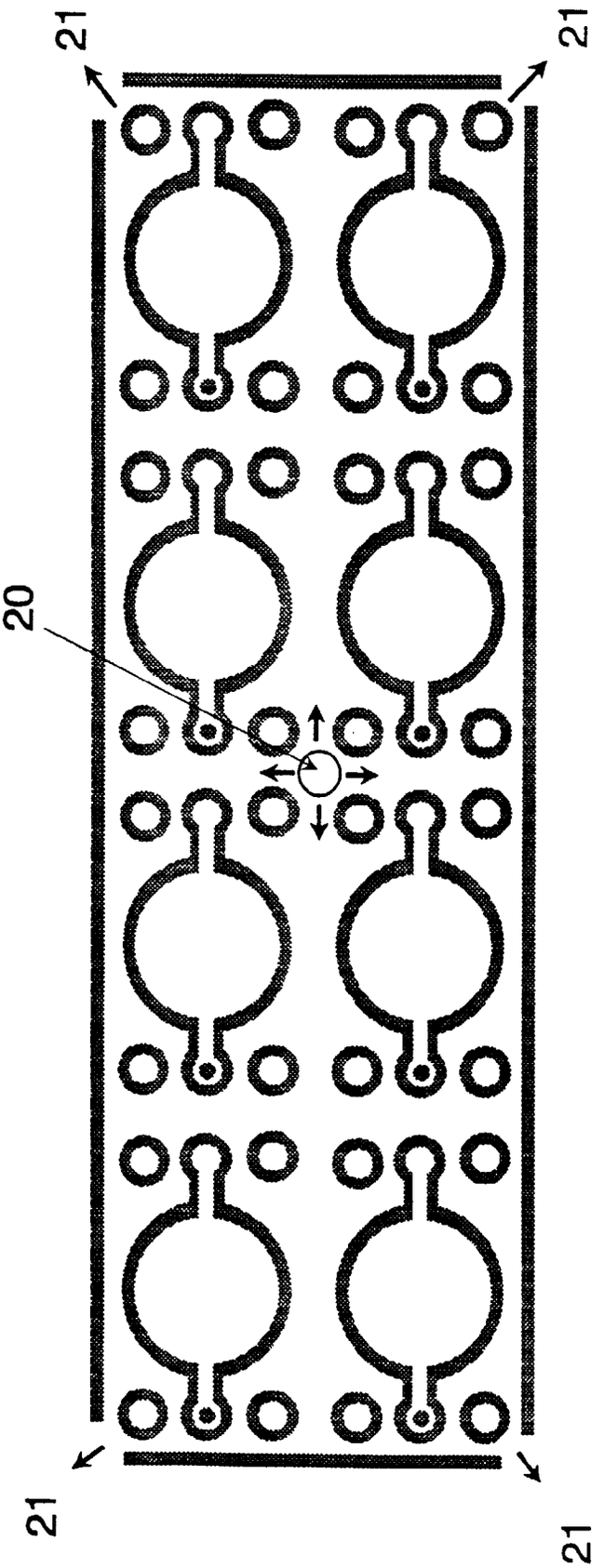


Fig. 10

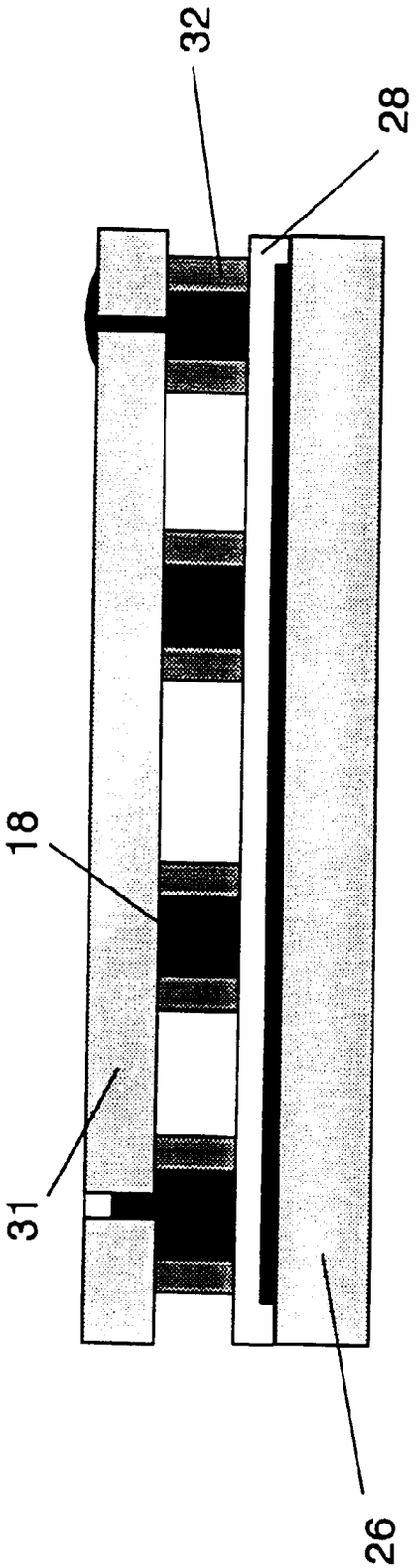


Fig. 11

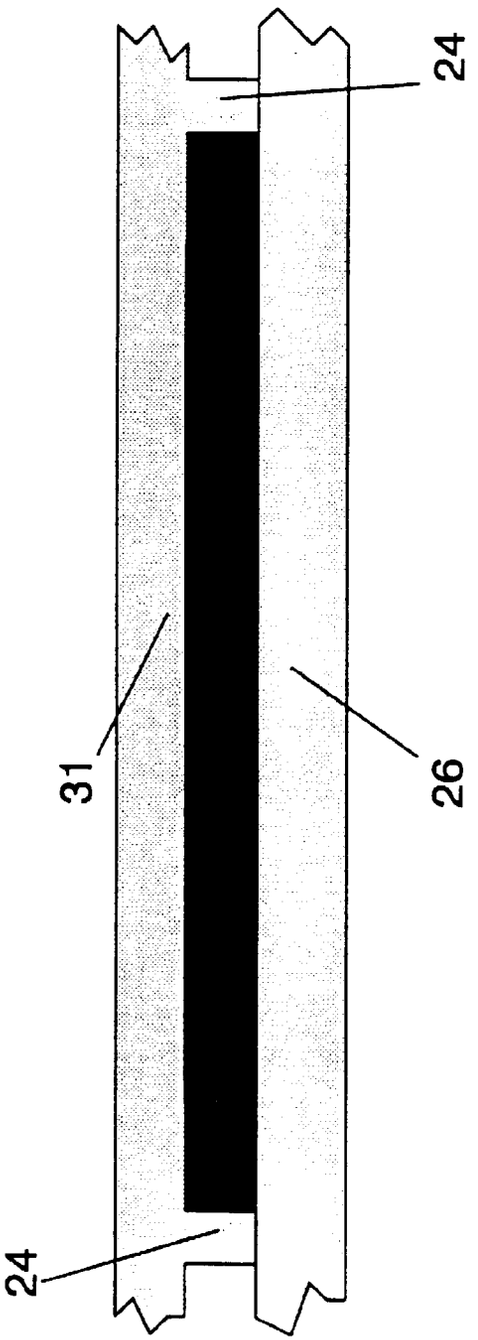


Fig. 12a

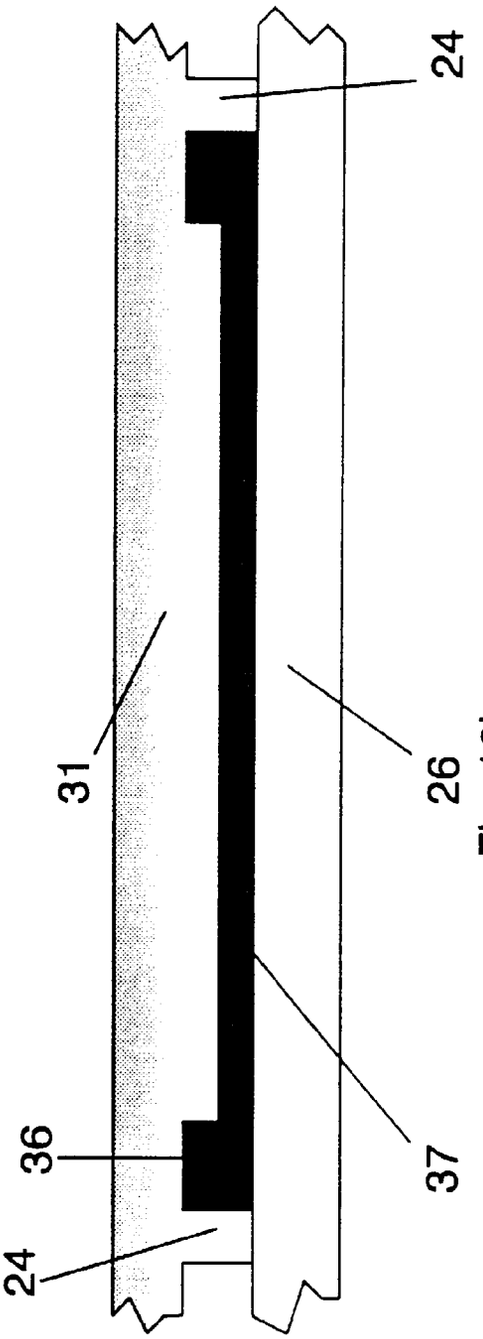


Fig. 12b