



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
21.07.2021 Patentblatt 2021/29

(51) Int Cl.:
H04R 17/00 (2006.01) H04R 7/14 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **20168836.3**

(22) Anmeldetag: **08.04.2020**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Dehé, Alfons**
72770 Reutlingen (DE)
• **BITTNER, Achim**
74080 Heilbronn (DE)
• **Castellanos, Lenny**
78727 Oberndorf am Neckar (DE)

(30) Priorität: **17.01.2020 EP 20152560**

(74) Vertreter: **Hertin und Partner**
Rechts- und Patentanwälte PartG mbB
Kurfürstendamm 54/55
10707 Berlin (DE)

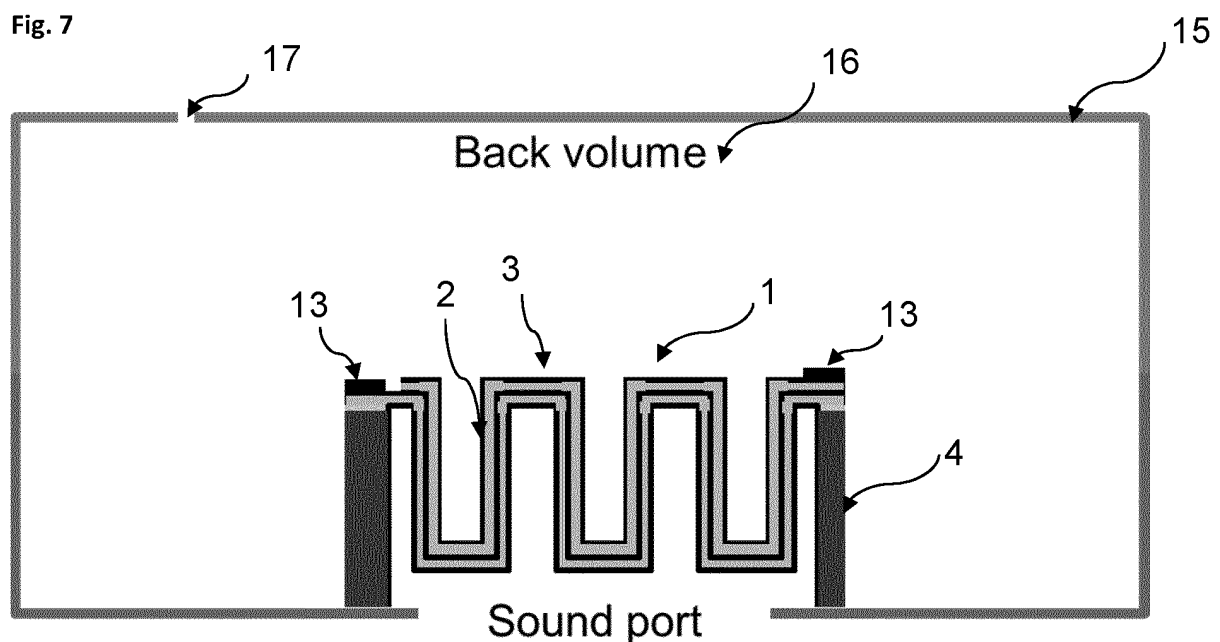
(71) Anmelder: **Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.**
78052 Villingen-Schwenningen (DE)

(54) **MEMS-LAUTSPRECHER MIT ERHÖHTER LEISTUNGSFÄHIGKEIT**

(57) Die Erfindung betrifft einen MEMS-Wandler, welcher eine schwingfähige Membran (1) zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen eines Fluids in einer vertikalen Richtung umfasst, wobei die schwingfähige Membran (1) von einem Träger (4) gehalten wird und die schwingfähige Membran (1) zwei oder mehr vertikale Abschnitte (2) aufweist, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und mindestens eine Lage aus einem Aktuatormaterial (11) umfassen. Die schwingfähige

Membran (1) liegt bevorzugt endseitig mit einer Elektrode (13) kontaktiert vor, sodass durch Ansteuerung der mindestens einer Elektrode (13) die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode (13) ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

Fig. 7



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen MEMS-Wandler, welcher eine schwingfähige Membran zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen eines Fluids in einer vertikalen Richtung umfasst, wobei die schwingfähige Membran von einem Träger gehalten wird und die schwingfähige Membran zwei oder mehr vertikale Abschnitte aufweist, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und mindestens eine Lage aus einem Aktuatorematerial umfassen. Die schwingfähige Membran liegt bevorzugt endseitig mit einer Elektrode kontaktiert vor, sodass durch Ansteuerung der mindestens einer Elektrode die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

Hintergrund und Stand der Technik

[0002] Für die Herstellung kompakter, mechanisch-elektronischer Vorrichtungen wird heute auf vielen Anwendungsgebieten auf die Mikrosystemtechnik zurückgegriffen. Die so herstellbaren Mikrosysteme (engl. *microelectromechanical system*, kurz MEMS) sind sehr kompakt (Mikrometerbereich) bei gleichzeitig hervorragender Funktionalität und immer geringeren Herstellungskosten.

[0003] Aus dem Stand der Technik sind auch MEMS-Wandler, wie beispielsweise MEMS-Lautsprecher oder MEMS-Mikrofone, bekannt. Derzeitige MEMS-Lautsprecher werden zumeist als planare Membransystem ausgeführt mit einer vertikalen Aktuierung einer schwingfähigen Membran in Emissionsrichtung. Die Anregung erfolgt beispielsweise mittels piezoelektrischer, elektromagnetischer oder elektrostatischer Aktuatoren.

[0004] Ein elektromagnetischer MEMS-Lautsprecher für mobile Geräte wird in Shahosseini et al. 2015 beschrieben. Der MEMS-Lautsprecher weist eine versteifende Silizium-Mikrostruktur als Schallstrahler auf, wobei der bewegliche Teil an einem Träger über Silizium-Triebfedern aufgehängt wird, um große Verschiebungen mittels eines elektromagnetischen Motors aus der Ebene zu ermöglichen.

[0005] Stoppel et al. 2017 offenbart einen Zwei-Wege Lautsprecher dessen Konzept auf konzentrischen piezoelektrischen Aktuatoren basiert. Als eine Besonderheit ist die Schwingungsmembran nicht geschlossen ausgeführt, sondern umfasst acht piezoelektrische unimorphe Aktoren, die jeweils aus einer piezoelektrischen und einer passiven Schicht bestehen. Die äußeren Tieftöner bestehen aus vier einseitig eingespannten Aktuatoren mit Trapezform, während die inneren Hochtöner durch vier dreieckige Aktuatoren gebildet werden, welche mittels Feder mit einem starren Rahmen verbunden. Die Trennung der Membran soll ein verbessertes Klangbild

bei höherer Leistung erlauben.

[0006] Nachteilig an derartigen planaren MEMS-Lautsprechern ist deren Limitierung in Bezug auf die Schallleistung, insbesondere bei tiefen Frequenzen. Ein Grund hierfür liegt darin, dass der erzeugbare Schalldruckpegel proportional zum Quadrat der Frequenz für eine vorgegebene Auslenkung ist. Für hinreichend Schallleistungen sind daher entweder Auslenkungen für die Schwingungsmembranen von mindestens 100 μm oder großflächige Membranen im Quadratzentimeterbereich notwendig. Beide Bedingungen sind mittels einer MEMS-Technologie nur schwer zu realisieren.

[0007] Im Stand der Technik wurde daher vorgeschlagen MEMS-Lautsprecher zu konzipieren, welche nicht eine geschlossene Membran zu Schwingungen in vertikaler Emissionsrichtung aufweisen, sondern eine Vielzahl von beweglichen Elementen, die zu lateralen bzw. horizontalen Schwingungen angeregt werden können. Vorteilhaft hieran ist es, dass auf kleiner Fläche ein vergrößerter Volumenstrom bewegbar und somit einer erhöhten Schallleistung bereitgestellt werden kann.

[0008] Ein auf diesem Prinzip basierender MEMS-Lautsprecher wird beispielsweise in der US 2018 / 0179048 A1 bzw. Kaiser et al. 2019 offenbart.

[0009] Der MEMS-Lautsprecher umfasst eine Mehrzahl elektrostatischer Biegeaktuatoren, welche zwischen einem Deckel- und Boden-Wafer als vertikale Lamellen angeordnet vorliegen und durch entsprechende Steuerung zu lateralen Schwingungen angeregt werden können. Hierbei bildet eine innere Lamelle eine Aktuatorelektrode gegenüber zwei äußeren Lamellen. Bis auf einen Verbindungsknoten von weiterhin galvanisch getrennten Elektroden besteht ein Luftspalt zwischen den gebogenen drei Lamellen. Liegt ein Potential innen gegen außen an, führt dies zu einer beidseitigen Anziehung aufgrund der Wölbung des Designs in Richtung einer Vorzugsrichtung, welche durch einen Anker vorgegeben ist. Die Ausbuchtungen der äußeren Lamellen dienen der Beweglichkeit. Die Rückstellkraft ist durch eine mechanische Federkraft gegeben. Ein pull-push Betrieb ist somit nicht möglich.

[0010] Nachteilig ist zudem, dass Spalten zwischen den Biegeaktuatoren und den Deckel/Boden-Wafern, welche für deren Beweglichkeit notwendig sind, zu einer Ventilation zwischen beiden Kammern führen. Hierdurch erfährt die untere Grenzfrequenz eine Begrenzung. Weiterhin ist die laterale Bewegung der Biegeaktuatoren und mithin die Schallleistung eingeschränkt, um einen pull-in Effekt und akustischen Durchschlag zu vermeiden.

[0011] Ein alternatives Luftpuls- oder Schallerzeugungssystem auf MEMS-Basis wird in der US 2019 / 011 64 17 A1 beschrieben. Die Vorrichtung umfasst eine Vorder- sowie Rückkammer und eine Mehrzahl von Ventilen, wobei Vorder- und Rückkammer mittels einer gefalteten Membran voneinander getrennt sind. In einer Ausführungsform weist die gefaltete Membran im Querschnitt eine rechteckige Mäanderstruktur mit horizontalen und vertikalen Abschnitten auf. Auf den jeweiligen horizonta-

len Abschnitten sind Piezoaktuatoren positioniert, um durch eine synchronisierte Dehnung oder Stauchung der horizontalen Abschnitte eine laterale Bewegung der vertikalen Abschnitte zu bewirken. Bei dem vorgeschlagenen Prinzip kann ebenfalls auf einer kleinen Chip-Oberfläche ein vergrößerter Volumenstrom und somit Schallleistung generiert werden.

[0012] Nachteilig ist jedoch der erhöhte Aufwand für den synchronisierten Antrieb der Piezoaktuatoren. Auch besteht ein Verbesserungspotential in Bezug auf das durch die lateralen Schwingungen verdrängte Volumen, welche durch die geometrische Anordnung der einseitig aktuierten horizontalen Abschnitte begrenzt ist.

[0013] Im Lichte der Nachteile des Standes der Technik besteht somit ein Bedarf an alternativen oder verbesserten Lösungen für MEMS-basierte Lautsprecher.

Aufgabe der Erfindung

[0014] Aufgabe der Erfindung ist es einen MEMS-Wandler, insbesondere MEMS-Lautsprecher oder MEMS-Mikrofon, sowie ein Verfahren zur Herstellung des MEMS-Wandlers bereitzustellen, welche die Nachteile des Standes nicht aufweisen. Insbesondere war es eine Aufgabe der Erfindung einen leistungsstarken MEMS-Lautsprecher bzw. MEMS-Mikrofon mit hoher Klangqualität bzw. Audioqualität zur Verfügung zu stellen, welche sich gleichzeitig durch einen einfachen, kostengünstigen und kompakten Aufbau auszeichnen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0015] Die Aufgabe wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen beschrieben.

[0016] Die Erfindung betrifft bevorzugt einen MEMS-Wandler zur Interaktion mit einem Volumenstrom eines Fluids umfassend

- einen Träger,
- eine schwingfähige Membran zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids in einer vertikalen Richtung, wobei die schwingfähige Membran von dem Träger gehalten wird

und wobei die schwingfähige Membran zwei oder mehr vertikale Abschnitte aufweist, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und mindestens eine Lage aus einem Aktuatomaterial umfassen, wobei die schwingfähige Membran endseitig mit mindestens einer Elektrode kontaktiert vorliegt, sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen an der mindes-

tens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

[0017] Besonders bevorzugt kann es sich bei dem MEMS-Wandler um einen MEMS-Lautsprecher handeln. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform betrifft die Erfindung einen MEMS-Lautsprecher umfassend

- einen Träger,
- eine schwingfähige Membran zur Erzeugung von Schallwellen in eine vertikale Emissionsrichtung, wobei die schwingfähige Membran von dem Träger gehalten wird,

wobei die schwingfähige Membran zwei oder mehr vertikale Abschnitte aufweist, welche parallel zur Emissionsrichtung ausgebildet sind und mindestens eine Lage aus einem Aktuatomaterial umfassen, wobei die schwingfähige Membran bevorzugt endseitig mit mindestens einer Elektrode kontaktiert vorliegt, sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können.

[0018] Durch die Konstruktionsweise des MEMS-Lautsprecher kann ein MEMS-Lautsprecher mit hoher Schallleistung und vereinfachter Ansteuerung erhalten werden.

[0019] Im Gegensatz zu bekannten planaren MEMS-Lautsprechern muss die schwingfähige Membran selbst nicht über eine große Fläche von mehreren Quadratcentimetern oder mit einer Auslenkung mehr als 100 µm betrieben werden, um einen ausreichenden Schalldruck zu erzeugen. Stattdessen kann die Mehrzahl der vertikalen Abschnitte der schwingfähigen Membran mit kleinen horizontalen bzw. lateralen Bewegungen von wenigen Mikrometern ein vergrößertes Gesamtvolumen in vertikaler Emissionsrichtung bewegen.

[0020] Gegenüber Lösungen gemäß der US 2018 / 0179048 A1 bzw. Kaiser et al. 2019 ist der beanspruchte MEMS-Lautsprecher durch einen vereinfachten Aufbau, Steuerung und Herstellungsverfahren gekennzeichnet.

[0021] Insbesondere die Bereitstellung der vertikalen Lamellen bzw. Biegeaktuatoren für einen MEMS-Lautsprecher gemäß Kaiser et al. 2019 ist aufwändig. Zudem sind hinreichend präzise senkrechte Ätzungen nur für begrenzte Lamellenhöhen möglich, wodurch die Schallleistungen limitiert wird.

[0022] Mittels der erfindungsgemäßen Lösung können stattdessen die vertikalen Abschnitte der schwingfähigen Membran wie im Folgenden noch im Detail erläutert, mittels einfacher Herstellungsschritte in MEMS-Ausführung erhalten werden. Zudem vermeidet das erfindungsgemäße Aktuatorprinzip ein pull-in oder ein Verkleben der vertikalen Abschnitte. Im Gegensatz zur Lösung von Kaiser et al. 2019 werden durch die einseitigen Elektroden keine Potentialdifferenzen in einem Spalt zwischen den vertikalen Abschnitten erhalten. Neben der Vermeidung einer Überspannung bzw. eines Pull-Ins kann hierdurch

zudem eine Staubansammlung vermindert werden, da beispielsweise eine außenliegende Elektrode auf ein Grundpotential gelegt werden kann.

[0023] Ein weiterer besonderer Vorteil des beschriebenen MEMS-Lautsprechers liegt in der vereinfachten Ansteuerung. Während in der US 2019/011 64 17 A1 eine Vielzahl von piezoelektrischen Aktuatoren an den horizontalen Abschnitten kontaktiert werden müssen, kann der vorgeschlagene MEMS-Lautsprecher mittels mindestens einer endseitigen Elektrode betrieben werden. Dies reduziert den Herstellungsaufwand, minimiert Fehlerquellen und führt zudem inhärent zu einer synchronen Steuerung der vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen.

[0024] Auf diese Weise können die Luftvolumina, welche zwischen den vertikalen Abschnitten vorliegen, überaus präzise durch die horizontalen Schwingungen entlang der vertikalen Emissionsrichtung bewegt werden. Ein verbessertes Klangbild, auch bei hohen Schallleistungen ist das Ergebnis.

[0025] Ein "MEMS-Lautsprecher" bezeichnet bevorzugt einen Lautsprecher, welcher auf einer MEMS-Technologie basiert und dessen klangerzeugende Strukturen mindestens teilweise eine Dimensionierung im Mikrometerbereich ($1\ \mu\text{m}$ bis $1000\ \mu\text{m}$) aufweisen. Bevorzugt können beispielsweise die vertikalen Abschnitte der schwingfähigen Membran in Breite, Höhe und/oder Dicke eine Dimension im Bereich von weniger als $1000\ \mu\text{m}$ aufweisen. Hierbei kann es auch bevorzugt sein, dass beispielsweise lediglich die Höhe der vertikalen Abschnitte im Mikrometerbereich dimensioniert sind, während beispielsweise die Länge eine größere Dimension und/oder die Dicke eine kleinere Größe aufweisen kann.

[0026] Die Gestaltung der schwingfähigen Membran lässt sich vorteilhafterweise nicht nur zur Ausbildung eines MEMS-Lautsprechers mit hoher Schalleistung und vereinfachter Ansteuerung nutzen. Ebenso wird beispielsweise die Bereitstellung eines besonders leistungsstarken MEMS-Mikrofones mit hoher Audioqualität ermöglicht.

[0027] In einer bevorzugten Ausführungsform betrifft die Erfindung somit zudem ein MEMS-Mikrofon umfassend

- einen Träger,
- eine schwingfähige Membran zur Aufnahme von Schallwellen in einer vertikalen Richtung, wobei die schwingfähige Membran von dem Träger gehalten wird,

und wobei die schwingfähige Membran zwei oder mehr vertikale Abschnitte aufweist, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und mindestens eine Lage aus einem Aktuatorematerial umfassen, wobei die schwingfähige Membran bevorzugt endseitig mit mindestens einer Elektrode kontaktiert vorliegt, sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu

horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

[0028] Der Aufbau des MEMS-Mikrofons ähnelt strukturell dem des MEMS-Lautsprechers insbesondere im Hinblick auf die Ausgestaltung der schwingfähigen Membran. Anstelle einer Ansteuerung der Elektroden zur Erzeugung von horizontalen Schwingungen und mithin Schalldruckwellen, ist das MEMS-Mikrofon jedoch dafür ausgelegt Schalldruckwellen in selbiger vertikaler Richtung aufzunehmen. Bevorzugt liegen zwischen den vertikalen Abschnitten mithin Luftvolumina vor, welche bei Aufnahme von Schallwellen entlang einer vertikalen Detektionsrichtung bewegt werden. Durch die Schalldruckwellen werden die vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt, sodass das Aktuatorematerial ein entsprechendes periodisches elektrisches Signal erzeugt.

[0029] Ein "MEMS-Mikrofon" bezeichnet bevorzugt ein Mikrofon, welches auf einer MEMS-Technologie basiert und dessen klangaufnehmende Strukturen mindestens teilweise eine Dimensionierung im Mikrometerbereich ($1\ \mu\text{m}$ bis $1000\ \mu\text{m}$) aufweisen. Bevorzugt können beispielsweise die vertikalen Abschnitte der schwingfähigen Membran in Breite, Höhe und/oder Dicke eine Dimension im Bereich von weniger als $1000\ \mu\text{m}$ aufweisen. Hierbei kann es auch bevorzugt sein, dass beispielsweise lediglich die Höhe der vertikalen Abschnitte im Mikrometerbereich dimensioniert sind, während beispielsweise die Länge eine größere Dimension und/oder die Dicke eine kleinere Größe aufweisen kann.

[0030] Unter dem Begriff MEMS-Wandler ist somit sowohl ein MEMS-Mikrofon als auch ein MEMS-Lautsprecher zu verstehen. Allgemein bezeichnet der MEMS-Wandler einen Wandler zur Interaktion mit einem Volumenstrom eines Fluids, der auf MEMS-Technologie basiert und dessen Strukturen zur Interaktion mit dem Volumenstrom bzw. zur Aufnahme oder Erzeugung von Druckwellen des Fluids eine Dimensionierung im Mikrometerbereich ($1\ \mu\text{m}$ bis $1000\ \mu\text{m}$) aufweisen. Bei dem Fluid kann es sich sowohl um ein gasförmiges, als auch flüssiges Fluid handeln. Die Strukturen des MEMS-Wandlers, insbesondere der schwingfähigen Membran sind zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids ausgelegt.

[0031] Beispielsweise kann es sich, wie im Falle eines MEMS-Lautsprechers oder MEMS-Mikrofons, um Schalldruckwellen handeln. Der MEMS-Wandler kann sich aber ebenso als Aktuator oder Sensor für andere Druckwellen eignen. Der MEMS-Wandler ist somit bevorzugt ein Gerät, welches Druckwellen (z.B. akustische Signale als Schallwechseldrücke) in elektrische Signale umwandelt oder umgekehrt (Umwandlung elektrischer Signale in Druckwellen, beispielsweise akustische Signale).

[0032] Auch Anwendungen des MEMS-Wandlers als ein Energy-Harvester sind möglich, wobei pneumatische oder hydraulische Wechseldrücke genutzt werden. Das elektrische Signal kann in diesen Fällen als gewonnene

elektrische Energie abgeführt, gespeichert oder anderen (Verbraucher-)geräten zugeführt werden.

[0033] Endseitig meint bevorzugt eine Positionierung der mindestens eine Elektrode, sodass eine Kontaktierung mit einer Elektronik, z.B. an eine Strom- oder Spannungsquelle im Falle eines MEMS-Lautsprechers, an einem Ende der schwingfähigen Membran erfolgen kann, bevorzugt an einem Ende, an welchem die Membran am Träger aufgehängt vorliegt. Elektrode meint bevorzugt einen Bereich aus einem leitfähigen Material (bevorzugt einem Metall), welcher für eine solche Kontaktierung mit einer Elektronik, z.B. einer Strom- und/oder Spannungsquelle im Falle eines MEMS-Lautsprechers, eingerichtet ist. Bevorzugt kann es sich um einen Elektrodenpad handeln. Besonders bevorzugt dient das Elektrodenpad der Kontaktierung mit einer Elektronik und ist selbst mit einer leitfähigen Metallschicht verbunden, welche sich über die gesamte Fläche der schwingfähigen Membran erstrecken kann. Teilweise wird im Folgenden die leitfähige Schicht zusammen mit einem Elektrodenpad als Elektrode, beispielsweise als Top-Elektrode oder Bottom-Elektrode bezeichnet.

[0034] In bevorzugten Ausführungsformen umfasst der MEMS-Wandler zwei endseitige Elektroden. Bevorzugt kann die Kontaktierung mit einer Elektronik, z.B. einer Strom- oder Spannungsquelle, mit den Elektroden an gegenüberliegende Enden der schwingfähigen Membran erfolgen, zwischen welchen die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte vorliegen, sodass mittels der endseitigen Elektroden die Aktuatorlage(n) in den vertikalen Abschnitten angesteuert werden können.

[0035] Die endseitige Bereitstellung der Elektroden grenzt sich somit bevorzugt von einer Kontaktierung ab, welche die jeweiligen vertikalen Abschnitte mit jeweiligen separaten Elektroden ansteuert bzw. im Falle eines MEMS-Mikrofons erzeugte elektrische Signale abgreift. Bevorzugt umfasst der MEMS-Wandler somit genau ein oder genau zwei Elektroden zur endseitigen Kontaktierung und keine weiteren Elektroden(pads) für eine Kontaktierung mittlerer vertikaler Abschnitte.

[0036] Bevorzugt dient die Lage aus einem Aktuatomaterial in den vertikalen Abschnitten als Bestandteil eines mechanischer Biomorph, wobei durch Ansteuerung der Aktuatorlage über die Elektrode eine laterale Wölbung der vertikalen Abschnitte bewirkt wird oder wobei durch eine induzierte laterale Wölbung ein entsprechendes elektrisches Signal erzeugt wird.

[0037] In einer bevorzugten Ausführungsform weisen die zwei oder mehr vertikale Abschnitte mindestens zwei Lagen auf, wobei eine Lage ein Aktuatomaterial und eine zweite Lage ein mechanisches Stützmaterial umfasst und wobei mindestens die Lage umfassend das Aktuatomaterial und mit einer endseitigen Elektrode kontaktiert vorliegt, sodass die horizontalen Schwingungen durch eine Formänderung des Aktuatomaterials gegenüber dem mechanischen Stützmaterial erzeugbar sind. In der Ausführungsform wird der mechanische Biomorph durch eine Lage aus Aktuatomaterial (z.B. einem piezo-

elektrischen Material) und einer passiven Lage gebildet, welche als mechanische Stüttschicht fungiert. Für die Biegung kann sowohl ein transversaler als auch longitudinaler Piezoeffekt genutzt werden.

[0038] Bei Ansteuerung der Aktuatorlage kann diese beispielsweise eine transversale oder longitudinale Streckung oder Stauchung erfahren. Gegenüber der mechanischen Stüttschicht wird hierdurch ein Stressgradient erzeugt, welcher zu einer lateralen Wölbung bzw. Schwingung führt. Wie in der Fig. 1 illustriert, kann durch wechselnde Polung an den Elektroden bevorzugt ein push-pull-Betrieb erfolgen, wodurch abwechselnd nahezu das gesamte Luftvolumen zwischen den vertikalen Abschnitten in vertikaler Emissionsrichtung bewegt werden kann.

[0039] Vorteilhaft an dem Aktuatorprinzip ist somit eine hoch effiziente Übersetzung der horizontalen Schwingungen vertikaler Abschnitte in eine vertikale Volumenbewegung bzw. Schallerzeugung.

[0040] Da das Aktuatorprinzip nicht auf einer elektrostatischen Anziehung basiert, sondern auf einer relativen Formänderung (z.B. Stauchung, Streckung, Scherung) der Aktuatorlage gegenüber einer Stüttschicht, kann ein Verkleben der Membranabschnitte ausgeschlossen werden. Stattdessen können sich die vertikalen Abschnitte endlich berühren und sind somit in ihrer Auslenkung nicht eingeschränkt.

[0041] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform umfassen die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte mindestens zwei Lagen, wobei beide Lagen ein Aktuatomaterial umfassen und mit jeweils endseitigen Elektroden kontaktiert vorliegen und die horizontalen Schwingungen durch eine Formänderung der einen Lage gegenüber der anderen Lage erzeugbar sind. In der Ausführungsform wird die horizontale Schwingung der vertikalen Abschnitte mithin nicht durch einen Stressgradienten zwischen einer aktiven Aktuatorlage und einer passiven Stüttschicht generiert, sondern durch eine relative Formänderung zweier aktiver Aktuatorlagen.

[0042] Die Aktuatorlagen können hierbei aus demselben Aktuatomaterial bestehen und unterschiedlich angesteuert werden. Auch können die Aktuatorlagen aus unterschiedlichen Aktuatomaterialien bestehen, beispielsweise aus piezoelektrischen Materialien mit unterschiedlichem Deformationskoeffizienten.

[0043] Im Sinne der Erfindung wird die "Lage umfassend ein Aktuatomaterial" bevorzugt auch als Aktuatorlage bezeichnet. Ein Aktuatomaterial meint bevorzugt ein Material, welches unter Anlegung einer elektrischen Spannung eine Formänderung, beispielsweise eine Dehnung, Stauchung oder Scherung erfährt oder umgekehrt unter Formänderung eine elektrische Spannung erzeugt.

[0044] Bevorzugt sind Materialien mit elektrischen Dipolen, welche durch das Anlegen einer elektrischen Spannung eine Formänderung erfahren, wobei die Orientierung der Dipole und/oder des elektrischen Feldes die Vorzugsrichtung der Formänderungen bestimmen

kann.

[0045] Bevorzugt kann das Aktuatormaterial ein piezoelektrisches Material, ein Polymer Piezoelectrical Material und/oder elektroaktive Polymere (EAP) sein.

[0046] Besonders bevorzugt ist das piezoelektrisch Material ausgewählt aus einer Gruppe umfassend Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Aluminiumnitrid (AlN) und Zinkoxid (ZnO).

[0047] Zu den Polymer Piezoelectric Materialien gehören bevorzugt Polymere, welche interne Dipole und hierdurch vermittelt piezoelektrische Eigenschaften aufweisen. D.h. bei Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung erfahren die piezoelektrischen Polymer Materialien (analog zu den vorgenannten klassischen piezoelektrischen Materialien) eine Formänderung (z.B. Stauchung, Streckung oder Scherung). Ein Beispiel für ein bevorzugtes piezoelektrisches Polymermaterialien Polyvinylidenfluorid.

[0048] Hierdurch kann eine makroskopische Lösung realisiert werden, bei der eine Polymer Piezoelectrical Material Schicht auf einer mechanischen Stützschrift aufgebracht ist und über einen oberen und unteren Kamm gewickelt wird. Bevorzugt wird zunächst eine Polymer Piezoelectrical Material Schicht (inklusive Elektrode) auf einer Stützschrift (ggf. inklusive einer Gegenelektrode) bereitgestellt. Im Anschluss wird ein oberer und unterer Kamm (bevorzugt einer MEMS-Struktur) derart gegeneinander gefahren, dass eine gefaltete Membran mit aktuierbaren vertikalen Abschnitten entsteht.

[0049] Im Sinne der Erfindung wird die "Lage umfassend ein mechanische Stützmaterial" bevorzugt auch als Stützlage oder Stützschrift bezeichnet. Das mechanische Stützmaterial bzw. die Stützlage dient bevorzugt als passive Lage, welche einer Formänderung der Aktuatorlage widerstehen kann. Im Gegensatz zu einer Aktuatorlage ändert das mechanische Stützmaterial beim Anlegen einer elektrischen Spannung bevorzugt seine Form nicht. Bevorzugt ist das mechanisch Stützmaterial elektrisch leitend, sodass auch unmittelbar für eine Kontaktierung der Aktuatorlage verwandt werden kann. Es kann aber auch in einigen Ausführungsformen nichtleitend sein und beispielsweise mit einer elektrisch leitfähigen Lage beschichtet vorliegen.

[0050] Besonders bevorzugt handelt es sich bei dem mechanischen Stützmaterial um monokristallines Silizium, ein Polysilizium oder ein dotiertes Polysilizium.

[0051] Während die Aktuatorlage bei einer elektrischen Spannung eine Formänderung erfährt, verbleibt die Lage des mechanischen Stützmaterials im Wesentlichen unverändert. Der resultierende Stressgradient zwischen beiden Lagen (mechanischer Bimorph) bewirkt bevorzugt eine horizontale Wölbung. Zu diesem Zweck ist die Dicke der Stützlage im Vergleich zur Dicke der Aktuatorlage bevorzugt so zu wählen, dass für die Wölbung ein hinreichend großer Stressgradient generiert wird. Für dotiertes Polysilizium als mechanisches Stützmaterial und einem piezoelektrischen Material wie PZT oder AlN haben sich beispielsweise im Wesentlichen

gleich große Dicke, bevorzugt zwischen 0,5 μm und 2 μm , als besonders geeignet erwiesen.

[0052] Begriffe wie im Wesentlichen, ungefähr, etwa, ca. etc. beschreiben bevorzugt einen Toleranzbereich von weniger als $\pm 20\%$, bevorzugt weniger als $\pm 10\%$, noch stärker bevorzugt weniger als $\pm 5\%$ und insbesondere weniger als $\pm 1\%$. Angaben von im Wesentlichen, ungefähr, etwa, ca. etc. offenbaren und umfassen stets auch den exakten genannten Wert.

[0053] Bei periodischer Ansteuerung der Aktuatorlage, z.B. mittels einer Wechselspannung, können somit schnell und präzise horizontale Schwingungen zur Schallemission erzeugt werden.

[0054] Für die Gewährleistung einer horizontalen Schwingung kann bevorzugt das piezoelektrische Material eine C-Axis Orientierung senkrecht zur Oberfläche der vertikalen Abschnitte aufweisen, sodass ein transversaler piezoelektrische Effekt genutzt wird. Auch andere Orientierungen und beispielsweise die Ausnutzung eines longitudinalen piezoelektrischen Effekts zur Ausbildung der horizontalen Wölbungen bzw. Schwingungen (vgl. Fig. 1) können bevorzugt sein.

[0055] Eine Kontaktierung der Aktuatorlage und/oder der Lage aus einem mechanischen Stützmaterial und somit das Anlegen einer elektrischen Spannung kann über die endseitigen Elektroden unmittelbar erfolgen oder durch eine Lage aus einem leitfähigen Material unterstützt werden,

[0056] In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die schwingfähige Membran daher mindestens eine Lage aus einem leitfähigen Material.

[0057] In bevorzugten Ausführungsformen ist das leitfähige Material ausgewählt aus einer Gruppe umfassend Platin, Wolfram, (dotiertes) Zinnoxid, monokristallines Silizium, Polysilizium, Molybdän, Titan, Tantal, Titan-Wolfram Legierung, Metallsilizid, Aluminium, Graphit und Kupfer.

[0058] Die Richtungsangaben vertikal und horizontal (bzw. lateral) beziehen sich bevorzugt auf eine Vorzugsrichtung in welcher die schwingfähige Membran zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids ausgerichtet ist. Bevorzugt ist die schwingfähige Membran horizontal zwischen mindestens zwei Seitenbereichen eines Trägers aufgehängt, während die vertikale Richtung (Interaktionsrichtung mit dem Fluid) zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen orthogonal dazu vorliegt. Im Falle eines MEMS-Lautsprechers entspricht die vertikale (Interaktions-)richtung der vertikalen Schallemissionsrichtung des MEMS-Lautsprechers. Vertikal meint in dem Fall bevorzugt die Richtung der Schallemission, während horizontal eine dazu orthogonale Richtung meint. Im Falle eines MEMS-Mikrofons entspricht die vertikale (Interaktions-)richtung der vertikalen Schalldetektionsrichtung des MEMS-Mikrofons. Vertikal meint in dem Fall bevorzugt die Richtung der Schalldetektion bzw. Aufnahme, während horizontal eine dazu orthogonale Richtung meint.

[0059] Die vertikalen Abschnitte der schwingfähigen

Membran bezeichnen somit bevorzugt Abschnitte der schwingfähigen Membran, welche in Emissionsrichtung eines MEMS-Lautsprechers bzw. Detektionsrichtung eines MEMS-Mikrofons ausgerichtet sind.

[0060] Während die schwingfähige Membran bevorzugt horizontal zur Schallemissionsrichtung oder Schall-detektionsrichtung ausgerichtet vorliegt, werden die Schallwellen durch eine Aktuierung der vertikalen Abschnitte erzeugt oder umgekehrt detektiert.

[0061] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der Träger zwei Seitenbereiche zwischen welchen die schwingfähige Membran in horizontaler Richtung angeordnet vorliegt.

[0062] Bei dem Träger handelt es sich bevorzugt um eine Rahmenstruktur, welche im Wesentlichen durch eine durchgehende äußere Umrandung in Form von Seitenwänden eines frei bleibenden flächigen Bereichs gebildet wird. Die Rahmenstruktur ist dabei bevorzugt stabil und biegesteif. Bei einer eckigen Rahmenform (dreieckiger, viereckiger, sechseckiger oder allgemeiner mehreckiger Umriss) werden die einzelnen Seitenbereiche, die die Rahmenstruktur bevorzugt im Wesentlichen bilden, insbesondere Seitenwände genannt.

[0063] Die schwingfähige Membran wird bevorzugt von mindestens zwei Seitenwänden des Trägers gehalten. In den beispielhaften Fig. 1-9 sind die beiden Seitenwände im Querschnitt zu sehen. Bevorzugt umfasst der bevorzugte Träger jedoch vier Seitenbereiche, mit zusätzlichen Stirnflächen in der Regel parallel zum gezeichneten Querschnitt. Diese weiteren zwei Seitenwände spannen die Rahmstruktur auf.

[0064] Die schwingfähige Membran ist bevorzugt flächig innerhalb des freibleibenden Fläche aufgehängt. Die flächige Ausbreitung der schwingfähigen Membran kennzeichnet eine horizontale Richtung, während die vertikalen Abschnitte orthogonal dazu vorliegen. In Bezug auf die Stirnflächen kann die Membran an diesen Seitenwänden angehaftet sein oder dort zwecks größerer Beweglichkeit geschlitzt sein. Vorteilhaft kann der Schlitz einen dynamischen Hochpass darstellen, welcher beispielsweise ein Frontvolumen und Rückvolumen miteinander koppelt.

[0065] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird der Träger aus einem Substrat gebildet, bevorzugt ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus monokristallinem Silizium, Polysilizium, Siliziumdioxid, Siliziumcarbid, Siliziumgermanium, Siliziumnitrid, Nitrid, Germanium, Kohlenstoff, Galliumarsenid, Galliumnitrid, Indiumphosphid und Glas.

[0066] Diese Materialien sind in der Halbleiter- und/oder Mikrosystemherstellung einfach und kostengünstig zu bearbeiten und eignen sich für eine Herstellung im großen Maßstab. Die Trägerstruktur kann aufgrund der Materialien und/oder Herstellungsweisen flexibel hergestellt werden. Insbesondere ist bevorzugt eine Herstellung des MEMS-Wandlers umfassend eine schwingfähige Membran zusammen mit einem Träger in einem (Halbleiter-)prozess, bevorzugt auf einem Wafer

möglich. Hierdurch wird die Herstellung weiter vereinfacht und verbilligt, sodass kostengünstig ein kompakter und robuster MEMS-Wandler bereitgestellt werden kann.

[0067] In einer bevorzugten Ausführungsform wird die schwingfähige Membran durch eine Lamellenstruktur oder Mäanderstruktur gebildet. Bevorzugt bezieht sich die Angabe einer Lamellen- oder Mäanderstruktur auf die Form der schwingfähigen Membran im Querschnitt.

[0068] Eine Lamellenstruktur bezeichnet bevorzugt eine Anordnung gleichartiger, parallel verlaufener Lagen, welche bevorzugt die vertikalen Abschnitte bilden. Die einzelnen Lamellen sind dabei bevorzugt mit ihrer Fläche parallel zur vertikalen Richtung, bevorzugt einer Emissions- oder Detektionsrichtung ausgerichtet. Bevorzugt sind die Lamellen mehrlagig aufgebaut und bilden einen mechanischem Biomorph. Beispielsweise können die Lamellen jeweils eine Aktuatorlage sowie eine passive Lage aus einem Stützmaterial und/oder zwei verschiedenen steuerbaren Aktuatorlagen umfassen.

[0069] Es kann dabei bevorzugt sein, dass die Lamellen flächig sind, das bedeutet insbesondere, dass ihre Ausdehnung in jeder der zwei Dimensionen (Höhe, Breite) ihrer Fläche größer ist als in einer hierzu senkrechten Dimension (der Dicke). Beispielsweise können Größenverhältnisse von mindestens 2:1, bevorzugt mindestens 5:1, 10:1 oder mehr bevorzugt sein.

[0070] Bevorzugt weist die schwingfähige Membran eine Vielzahl von Lamellen auf, welche die vertikalen Abschnitte bilden. Beispielsweise können 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 oder mehr Lamellen bevorzugt sein. Hierdurch wird ein hoher Wirkungsgrad für eine gewünschte Schallemission oder Schalldetektion auf engstem Raum realisiert.

[0071] In der Ausführungsform wird die schwingfähige Membran bevorzugt durch die Lamellen als vertikale Abschnitte gebildet, welche über leitfähige Brücken oder horizontale Abschnitte miteinander verbunden sind. Als Brücken eignen sich beispielsweise Metallbrücken (vgl. Fig. 9) oder auch Brücken aus anderen leitfähigen Materialien. Die leitfähigen Brücken gewährleisten zum einen die mechanische Integrität der schwingfähigen Membran. Zum andern erlauben die leitfähigen Brücken vorteilhaft eine Kontaktierung sämtliche Lamellen mittels endseitiger Elektroden. Vorteilhaft können die Lamellen somit mit geringem Steuerungs- sowie Herstellungsaufwand synchron zu horizontalen Schwingungen angeregt werden oder selbstige detektieren.

[0072] Eine Mäanderstruktur bezeichnet bevorzugt eine aus einer Abfolge zueinander orthogonaler Abschnitte im Querschnitt gebildete Struktur. Bei den zueinander orthogonalen Abschnitten handelt es sich bevorzugt um vertikale und horizontale Abschnitte der schwingfähigen Membran. Besonders bevorzugt ist die Mäanderstruktur im Querschnitt rechteckig. Die Mäanderstruktur entspricht somit bevorzugt einer entlang der Breite gefalteten Membran. Im Sinne der Erfindung kann eine schwingfähige Membran daher bevorzugt auch als Faltenbalg

bezeichnet werden. Die parallelen Falten des Faltenbalges bilden bevorzugt die vertikalen Abschnitte. Die Verbindungsabschnitte zwischen den Falten bilden bevorzugt die horizontalen Abschnitte. Bevorzugt sind die vertikalen Abschnitte länger als die horizontalen Abschnitte, beispielsweise um einen Faktor 1,5, 2, 3, 4 oder mehr.

[0073] In Bezug auf die Funktion einer schwingfähigen Membran in Mäanderform zur Erzeugung oder Aufnahme von Schallwellen sind analog zu den vorstehend beschriebenen Lamellen, die vertikalen Abschnitte maßgeblich. Bevorzugt sind die vertikalen Abschnitte mehrlagig aufgebaut und bilden einen mechanischen Biomorph. Beispielsweise können die vertikalen Abschnitte jeweils eine Aktuatorlage sowie eine passive Lage aus einem Stützmaterial und/oder zwei verschiedenen steuerbaren Aktuatorlagen umfassen. Die horizontalen Abschnitte der gefalteten Membran können bevorzugt identisch zu den vertikalen Abschnitten aufgebaut sein (vgl. u.a. Fig. 3-7). Es kann aber ebenso bevorzugt sein, dass die horizontalen Abschnitte - im Gegensatz zu den vertikalen Abschnitten - keine Aktuatorlage aufweisen, sondern lediglich eine mechanische Stützschiicht und/oder eine elektrisch leitfähige Schicht.

[0074] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die mindestens eine Lage aus einem Aktuormaterial der schwingfähigen Membran eine durchgängige Lage. Durchgängig meint bevorzugt, dass im Querschnittsprofil keine Unterbrechung vorliegen. Demgemäß ist es in der genannten Ausführungsform bevorzugt, dass sowohl eine durchgängige Lage von Aktuormaterial in den vertikalen, als auch horizontalen Abschnitten vorliegt. Eine durchgängige Lage ist besonders einfach in der Herstellung und gewährleistet eine synchrone Aktuierung beim Betrieb eines MEMS-Lautsprechers.

[0075] Die Performance des MEMS-Wandlers, insbesondere eines MEMS-Lautsprechers oder MEMS-Mikrofons, kann wesentlich von der Anzahl und/oder Dimensionierung der vertikalen Abschnitte bestimmt werden.

[0076] In bevorzugten Ausführungsformen umfasst die schwingfähige Membran mehr als 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100 oder mehr vertikale Abschnitte.

[0077] In bevorzugten Ausführungsformen umfasst die schwingfähige Membran weniger als 10000, 5000, 2000 oder 1000 oder weniger vertikale Abschnitte.

[0078] Die bevorzugte Anzahl von vertikalen Abschnitten führt zu hohen Schallleistung auf kleinsten Chip-Oberflächen, ohne dass das Klangbild oder die Audioqualität leidet.

[0079] Bevorzugt sind die vertikalen Abschnitte flächig, das bedeutet insbesondere, dass ihre Ausdehnung in jeder der zwei Dimensionen (Höhe, Breite) ihrer Fläche größer ist als in einer hierzu senkrechten Dimension (der Dicke). Beispielsweise können Größenverhältnisse von mindestens 2:1, bevorzugt mindestens 5: 1, 10: 1 oder mehr bevorzugt sein.

[0080] Im Sinne der Erfindung entspricht die Höhe der vertikalen Abschnitte bevorzugt der Dimension entlang der Richtung der Schallemission oder Schalldetektion,

während die Dicke der vertikalen Abschnitte bevorzugt Summe der Schichtdicke der eine oder mehreren Lagen entspricht, welche die vertikalen Abschnitte bilden. Die Länge der vertikalen Abschnitte entspricht bevorzugt einer zur Höhe bzw. Dicke orthogonalen Dimension. In den Querschnittsansichten der unten aufgeführten Abbildungen sind Höhe und Dicke schematisch (nicht zwangsläufig skalengetreu) dargestellt, während die Dimension der Länge einer (nicht sichtbaren) Zeichnungstiefe der Abbildungen entspricht.

[0081] In einer bevorzugten Ausführungsform beträgt die Höhe der vertikalen Abschnitte zwischen 1 μm und 1000 μm , bevorzugt zwischen 10 μm und 500 μm . Auch Zwischenbereiche aus den vorgenannten Bereichen können bevorzugt sein wie beispielsweise 1 μm bis 10 μm , 10 μm bis 50 μm , 50 μm bis 100 μm , 100 μm bis 200 μm , 200 μm bis 300 μm , 300 μm bis 400 μm , 400 μm bis 500 μm , 500 μm bis 700 μm , 700 μm bis 800 μm , 800 μm bis 900 μm oder auch 900 μm bis 1000 μm . Ein Fachmann erkennt, dass die vorgenannten Bereichsgrenzen auch kombiniert werden können, um weitere bevorzugte Bereiche zu erhalten, wie beispielsweise 10 μm bis 200 μm , 50 μm bis 300 μm oder auch 100 μm bis 600 μm .

[0082] In einer bevorzugten Ausführungsform beträgt die Dicke der vertikalen Abschnitte zwischen 100 nm und 10 μm , bevorzugt zwischen 500 nm und 5 μm . Auch Zwischenbereiche aus den vorgenannten Bereichen können bevorzugt sein wie beispielsweise 100 nm bis 500 nm, 500 nm bis 1 μm , 1 μm bis 1,5 μm , 1,5 μm bis 2 μm , 2 μm bis 3 μm , 3 μm bis 4 μm , 4 μm bis 5 μm , 5 μm bis 6 μm , 6 μm bis 7 μm , 7 μm bis 8 μm , 8 μm bis 9 μm oder auch 9 μm bis 10 μm . Ein Fachmann erkennt, dass die vorgenannten Bereichsgrenzen auch kombiniert werden können, um weitere bevorzugte Bereiche zu erhalten, wie beispielsweise 500 nm bis 3 μm , 1 μm bis 5 μm oder auch 1500 nm bis 6 μm .

[0083] In einer bevorzugten Ausführungsform beträgt die Länge der vertikalen Abschnitte zwischen 10 μm und 10 mm, bevorzugt zwischen 100 μm und 1 mm. Auch Zwischenbereiche aus den vorgenannten Bereichen können bevorzugt sein wie beispielsweise 10 μm bis 100 μm , 100 μm bis 200 μm , 200 μm bis 300 μm , 300 μm bis 400 μm , 400 μm bis 500 μm , 500 μm bis 1000 μm , 1 mm bis 2 mm, 3 mm bis 4 mm, 4 mm bis 5 mm, 5 mm bis 8 mm oder auch 8 mm bis 10 mm. Ein Fachmann erkennt, dass die vorgenannten Bereichsgrenzen auch kombiniert werden können, um weitere bevorzugte Bereiche zu erhalten, wie beispielsweise 10 μm bis 500 μm , 500 μm bis 5 μm oder auch 1 mm bis 5 mm.

[0084] Mit den vorgenannten bevorzugten Dimensionierungen der schwingfähigen Membran bzw. der vertikalen Abschnitte kann eine besonders kompakter MEMS-Wandler, insbesondere MEMS-Lautsprecher oder MEMS-Mikrofon bereitgestellt werden, welcher gleichzeitig eine hohe Leistungsfähigkeit mit ausgezeichnetem Klangbild oder Audioqualität verbindet.

[0085] In einer bevorzugten Ausführungsform der Er-

findung wird die schwingfähige Membran durch eine Mäanderstruktur gebildet mit abwechselnden vertikalen und horizontalen Abschnitten, wobei an mindestens zwei der horizontalen Abschnitte Haltestrukturen angebracht vorliegen, welche mittelbar oder unmittelbar mit dem Träger verbunden sind. Die Haltestrukturen können beispielsweise durch Substratmaterial des Trägers bereitgestellt werden, d.h. die Haltestrukturen können unmittelbar aus dem Substrat eines *bottom wafers* geformt werden. Alternativ ist es auch möglich, dass die Haltestrukturen als separate Grate bzw. Erhöhungen eines *top wafer* mit den horizontalen Abschnitten verbunden werden.

[0086] Die Haltestrukturen können bevorzugt ein- und/oder zweiseitig an der schwingfähigen Membran, d. h. bevorzugt an oberen und/oder unteren horizontalen Abschnitten angebracht vorliegen.

[0087] Insbesondere bei Aufhängung einer größer dimensionierten schwingfähigen Membran zwischen den Seitenwänden eines Trägers erlaubt die Verwendung von Haltestrukturen vorteilhaft eine Stabilisierung, ohne die Schallerzeugung oder Schallaufnahme negativ zu beeinflussen.

[0088] Da die horizontalen Abschnitte bei einer Mäanderform zumindest im Wesentlichen mechanisch neutral sind, führt eine Arretierung selbiger mittels der Haltestruktur vorteilhaft zu keinen unerwünschten Spannungen zwischen Membran und Haltestruktur bzw. Träger.

[0089] Für den Aufbau der schwingfähigen Membran können verschiedene Lagen vorgesehen sein, um die beschriebene Aktuierung und Anregung zu horizontalen Schwingungen oder deren Detektion zu gewährleisten.

[0090] Eine Kontaktierung einer oder mehrerer Aktuatorlage(n) und/oder einer oder mehrere Lagen aus einem mechanischen Stützmaterial und somit das Anlegen oder Detektieren einer elektrischen Spannung kann über die endseitigen Elektroden unmittelbar erfolgen oder durch eine Lage aus einem leitfähigen Material unterstützt werden,

[0091] In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die schwingfähige Membran daher mindestens eine Lage aus einem leitfähigen Material.

[0092] In bevorzugten Ausführungsformen ist das leitfähige Material ausgewählt ist aus einer Gruppe umfassend Platin, Wolfram, (dotiertes) Zinnoxid, monokristallines Silizium, Polysilizium, Molybdän, Titan, Tantal, Titan-Wolfram Legierung, Metallsilizid, Aluminium, Graphit und Kupfer.

[0093] In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die schwingfähige Membran drei Lagen, wobei eine obere Lage von einem leitfähigen Material gebildet wird und mit einer oberen Elektrode verbunden ist, eine mittlere Lage aus dem Aktuormaterial gebildet wird und eine untere Lage von einem leitfähigen Material, gebildet wird.

[0094] Bevorzugt kann das leitfähige Material der oberen und/oder untere Lage ein mechanisches Stützmaterial sein, sodass dieser Lage eine Doppelfunktion zu kommt. Zum einen gewährleistet die Lage einer Kontaktierung der Aktuatorlage mit einem elektrischen Potenti-

al, welches an den endseitigen Elektroden angelegt werden kann. Zum anderen fungiert diese als mechanische Stützschiicht in der beschriebenen Weise zur Erzeugung von horizontalen Wölbungen bzw. Schwingungen bei entsprechender Aktuierung der Aktuatorlage.

[0095] Eine derartige Ausführungsform kann mittels einfacher Herstellungsschritte erhalten werden, wie beispielsweise in der Figur 2 illustriert. In der in Fig. 2G, Fig. 3 und 4 gezeigten bevorzugten Ausführungsform weist die schwingfähige Membran eine Mäanderstruktur mit einer durchgängigen oberen Lage aus einem leitfähigen Material (Metall) auf, einer durchgängigen mittleren Lage aus einem Aktuormaterial und einer unteren Lage aus einem leitfähigen mechanischen Stützmaterial. Eine umgekehrte Reihenfolge der Lagen oder einer weiteren zusätzlichen leitfähigen Lage im Kontakt mit der mechanischen Stützschiicht und/oder Aktuatorlage zur verbesserten Kontaktierung können ebenso vorgesehen sein.

[0096] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform umfasst die schwingfähige Membran zwei Lagen aus einem Aktuormaterial, welche durch eine mittlere Lage aus einem leitfähigen Material, bevorzugt Metall, getrennt werden, wobei die mittlere Lage mit einer ersten Elektrode verbunden vorliegt und mindestens eine der beiden Lagen aus einem Aktuormaterial über eine weitere Lage aus einem leitfähigem Material, bevorzugt einem Metall, mit einer zweiten Elektrode kontaktiert vorliegen.

[0097] Wie obig erläutert, können in einer bevorzugten Ausführungsform auch zwei Aktuatorlagen verwandt werden, um beispielsweise mittels unterschiedlicher Ansteuerung die vertikalen Abschnitte in horizontale Schwingungen zu versetzen. Um die elektrische Potentialänderungen von den endseitigen Elektroden an die jeweilige Aktuatorlage zu übertragen, können bevorzugt zwei oder mehr Zwischenschichten aus einem leitfähigen Material vorgesehen sein. Bevorzugt dienen die Lagen aus leitfähigem Material, beispielsweise aus einem Metall, in dem Fall bevorzugt ausschließlich der Kontaktierung und nicht als mechanische Stützschiicht. Die im Sinne eines Bimorphs für einen MEMS-Lautsprecher zur Wölbung bzw. Schwingung erforderliche Spannung wird durch eine unterschiedliche Steuerung der Aktuatorlagen selbst induziert.

[0098] Bevorzugt können die Lagen aus einem leitfähigen Material, wie beispielsweise Metall, daher besonders dünn (weniger als 500 nm, bevorzugt weniger als 200 nm) ausgeführt werden.

[0099] In der in Fig. 5 wird beispielhaft eine derartige bevorzugten Ausführungsform gezeigt. Diese weist eine schwingfähige Membran als Mäanderstruktur mit zwei Lagen aus einem Aktuormaterial auf, welche durch eine mittlere Lage aus einem leitfähigen Material (Metall) getrennt werden. Die mittlere Lage ist mit einer ersten endseitigen Elektrodenpad verbunden, während die obere Aktuatorlage über eine weitere Lage aus einem leitfähigen Material mit einer zweiten endseitigen Elektrode kontaktiert vorliegt. Eine untere Lage aus einem leitfähi-

gen Material liegt mit keiner der Elektroden kontaktiert vor. Eine umgekehrte Reihenfolge der Lagen oder ein Verzicht auf die untere Lage aus leitfähigem Material, welche in keinem Kontakt mit den Elektroden steht kann ebenso vorgesehen sein.

[0100] Bei den vorbeschriebenen Ausführungsform ist es bevorzugt, dass die Aktuatorlage(n) sowie ggf. die mechanischen Stützlagen durchgängig sind, d.h. im Querschnitt von einem Ende der Membran (an welcher bevorzugt eine erste Elektrode vorliegt) über mehrere abwechselnd horizontale und vertikale Abschnitte, bis zu einem zweiten Ende der Membran verlaufen (an welcher bevorzugt eine zweite Elektrode vorliegt).

[0101] Von den Erfindern wurde erkannt, dass für das Wirkungsprinzip des MEMS-Wandlers, bevorzugt eines MEMS-Lautsprechers, eine Bereitstellung eines mechanischen Biomorphs in den vertikalen Abschnitten ausreichend ist.

[0102] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die mindestens eine Aktuatorlage nicht durchgängig, sondern liegt lediglich in den vertikalen Abschnitten, nicht aber in den horizontalen Abschnitten vor. Hierbei kann es sowohl bevorzugt sein, dass eine ggf. vorhandene mechanische Stützlage durchgängig verläuft, als auch nicht durchgängig verläuft und beispielsweise nur in vertikalen Abschnitten bereitgestellt wird. Um die vertikalen Abschnitte dennoch mittels endseitiger Elektroden kontaktieren zu können, ist es bevorzugt eine oder mehrere durchgängige Lagen aus einem leitfähigen Material (bevorzugt Metall) aufzutragen.

[0103] Ein bevorzugtes Herstellungsverfahren für eine Ausführungsform mit einer nicht-durchgängigen Aktuatorlage wird in der Figur 7 illustriert. Hierbei kann eine gezielte Spacer Ätzung der Aktuatorlage in horizontalen Abschnitten erfolgen, sodass nur noch die vertikalen Abschnitte der Membran eine Lage aus einem Aktuormaterial aufweisen. Eine durchgängige Lage aus einem mechanischen Stützmaterial kann gleichzeitig dielektrisch sein, um einen Kurzschluss zwischen einer oberen und unteren leitfähigen Lage (auch als Top- und Bottom-Elektrode bezeichnet) zu vermeiden.

[0104] Die Ausführungsform zeichnet sich durch ein besonders effektive Aktuierung und hohe Leistungsperformance aus, bei welcher gezielt lediglich die vertikalen Abschnitte zum alternierenden Wölben bzw. Schwingen angeregt werden, während die horizontalen Abschnitte mechanisch neutral verbleiben. Vorteilhaft kann das verdrängte Volumen pro Phase der Aktuierung nochmals gesteigert werden.

[0105] Bei den vorbeschriebenen Ausführungsformen wird bevorzugt eine schwingfähige Membran in Mäanderform durch Aufbringen oder Ätzen von entsprechend funktionellen Lagen erhalten.

[0106] Alternativ kann eine schwingfähige Membran auch durch Bereitstellung von vertikalen Abschnitten und deren Verbindung mittels Metallbrücken hergestellt werden.

[0107] In einer bevorzugten Ausführungsform umfas-

sen die vertikalen Abschnitte der schwingfähigen Membran zwei Lagen, wobei eine erste Lage aus einem Aktuormaterial besteht, eine zweite Lage aus einem leitfähigen Stützmaterial besteht und wobei die vertikalen Abschnitten über horizontale Metallbrücken verbunden vorliegen.

[0108] Wie in der Fig. 9 illustriert können bevorzugt hierzu mehrere einzelner Piezokeramikelemente umfassend eine Lage aus einem mechanischen Stützmaterial und eine Lage aus einem piezoelektrischen Material, sowie einer Opferlage bereitgestellt werden. Durch mehrere Verfahrensschritte umfassend eine Durchkontaktierung und Metallfüllung sowie ein Stapeln und Dicing der Piezokeramikelemente kann vorteilhaft auf robuste und prozesseffiziente Weise eine Membran mit hohem Wirkungsgrad erhalten werden.

[0109] In der Ausführungsform ist keine durchgängige, homogene leitfähige Lage notwendig. Stattdessen wird eine die Kontaktierung der Aktuatorlage in den vertikalen Abschnitten durch die Metallbrücken sowie einem leitfähigen mechanischen Stützmaterial gewährleistet.

[0110] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die schwingfähige Membran mit einer Lage aus einem Antihafmaterial beschichtet. Mit Antihafmaterialien sind insbesondere Materialien mit geringen Oberflächenenergien gemeint, welche weitestgehend inert gegenüber der Umwelt sind und somit eine Ablagerung von Staub oder anderen unerwünschten Partikeln vermeiden. Beispielhaft können die Antihafmaterialien durch Kohlenstoffschichten, z.B. diamond-like carbon (DLC) Schichten oder auch Schichten umfassend Perfluorcarbone (PFC), wie beispielsweise Polytetrafluorethylen (PTFT) gebildet werden.

[0111] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der MEMS-Wandler, bevorzugt ein MEMS-Lautsprecher eine Steuereinheit, welche konfiguriert ist für eine Ansteuerung der mindestens einen Elektrode, sodass die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt werden. Bevorzugt ist die Steuereinheit für eine Ansteuerung der Elektroden konfiguriert, welche eine Frequenz der horizontalen Schwingungen zwischen 10 Hz und 20 kHz gewährleistet.

[0112] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der MEMS-Wandler, bevorzugt ein MEMS-Mikrofon, eine Steuereinheit, welche konfiguriert ist für eine Detektion eines von der mindestens einen Elektrode bereitgestellten elektrischen Signals, welches durch horizontale Schwingungen der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte erzeugt wurde. Bevorzugt ist die Steuereinheit eines MEMS-Mikrofons für eine Abnahme und Aufbereitung eines elektrischen Signals konfiguriert, welche eine Frequenz der horizontalen Schwingungen zwischen 10 Hz und 20 kHz entspricht und mithin für eine Schalldetektion im hörbaren Bereich eingerichtet ist.

[0113] Die Steuereinheit ist mithin bevorzugt dafür konfiguriert und eingerichtet mittels elektrischer Signale die schwingfähige Membran (bzw. die Aktuatorlage(n) in

den vertikalen Abschnitten), zu horizontalen Schwingungen und einer Schallemission im hörbaren Frequenzbereich anzusteuern oder aber bei Anregung der schwingfähigen Membran ein entsprechendes elektrisches Signal aufzunehmen und aufzubereiten.

[0114] Zu diesem Zweck kann die Steuereinheit bevorzugt eine Datenverarbeitungseinheit umfassen.

[0115] Im Sinne der Erfindung bezeichnet eine Datenverarbeitungseinheit bevorzugt eine Einheit, welche zum Empfang, Senden, Speichern und/oder Verarbeiten von Daten, bevorzugt im Hinblick auf eine Ansteuerung der Elektroden oder Abnahme eines an den Elektroden bereitgestellten elektrischen Signals, geeignet und konfiguriert ist. Die Datenverarbeitungseinheit umfasst bevorzugt einen integrierten Schaltkreis, beispielsweise auch eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung, einen Prozessor, einen Prozessorchip, Mikroprozessor oder Mikrokontroller zur Verarbeitung von Daten, sowie optional einen Datenspeicher, einen *random access memory* (RAM), einen *read-only memory* (ROM) oder auch einen *flash memory* zur Speicherung der Daten.

[0116] In bevorzugten Ausführungsformen liegt die Steuereinheit neben weiteren Komponenten des MEMS-Wandlers (Träger, schwingfähige Membran) auf einer Leiterplatte bzw. Platine integriert vor. D.h. bevorzugt erfolgt eine nahtlose Integration des MEMS-Wandlers mit der Elektronik, welche für die Ansteuerung oder Detektion notwendig ist. Neben der Steuereinheit können auch weitere elektronische Komponenten, wie beispielsweise eine Kommunikationsschnittstelle (bevorzugt drahtlos, z. B. Bluetooth), ein Verstärker, ein Filter oder eine Sensorik, auf ein und derselben Leiterplatte installiert vorliegen.

[0117] Vorteilhaft wird eine kompakte Gesamtlösung erhalten, bei der ein MEMS-Wandler, bevorzugt ein MEMS-Lautsprecher oder MEMS-Mikrofon, zusammen mit gewünschter Elektronik auf engstem Raum und bevorzugt mit kostengünstiger und für die Massenherstellung geeigneter CMOS-Prozessierung bereitgestellt werden kann.

[0118] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform liegt die von dem Träger gehaltene schwingfähige Membran in einer Frontseite eines Gehäuses angeordnet vor, welches ein rückseitiges Resonanzvolumen umschließt. Die Schallemission eines solchen MEMS-Lautsprechers erfolgt somit bevorzugt zur offenen Frontseite (*sound port*) wobei das Klangbild insbesondere für tiefere Frequenzen durch das rückseitige Resonanzvolumen verbessert wird.

[0119] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform liegt in dem Gehäuse eine Ventilationsöffnung zur Vermeidung akustischer Kurzschlüsse und/oder zur Unterstützung des Klangbildes vor. Die Ventilationsöffnung ist bevorzugt klein im Vergleich zum *Sound port* und kann beispielsweise eine maximale Ausdehnung von weniger als 100 µm, bevorzugt weniger als 50 µm aufweisen.

[0120] In einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung ein Herstellungsverfahren für einen MEMS-Wandler, be-

vorzugt einem MEMS-Lautsprecher oder MEMS-Mikrofon, wie vorstehend beschrieben, umfassend die folgenden Schritte:

- 5 - Ätzen eines Substrats, vorzugsweise von einer Vorderseite, zur Ausbildung einer Strukturierung, vorzugsweise einer Mäanderstruktur
- Optionales Auftragen eines Ätzstops
- 10 - Aufbringen mindestens zweier Lagen, wobei mindestens erste Lage ein Aktuatormaterial und eine zweite Lage ein mechanisches Stützmaterial umfassen oder mindestens zwei Lagen ein Aktuatormaterial umfassen
- 15 - Kontaktieren der ersten und/oder zweiten Lage mit einer Elektrode
- 20 - Ätzen, vorzugsweise von der Rückseite, und optionale Entfernung des Ätzstops,

sodass eine schwingfähige Membran, vorzugsweise in Form einer Mäanderstruktur, von einem durch das Substrat (8) gebildeten Träger (4) gehalten wird, wobei die schwingfähige Membran (1) zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids in einer vertikalen Richtung mindestens zwei oder mehr vertikale Abschnitte (2) umfasst, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder

sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

[0121] Der durchschnittliche Fachmann erkennt, dass technische Merkmale, Definitionen und Vorteile bevorzugter Ausführungsformen des beschriebenen MEMS-Wandlers, bevorzugt MEMS-Lautsprechers oder MEMS-Mikrofons, auch für das beschriebene Herstellungsverfahren gelten. Vorzugsweise dient das beschriebene Herstellungsverfahren der Bereitstellung eines MEMS-Wandlers mit einer gefalteten schwingfähigen Membran mit einer Mäanderstruktur. Beispiele bevorzugter Herstellungsschritte werden in den Fig. 2A-G oder Fig. 8A-J beschrieben.

[0122] Als Substrat kann z. B. eines der bevorzugten, vorstehend genannten Materialien verwendet werden. Beim Ätzen kann ein Rohling, beispielsweise ein Wafer, in die gewünschte Grundform der Mäanderstruktur gebracht werden. In einem nächsten Schritt werden bevorzugt die Lagen für die schwingfähige Membran aufgebracht.

[0123] Ein Aufbringen der mindestens einer Lage eines leitfähigen Materials umfasst bevorzugt neben dem Aufbringen einer Lage ebenso das Aufbringen mehrerer

Lagen und insbesondere eines Lagensystems. Ein Lagensystem umfasst dabei mindestens zwei planvoll zueinander aufgebrachte Lagen. Das Aufbringen einer Lage oder eines Lagensystems dient bevorzugt der Definition der schwingfähigen Membran umfassend vertikale Abschnitte, welche zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können.

[0124] Bevorzugt kann das Aufbringen ausgesucht sein aus der Gruppe umfassend physikalische Gasphasenabscheidung (PVD), insbesondere thermisches Verdampfen, Laserstrahlverdampfen, Lichtbogenverdampfen, Molekularstrahlepitaxie, Sputtern, chemische Gasphasenabscheidung (CVD) und/oder Atomlagenabscheidung (ALD). Insbesondere kann das Aufbringen beispielsweise ein Abscheiden, z. B. im Falle eines Substrats aus Polysilizium, umfassen.

[0125] Ein Ätzen und/oder eine Strukturierung kann bevorzugt ausgesucht sein aus der Gruppe umfassend Trockenätzen, nasschemisches Ätzen und/oder Plasmaätzen, insbesondere Reaktives Ionenätzen, Reaktives Ionenätzen (Bosch-Prozess).

[0126] Sollte eine weitere Strukturierung der schwingfähigen Membran gewünscht sein, kann diese z. B. durch weitere Ätzprozesse vorgenommen werden. Ebenso kann zusätzliches Material abgeschieden werden oder eine Dotierung durch übliche Verfahren vorgenommen werden.

[0127] Zur Kontaktierung der Lagen kann zusätzlich geeignetes Material, wie z. B. Kupfer, Gold und/oder Platin durch gängige Prozesse abgeschieden werden. Hierfür können bevorzugt physikalische Gasphasenabscheidung (PVD), chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder elektrochemische Abscheidung zum Einsatz kommen.

[0128] Mittels der Prozessschritte kann eine fein strukturierte schwingfähige Membran mit einer gewünschten Definition von vertikalen und horizontalen Abschnitten bereitgestellt werden, welche bevorzugt zwischen zwei Seitenbereich eines stabilen Trägers aufgehängt sind und Abmessungen im Mikrometerbereich aufweist. Die Herstellungsschritte gehören zu Standardverfahrensschritten der Halbleiterprozessierung, sodass diese sich bewährt haben und zudem für eine Massenherstellung geeignet sind.

[0129] In einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung ein Herstellungsverfahren für einen MEMS-Wandler wie vorstehend beschrieben, umfassend die folgenden Schritte:

- Bereitstellen mehrerer einzelner Piezokeramikelemente, umfassend eine Opferlage, eine Lage aus einem leitfähigen Material und eine Lage aus einem piezoelektrischen Material
- Definition von Löchern für eine Durchkontaktierung in den Piezokeramikelementen und Metallfüllung
- Stapeln der Piezokeramikelemente und optionales

Schneiden (Dicing), sodass ein Stapel von Piezokeramikelementen erhalten wird, welcher durch Metallbrücken verbunden ist

- 5 - Entfernung der Opferlage und Einbringen des Stapels der Piezokeramikelemente in einen Träger, wobei eine Kontaktierung des ersten und letzten Piezokeramikelementes mit jeweils einer Elektrode erfolgt,

10 sodass eine schwingfähige Membran, vorzugsweise in Form einer Lamellenstruktur, von einem durch das Substrat gebildeten Träger gehalten wird, wobei die schwingfähige Membran zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids in einer vertikalen Richtung mindestens zwei oder mehr vertikale Abschnitte umfasst, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind

15 oder sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

25 **[0130]** Der durchschnittliche Fachmann erkennt, dass technische Merkmale, Definitionen und Vorteile bevorzugter Ausführungsformen des beschriebenen MEMS-Wandlers, bevorzugt eines MEMS-Lautsprechers oder MEMS-Mikrofons, auch für das beschriebene Herstellungsverfahren gelten. Vorzugsweise dient das beschriebene Herstellungsverfahren der Bereitstellung eines MEMS-Wandlers mit einer schwingfähigen Membran mit einer Lamellenstruktur, wobei die Lamellen mechanische Bimorphe sind und durch Metallbrücken verbunden vorliegen. Beispiele bevorzugter Herstellungsschritte werden in der Fig. 9 A-F illustriert.

30 **[0131]** In dem alternativen Herstellungsprozess können vorteilhaft mehrere einzelne Piezokeramikelemente verwandt werden, um mittels einer Definition von Löchern, Metallfüllung sowie einem Stapeln und Dicing eine schwingfähige Membran zu erhalten mit Lamellen als vertikale Abschnitte, welche durch Metallbrücken miteinander verbunden sind.

35 **[0132]** Als Piezokeramik werden bevorzugt keramischen Werkstoffe bezeichnet, die unter Einwirkung einer Verformung durch eine äußere Kraft eine Ladungstrennung zeigen bzw. bei Anlegen einer elektrischen Spannung eine Formänderung erfahren. Die Piezokeramikelemente umfassen bevorzugt eine piezoelektrische Lage sowie eine Lage aus einem mechanischen Stützmaterial, wie vorgehend beschrieben, sowie darüber hinaus eine Opferschicht.

45 **[0133]** Die Opferschicht dient der Prozessierung und Bereitstellung der Metallbrücken und wird selbst nicht Bestandteil der schwingfähigen Membran sein.

[0134] Bevorzugt kann es sich bei der Opferlage beispielsweise um einen Photoresist bzw. Fotolacke handeln. Diese Materialien ändern durch Bestrahlung mit

Licht, insbesondere UV-Licht, ihre Löslichkeit. Insbesondere kann es sich um einen sogenannten Positivlack handeln, dessen Löslichkeit durch eine UV-Bestrahlung ansteigt. Hierdurch kann die Opferschicht gezielt nach einer Metallfüllung zur Bereitstellung der Metallbrücken entfernt werden.

Detaillierte Beschreibung

[0135] Die Erfindung soll im Folgenden unter Verweis auf weitere Abbildungen und Beispiele erläutert werden. Die Beispiele und Abbildungen dienen der Illustration bevorzugter Ausführungsform der Erfindung, ohne diese zu beschränken.

Kurzbeschreibung der Abbildungen

[0136]

Fig. 1 Schematische Darstellung eines Querschnittes einer bevorzugten Ausführungsform eines MEMS-Lautsprechers gemäß der Erfindung A: im Ruhezustand und B: während der Aktuierung.

Fig. 2 Schematische Darstellung eines bevorzugten Herstellungsverfahrens für einen MEMS-Lautsprechers mit einer schwingfähigen Membran, welche im Querschnitt eine Mäanderform aufweist.

Fig. 3, 4 Schematische Darstellung bevorzugter Ausführungsformen eines MEMS-Lautsprecher mit einer schwingfähigen Membran in Mäanderform, deren horizontalen Abschnitte durch Haltestrukturen gestützt werden.

Fig. 5 Schematische Darstellung einer bevorzugten Ausführungsform eines MEMS-Lautsprechers mit zwei Aktuatorlagen, welche durch eine mittlere Lage aus einem leitfähigen Material getrennt werden.

Fig. 6 Schematische Darstellung bevorzugter Ansteuerungen zum Betrieb der MEMS-Lautsprecher

Fig. 7 Schematische Darstellung einer bevorzugten Integration eines MEMS-Lautsprechers in der Frontseite eines Gehäuses mit rückseitigem Resonanzvolumen.

Fig. 8 Schematische Darstellung eines bevorzugten Herstellungsverfahrens für einen MEMS-Lautsprechers mit einer schwingfähigen Membran, welche im Querschnitt eine Mäanderform aufweist, wobei nur die vertikalen Abschnitte eine Lage aus einem Aktu-

atormaterial aufweisen.

Fig. 9 Schematische Darstellung eines bevorzugten Herstellungsverfahrens für einen MEMS-Lautsprechers mit einer schwingfähigen Membran auf Basis von einzelnen Piezokeramikelementen.

Detaillierte Beschreibung der Abbildungen

[0137] Figur 1 illustriert eine bevorzugte Ausführungsform eines MEMS-Lautsprechers gemäß der Erfindung. Fig 1A zeigt einen Ruhezustand, während Fig. 1B zwei Phasen während der Aktuierung des MEMS-Lautsprechers illustriert.

[0138] Der MEMS-Lautsprecher umfasst eine schwingfähige Membran **1** zur Erzeugung von Schallwellen in eine vertikale Emissionsrichtung, wobei die schwingfähige Membran **1** von einem Träger **4** in horizontaler Lage gehalten wird. Die schwingfähige Membran **1** weist im Querschnitt eine Mäanderstruktur auf mit horizontalen **3** und vertikalen Abschnitten **2**. Die vertikalen Abschnitte sind parallel zur Emissionsrichtung ausgebildet und weisen mindestens eine Aktuatorlage auf, beispielsweise eine Lage aus einem piezoelektrischen Material. Eine Kontaktierung der schwingfähigen Membran **1** und der Aktuatorlage erfolgt bevorzugt mittels Elektroden endseitig. Zudem Zweck kann sich beispielsweise auf dem Träger **4** ein Elektrodenpad (nicht gezeigt) befinden.

[0139] Bevorzugt handelt es sich bei den vertikalen Abschnitten um mechanische Bimorphe, welche durch geeignete Ansteuerungen zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können. Zu diesem Zweck können die vertikalen Abschnitte **2** beispielsweise eine erste Lage aus einem Aktuormaterial und eine zweite Lage aus einem mechanischen Stützmaterial umfassen. Durch Ansteuerung der Aktuatorlage kann ein Stressgradient und mithin eine Wölbung bzw. Schwingung generiert werden. Ebenso kann es auch bevorzugt sein, dass die vertikalen Abschnitte **2** zwei Aktuatorlagen umfassen, welche gegenläufig angesteuert werden, um durch entsprechende relative Formänderung eine Wölbung der vertikalen Abschnitte **2** zu bewirken.

[0140] Figur 1B illustriert beispielhaft zwei Phasen während einer Aktuierung. Vorteilhaft kann durch die Mehrzahl der vertikalen Abschnitten **2** der schwingfähigen Membran **1** mit geringen horizontalen Bewegungen (Wölbung) von wenigen Mikrometern ein vergrößertes Gesamtvolumen in die vertikale Emissionsrichtung bewegt und so zur Schallerzeugung genutzt werden. Die Aktuierung erlaubt hierbei eine besonders effiziente Umsetzung, da während einer Phase nahezu das gesamte Luftvolumen zwischen den vertikalen Abschnitten entlang der Emissionsrichtung nach oben oder unten bewegt werden kann.

[0141] Figur 2 zeigt schematisch ein bevorzugtes Herstellungsverfahren zur Bereitstellung eines MEMS-Laut-

sprechers mit einer schwingfähigen Membran 1, welche im Querschnitt eine Mäanderform aufweist. Eine schwingfähige Membran mit einer Mäanderform im Querschnitt kann auch bevorzugt als gefaltete Membran oder Faltenbalg bezeichnet werden.

[0142] Fig. 2A zeigt ein Ätzen des Substrats 8 von einer Ober- bzw. Vorderseite zur Ausbildung einer Strukturierung. In dem Verfahrensschritt werden parallele tiefe Trenches (Taschen) in das Substrat 8 geätzt. Die abgeformte Struktur stellt einen Faltenbalg bzw. im Querschnitt einen Mäander dar.

[0143] Anschließend wird eine Lage eines Ätzstop 9 (Fig. 2B) aufgetragen, wobei es sich beispielsweise um TEOS oder PECVD handeln kann. Auf den Ätzstop 9 wird eine Lage aus einem mechanischen Stützmaterial 10 (Fig. 2C) und eine Lage aus einem Aktuormaterial 11 aufgetragen. Bei dem mechanischen Stützmaterial 10 kann es sich z.B. um dotiertes Polysilizium handeln, während für das Aktuormaterial 10 beispielsweise ein piezoelektrisches Material verwandt werden kann. Als Schichtdicken können beispielsweise 1 µm bevorzugt sein. Bevorzugt kann das piezoelektrische Material eine C-Axis Orientierung senkrecht zur Oberfläche aufweisen, sodass ein transversaler piezoelektrischer Effekt genutzt wird. Auch andere Orientierungen und beispielsweise die Ausnutzung eines longitudinalen Effekts können bevorzugt sein.

[0144] Fig. 2E zeigt das bevorzugte Auftragen einer ganzflächigen Top-Elektrode als eine Lage aus einem leitfähigen Material 12. Eine endseitige Kontaktierung kann beispielsweise mittels eines Elektrodenpads 13 erfolgen (Fig. 2 F).

[0145] Fig. 2F und 2G illustrieren ein weiteres Ätzen des Substrates 8 von der Rückseite bzw. Unterseite, und die Entfernung des Ätzstops.

[0146] Durch die Herstellungsschritte 2A-G wird somit eine schwingfähige Membran 1 erhalten, welche im Querschnitt eine Mäanderstruktur aufweist. Vorteilhaft erlaubt eine durchgängige Aktuatorlage 11 und die Bereitstellung endseitiger Kontaktierungen 13 eine effiziente Aktuierung der vertikalen Abschnitte 2 zu horizontalen Schwingungen (vgl. Fig. 1). Wie in Fig. 2G ersichtlich erfolgt bevorzugt eine Ansteuerung mittels zweier Elektroden, so wird die Aktuatorlage 12 bevorzugt sowohl von einer Frontseite (Top-Elektrode, leitfähige Schicht 12) als auch von einer Rückseite (Bottom-Elektrode, über leitfähiges mechanisches Stützmaterial 10) kontaktiert (vgl. Fig. 6A).

[0147] Zur Stabilisierung der zwischen den Seitenwänden des Trägers 4 aufgehängenen Membran 1 können Haltestrukturen 14 vorgesehen sein. Wie in den Fig. 3 und 4 gezeigt, können diese bevorzugt horizontalen Abschnitte 3 der schwingfähigen Membran 1 stützen. Vorteilhaft sind die horizontalen Abschnitte 3 mechanisch neutral (vgl. Fig. 1B), sodass während der Aktuierung keine unerwünschten Spannungen zwischen Membran 1 und Haltestruktur 14 bzw. Träger 4 induziert werden.

[0148] Fig. 5 illustriert eine bevorzugte alternative Aus-

führungsform eines MEMS-Lautsprechers wobei die schwingfähigen Membran 1 zwei Aktuatorlagen umfasst, welche durch eine mittlere Lage aus einem leitfähigen Material 12, bevorzugt Metall, getrennt werden. Die mittlere Lage ist mit einem ersten endseitigen Elektrodenpad 13 verbunden, während in der gezeigten Ausführungsform die obere Aktuatorlage 11 über eine weitere Lage aus einem leitfähigen Material 12 mit einem zweiten endseitigen Elektrodenpad 13 kontaktiert vorliegt.

10 [0149] Fig. 6 illustriert bevorzugte Ansteuerungen zum Betrieb der beschriebenen MEMS-Lautsprecher.

[0150] In Fig. 6A ist eine bevorzugte Ansteuerung für einen MEMS-Lautsprecher mit einer Aktuatorlage 11 und einer passiven mechanischen Stützlage 10 gezeigt. Bevorzugt erfolgt die Ansteuerung mittels zweier endseitiger Elektrodenpads 13, sodass die horizontalen Schwingungen durch eine Formänderung des Aktuormaterials gegenüber dem mechanischen Stützmaterial erzeugbar sind. Die Aktuatorlage 11 wird bevorzugt sowohl von einer Frontseite (Top-Elektrode 13, leitfähige Schicht 10) als auch von einer Rückseite (Bottom-Elektrode 13, leitfähiges mechanisches Stützmaterial 10) kontaktiert. Eine Wechsellspannung als Audioinput-Signal kann beispielsweise auf dem vorderseitigen Elektrodenpad 13 (links) angelegt, während das rückseitige Elektrodenpad 13 (rechts) geerdet vorliegt.

[0151] In Fig. 6B ist eine bevorzugte Ansteuerung für einen MEMS-Lautsprecher mit zwei Aktuatorlagen 11 gezeigt, welche durch eine mittlere Lage aus einem leitfähigen Material 12, bevorzugt Metall, getrennt werden.

[0152] Eine obere Aktuatorlage 11 wird bevorzugt von einer Frontseite (Top-Elektrode 13 und obere leitfähige Schicht 12) sowie der mittleren leitfähigen Lage 12 angesteuert. Eine untere Aktuatorlage 11 wird bevorzugt von einer Rückseite (Bottom-Elektrode 13 und untere leitfähige Schicht 12) sowie der mittleren leitfähigen Lage 12 angesteuert wird. In der illustrierten Ausführungsform kann eine Wechsellspannung als Audioinput-Signal beispielsweise auf den für die Top- und Bottom-Elektrodenpads 13 (links) angelegt werden, während die mittlere Lage 12 über ein weiteres Elektrodenpad 13 (rechts) geerdet vorliegt.

[0153] Fig. 7 zeigt beispielhaft eine bevorzugte Integration eines MEMS-Lautsprechers gemäß der Erfindung in einem Gehäuse 15. Bevorzugt liegt die von dem Träger 4 gehaltene schwingfähige Membran 1 in einer Frontseite bzw. Vorderseite eines Gehäuses (*sound port*) angeordnet. Das Gehäuse umschließt zudem ein rückseitiges Resonanzvolumen (*back volumen* 16). Eine Ventilationsöffnung 17 kann zur Vermeidung akustischer Kurzschlüsse oder zur Unterstützung des Klangbildes eingebracht werden.

[0154] Fig. 8 illustriert ein alternatives Herstellungsverfahren zur Bereitstellung eines MEMS-Lautsprechers mit einer erfindungsgemäßen schwingfähigen Membran 1. Die in Figuren 8A-D gezeigten Verfahrensschritte sind analog zur Fig. 2.

[0155] Fig. 8A zeigt ein Ätzen des Substrats 8 von einer

Ober- bzw. Vorderseite zur Ausbildung einer Strukturierung, vorzugsweise einer Mäanderstruktur. In dem Verfahrensschritt werden parallele tiefe Trenches (Taschen) in das Substrat **8** geätzt. Die abgeformte Struktur stellt einen Faltenbalg bzw. im Querschnitt einen Mäander dar.

[0156] Anschließend wird eine Lage eines Ätzstop **9** (Fig. 2B) aufgetragen, wobei es sich beispielsweise um TEOS oder PECVD handeln kann. Auf den Ätzstop **9** wird eine Lage aus einem mechanischen Stützmaterial **10** (Fig. 2C) und einem Aktuormaterial **11** aufgetragen. Bei dem mechanischen Stützmaterial **10** kann es sich z. B. um dotiertes Polysilizium handeln, während für das Aktuormaterial **12** bevorzugt ein piezoelektrisches Material verwandt wird.

[0157] Im Gegensatz zu der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform wird die Aktuatorlage **11** nicht als durchgängige Lage mit einer oberen leitfähigen Schicht kontaktiert. Stattdessen erfolgt eine Spacer-Ätzung (Fig. 8F) der Aktuatorlage **11** in den horizontalen Abschnitten der Membran, sodass nur noch die vertikalen Abschnitte der Membran eine Lage aus einem Aktuormaterial **11** aufweisen.

[0158] Im Anschluss wird bevorzugt eine durchgängige dielektrische Lage **18** zur Vermeidung eines Kurzschlusses zwischen später aufzubringenden oberen und unteren Elektrode aufgetragen (Fig. 8G). Eine durchgängige leitfähige Lage als Top-Elektrode **12** erlaubt eine vorderseitige Kontaktierung (Fig. 8H).

[0159] Fig. 8I und 8J illustrieren ein weiteres Ätzen des Substrates **8** von der Rückseite bzw. Unterseite und optional das Auftragen einer durchgängigen leitfähigen Lage **12** als Rückseitenelektrode.

[0160] Fig. 9 illustriert ein bevorzugtes Herstellungsverfahren zur Bereitstellung eines MEMS-Lautsprechers mit einer schwingfähigen Membran auf Basis von einzelnen Piezokeramiken.

[0161] Zunächst werden mehrerer einzelner Piezokeramikelemente **19**, umfassend eine Lage aus einem mechanischen Stützmaterial **10** (z.B. dotiertem Polysilizium) und eine Lage aus einem piezoelektrischen Material **11** sowie einer Opferlage **20** bereitgestellt (vgl. Fig. 9A und 9B). Bei der Opferlage **20** kann es sich beispielsweise um einen Photoresist (Photolack) handeln.

[0162] Im Anschluss erfolgt eine Definition von Löchern für eine Durchkontaktierung und Metallfüllung **21** (vgl. Fig. 9C), Die Piezokeramikelemente **19** werden gestapelt (Fig. 9D) und geschnitten (Dicing **22**, Fig. 9E), sodass zwei oder mehr Stapel von Piezokeramikelementen **19** erhalten werden, welcher durch Metallbrücken **21** verbunden sind (vgl. Fig. 9E).

[0163] Nach Entfernung der Opferlage **20** (Fig. 9F) erfolgt ein Einbringen der gestapelten Piezokeramikelemente **19** in einen Träger **4**, wobei bevorzugt eine Kontaktierung des ersten und letzten Piezokeramikelementes mit jeweils einer Elektrode **13** erfolgt (Fig. 9G).

[0164] Auf diese Weise wird ebenfalls eine schwingfähige Membran **1** zwischen einem Träger **4** erhalten, welche zur Erzeugung von Schallwellen in eine vertikale

Emissionsrichtung mindestens zwei oder mehr vertikale Abschnitte **2** umfasst, welche parallel zur Emissionsrichtung ausgebildet sind und zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können.

[0165] Das Aktuatorprinzip basiert bevorzugt auch hier auf einer relativen Formänderung der Aktuatorlage **11** gegenüber der mechanischen Stüttschicht **10**. Eine durchgängige Aktuatorlage ist hierzu nicht notwendig. Eine Kontaktierung sämtlicher vertikaler Abschnitte **2** durch endseitige Ansteuerung wird durch die Metallbrücken **23** gewährleistet.

BEZUGSZEICHENLISTE

[0166]

- 1 Schwingfähige Membran
- 2 Vertikale Abschnitte der schwingfähigen Membran
- 3 Horizontale Abschnitte der schwingfähigen Membran
- 4 Träger
- 5 Luftvolumina zwischen den vertikalen Abschnitten
- 8 Substrat
- 9 Ätzstopp
- 10 Lage aus einem mechanischem Stützmaterial, bevorzugt dotiertem Polysilizium
- 11 Lage aus einem Aktuormaterial (Aktuatorlage), bevorzugt aus einem piezoelektrischem Material
- 12 Lage aus einem leitfähigem Material, bevorzugt aus Metall
- 13 Kontaktierung der Elektrode, bevorzugt Elektrodenpad
- 14 Haltestrukturen
- 15 Gehäuse
- 16 rückseitiges Resonanzvolumen
- 17 Ventilationsöffnung
- 18 Lage aus einem dielektrischen Material
- 19 Piezokeramikelement(e)
- 20 Opferlage
- 21 Definierte Löcher für eine Durchkontaktierung mit Metallfüllung
- 22 Schneiden (Dicing)
- 23 Metallbrücken

[0167]

[0167]

F. Stoppel, C. Eisermann, S. Gu-Stoppel, D. Kaden, T. Giese and B. Wagner, NOVEL MEMBRANE-LESS TWO-WAY MEMS LOUDSPEAKER BASED ON PIEZOELECTRIC DUAL-CONCENTRIC ACTUATORS, Transducers 2017, Kaohsiung, TAIWAN, June 18-22, 2017.

Iman Shahosseini, Elie LEFEUVRE, Johan Moulin, Marion Woytasik, Emile Martincic, et al. Electromagnetic MEMS Microspeaker for Portable Electronic

Devices. Microsystem Technologies, Springer Verlag (Germany), 2013, pp.10. <hal-01103612>.

Bert Kaiser, Sergiu Langa, Lutz Ehrig, Michael Stolz, Hermann Schenk, Holger Conrad, Harald Schenk, Klaus Schimmanz und David Schuffenhauer, Concept and proof for an all-silicon MEMS microspeaker utilizing air chambers.

Patentansprüche

1. MEMS-Wandler zur Interaktion mit einem Volumenstrom eines Fluids umfassend

- einen Träger (4),
- eine schwingfähige Membran (1) zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids in einer vertikalen Richtung, wobei die schwingfähige Membran (1) von dem Träger (4) gehalten wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

die schwingfähige Membran (1) zwei oder mehr vertikale Abschnitte (2) aufweist, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und mindestens eine Lage aus einem Aktuatomaterial (11) umfassen, wobei die schwingfähige Membran (1) endseitig mit mindestens einer Elektrode (13) kontaktiert vorliegt, sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode (13) die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

2. MEMS-Wandler gemäß dem vorherigen Anspruch **dadurch gekennzeichnet, dass**

der MEMS-Wandler ein MEMS-Lautsprecher ist, wobei bevorzugt zwischen den vertikalen Abschnitten (2) Luftvolumina (5) vorliegen, welche durch die horizontalen Schwingungen zur Erzeugung von Schallwellen entlang einer vertikalen Emissionsrichtung bewegt werden oder der MEMS-Wandler ein MEMS-Mikrofon ist, wobei bevorzugt zwischen den vertikalen Abschnitten (2) Luftvolumina (5) vorliegen, welche bei Aufnahme von Schallwellen entlang einer vertikalen Detektionsrichtung bewegt werden.

3. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die zwei oder mehr vertikale Abschnitte (2) mindestens zwei Lagen umfassen, wobei eine Lage (11) ein Aktuatomaterial und eine zweite Lage (10) ein mechanisches Stützmaterial umfasst, wobei mindes-

tens die Lage (11) umfassend das Aktuatomaterial mit einer Elektrode (13) kontaktiert vorliegt, sodass horizontale Schwingungen durch eine Formänderung der Aktuatomaterials gegenüber dem mechanischen Stützmaterial erzeugbar sind oder sodass horizontale Schwingungen zu einer Formänderung des Aktuatomaterials gegenüber dem mechanischen Stützmaterial führen und ein elektrisches Signal erzeugen

4. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) mindestens zwei Lagen umfassen, wobei beide Lagen (11) ein Aktuatomaterial umfassen und mit jeweils einer Elektrode (13) kontaktiert vorliegen und die horizontalen Schwingungen durch eine Formänderung der einen Lage gegenüber der anderen Lage erzeugbar sind oder horizontale Schwingungen zu einer Formänderung der einen Lage gegenüber der anderen Lage führen und ein elektrisches Signal erzeugen.

5. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

der Träger (4) zwei Seitenbereiche umfasst zwischen welchen die schwingfähige Membran (1) in horizontaler Richtung angeordnet vorliegt und/oder der Träger (4) aus einem Substrat (8) gebildet wird, bevorzugt ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus monokristallinem Silizium, Polysilizium, Siliziumdioxid, Siliziumcarbid, Siliziumgermanium, Siliziumnitrid, Nitrid, Germanium, Kohlenstoff, Galliumarsenid, Galliumnitrid, Indiumphosphid und Glas.

6. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die schwingfähige Membran (1) durch eine Lamellenstruktur oder Mäanderstruktur gebildet wird.

7. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die schwingfähige Membran (1) durch eine Mäanderstruktur gebildet wird mit abwechselnden vertikalen (2) und horizontalen (3) Abschnitten, wobei an mindestens zwei der horizontalen Abschnitte (3) Haltestrukturen (14) angebracht vorliegen, welche mittelbar oder unmittelbar mit dem Träger (4) verbunden sind.

8. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

das Aktuatomaterial ein piezoelektrisches Material, ein Polymer Piezoelectrical Material und/oder elektroaktive Polymere (EAP) umfasst, wobei das piezoelektrisch Material bevorzugt ausgewählt ist aus einer Gruppe umfassend Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Aluminiumnitrid (AlN) und Zinkoxid (ZnO).

9. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die schwingfähige Membran (1) drei Lagen umfasst, wobei eine obere Lage (12) von einem leitfähigen Material gebildet wird, eine mittlere Lage (11) vom einem Aktuatomaterial gebildet wird und eine untere Lage (12) von einem leitfähigen Material gebildet wird, wobei das leitfähige Material der oberen und/oder untere Lage bevorzugt ein mechanisches Stützmaterial ist.

10. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die schwingfähige Membran (1) zwei Lagen (11) aus einem Aktuatomaterial umfasst, welche durch eine mittlere Lage (12) aus einem leitfähigen Material, bevorzugt Metall, getrennt werden, wobei die mittlere Lage (12) mit einer ersten Elektrode (13) verbunden vorliegt und mindestens eine der beiden Lagen (11) aus einem Aktuatomaterial über eine weitere Lage (12) aus einem leitfähigen Material, bevorzugt einem Metall, mit einer zweiten Elektrode (13) kontaktiert vorliegen.

11. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die vertikalen Abschnitte (2) der schwingfähigen Membran (1) zwei Lagen umfassen, wobei eine erste Lage (11) aus einem Aktuatomaterial besteht, eine zweite Lage (10) aus einem leitfähigen Stützmaterial besteht und wobei die vertikalen Abschnitten (2) über horizontale Metallbrücken (23) verbunden vorliegen.

12. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die schwingfähige Membran (1) mit einer Lage aus einem Antihafmaterial beschichtet ist.

13. MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass

die von dem Träger (4) gehaltene schwingfähige Membran (1) in einer Frontseite eines Gehäuses (15) angeordnet vorliegt, welches ein rückseitiges Resonanzvolumen (16) umschließt, wobei in dem Gehäuse (15) bevorzugt eine Ventilationsöffnung

(17) vorliegt zur Vermeidung akustischer Kurzschlüsse und/oder zur Unterstützung des Klangbildes.

14. Herstellungsverfahren für einen MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche umfassend die folgenden Schritte:

- Ätzen eines Substrats (8), vorzugsweise von einer Vorderseite, zur Ausbildung einer Strukturierung, vorzugsweise einer Mäanderstruktur
- Optionales Auftragen eines Ätzstops
- Aufbringen mindestens zweier Lagen, wobei mindestens eine erste Lage (11) ein Aktuatomaterial und eine zweite Lage (10) ein mechanisches Stützmaterial umfassen oder mindestens zwei Lagen (11) ein Aktuatomaterial umfassen
- Kontaktieren der ersten und/oder zweiten Lage mit einer Elektrode (13)
- Ätzen, vorzugsweise von der Rückseite, und optionale Entfernung des Ätzstops,

sodass eine schwingfähige Membran (1), vorzugsweise in Form einer Mäanderstruktur, von einem durch das Substrat (8) gebildeten Träger (4) gehalten wird, wobei die schwingfähige Membran (1) zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids in einer vertikalen Richtung mindestens zwei oder mehr vertikale Abschnitte (2) umfasst, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode (13) die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

15. Herstellungsverfahren für einen MEMS-Wandler gemäß einem der vorherigen Ansprüche 1-13 umfassend die folgenden Schritte:

- Bereitstellen mehrerer einzelner Piezokeramikelemente (19), umfassend eine Opferlage (20), eine Lage (12) aus einem leitfähigen Material und eine Lage (11) aus einem piezoelektrischen Material
- Definition von Löchern (21) für eine Durchkontaktierung in den Piezokeramikelementen und Metallfüllung
- Stapeln der Piezokeramikelemente (19) und optionales Schneiden (Dicing) (22), sodass ein Stapel von Piezokeramikelementen (19) erhalten wird, welcher durch Metallbrücken (23) verbunden ist
- Entfernung der Opferlage (29) und Einbringen

des Stapels der Piezokeramikelemente (19) in einen Träger (4), wobei eine Kontaktierung des ersten und letzten Piezokeramikelementes (19) mit jeweils einer Elektrode (13) erfolgt,

5

sodass eine schwingfähige Membran (1), vorzugsweise in Form einer Lamellenstruktur, von einem durch das Substrat (8) gebildeten Träger (4) gehalten wird, wobei die schwingfähige Membran (1) zur Erzeugung oder Aufnahme von Druckwellen des Fluids in einer vertikalen Richtung mindestens zwei oder mehr vertikale Abschnitte (2) umfasst, welche parallel zur vertikalen Richtung ausgebildet sind und sodass durch Ansteuerung der mindestens einen Elektrode (13) die zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen angeregt werden können oder sodass bei Anregung der zwei oder mehr vertikalen Abschnitte (2) zu horizontalen Schwingungen an der mindestens einen Elektrode ein elektrisches Signal erzeugt werden kann.

10

15

20

25

30

35

40

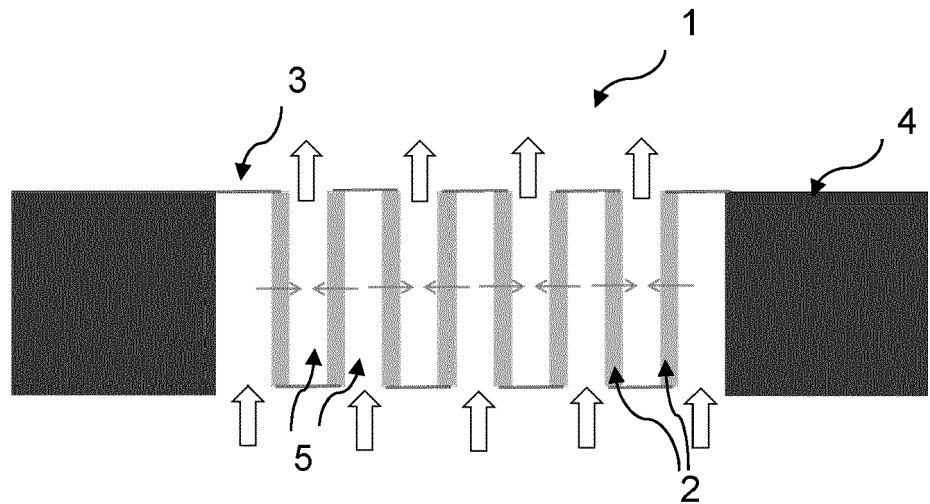
45

50

55

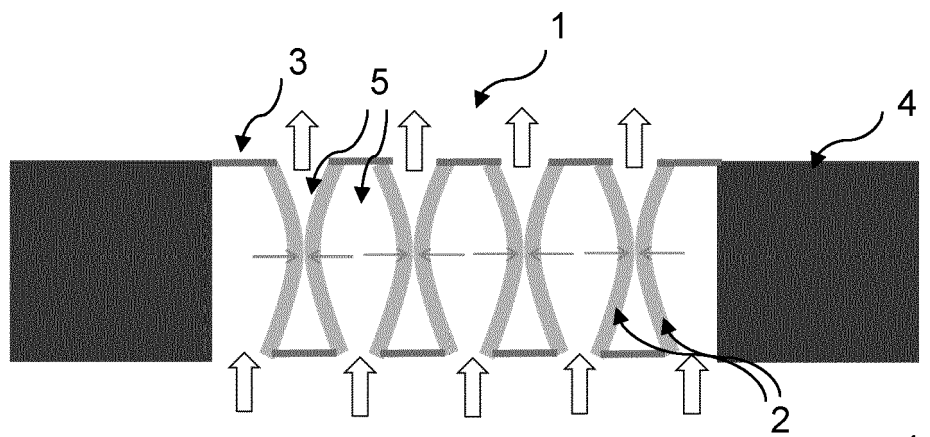
Fig. 1

A



B

Phase 1



Phase 2

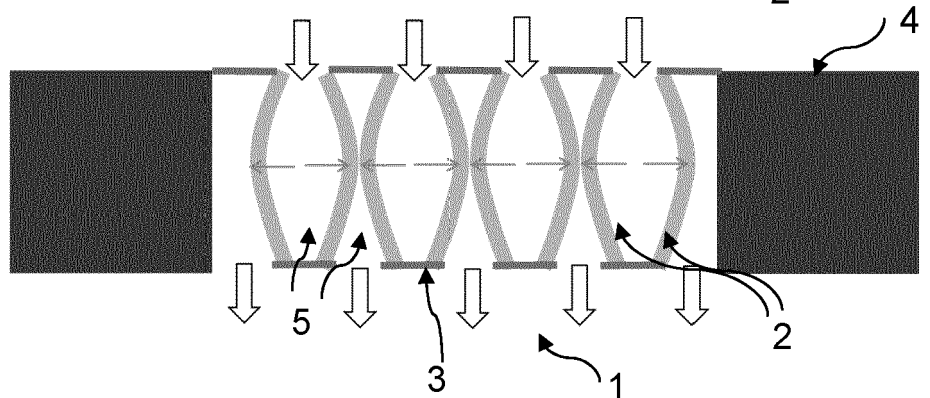
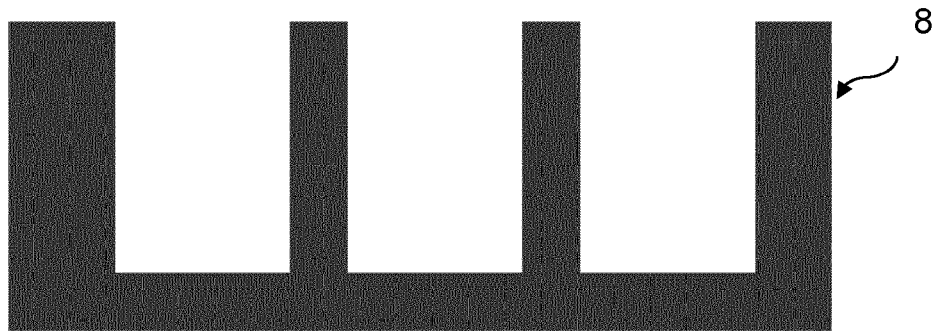
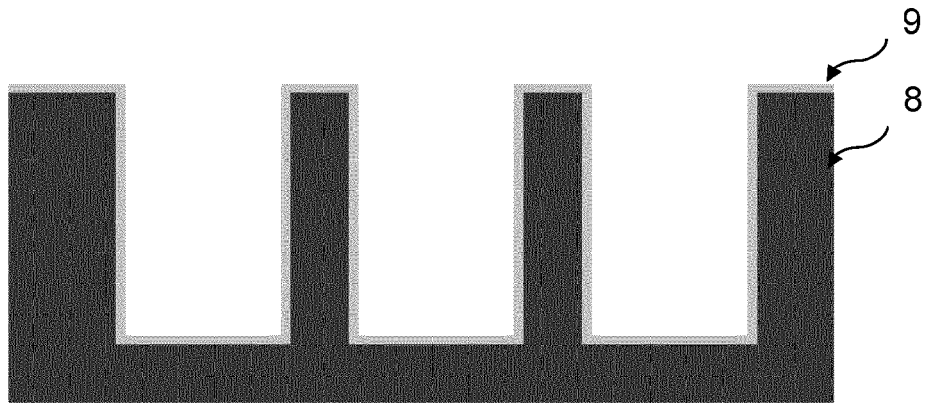


Fig. 2

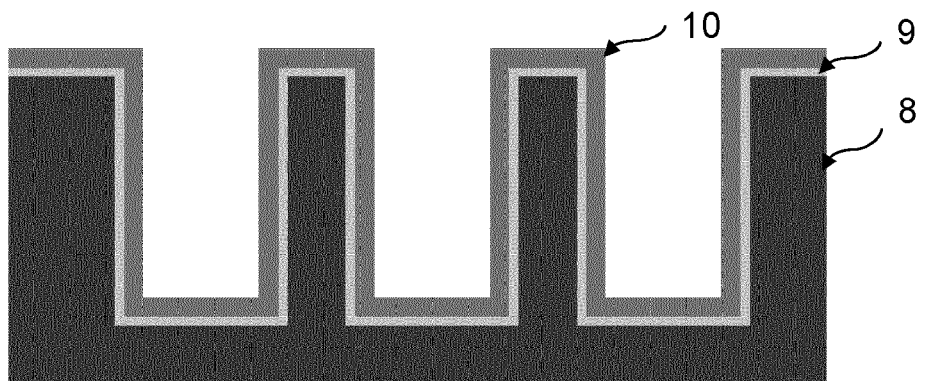
A



B



C



D

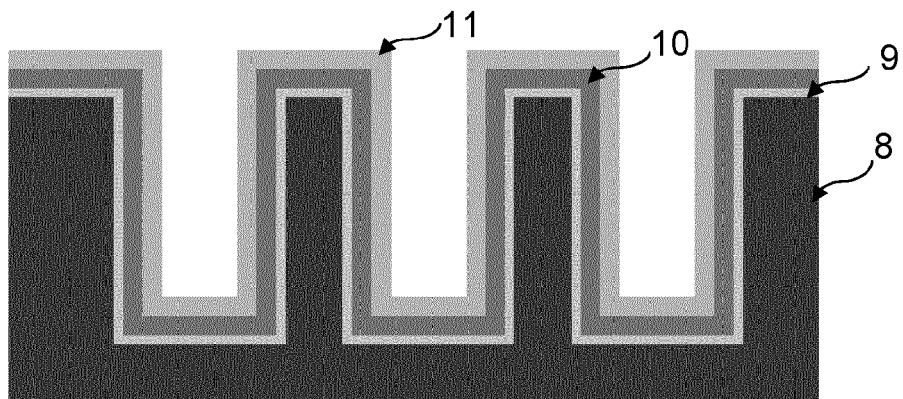


Fig. 2 (cont.)

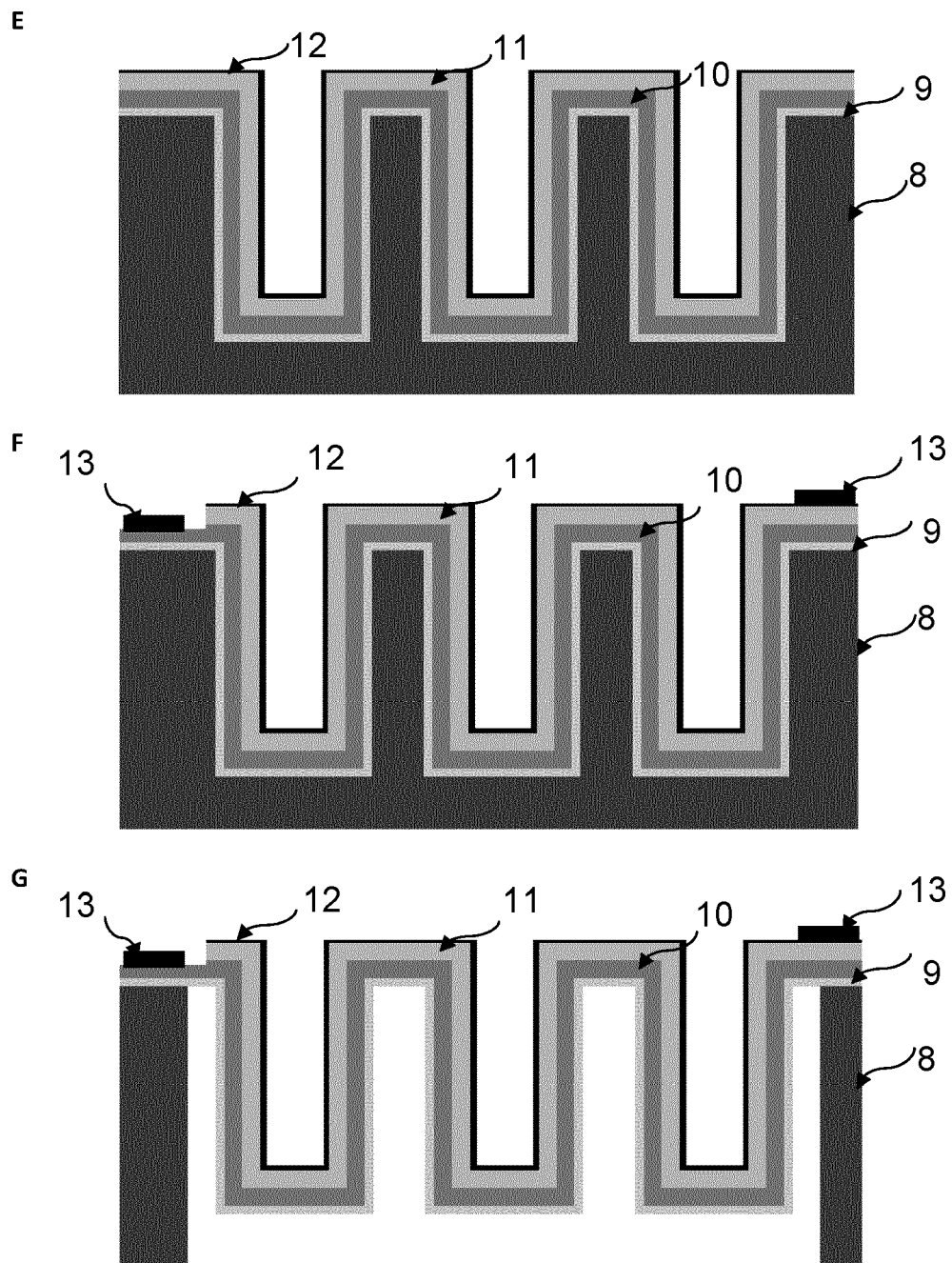


Fig. 3

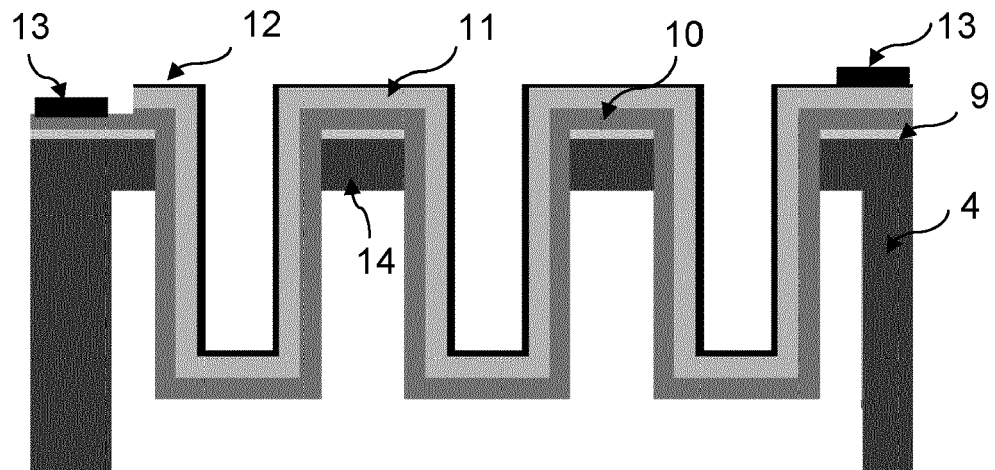


Fig. 4

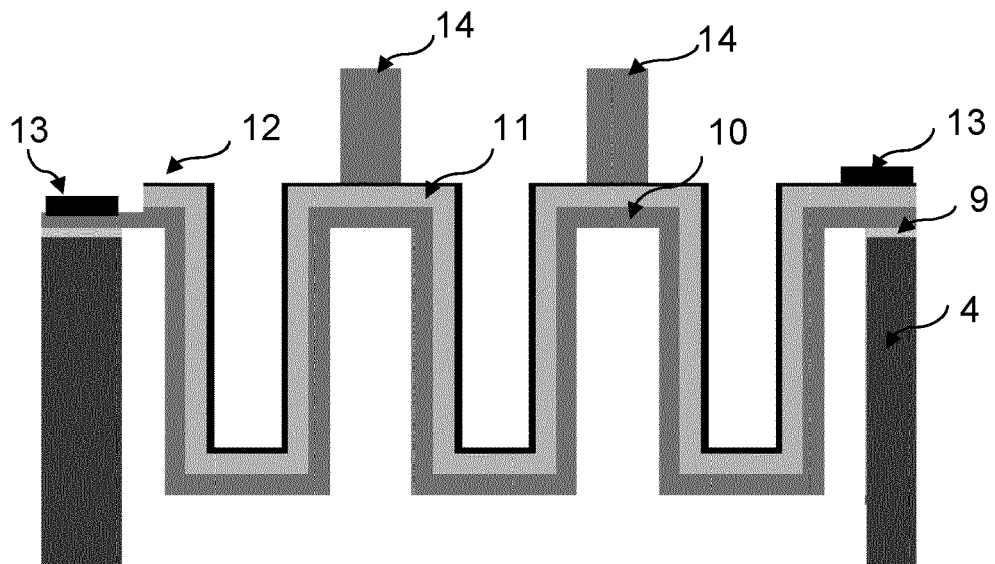


Fig. 5

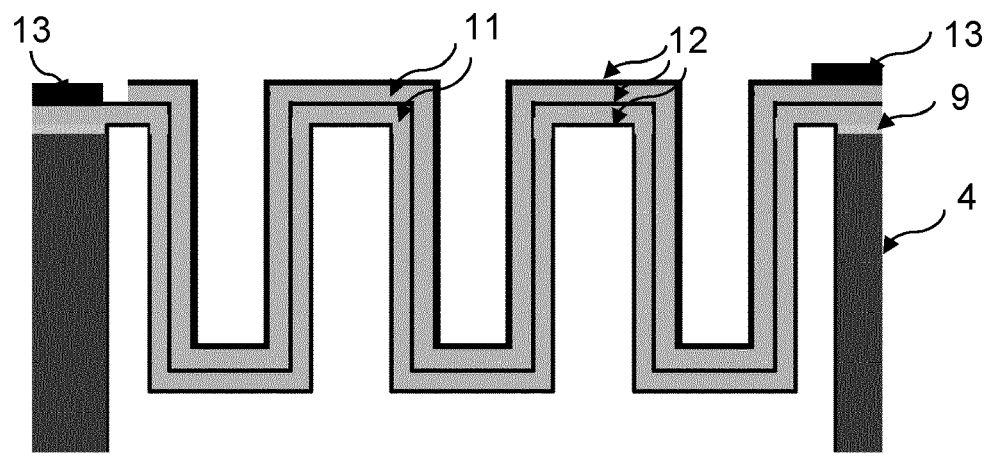


Fig. 6

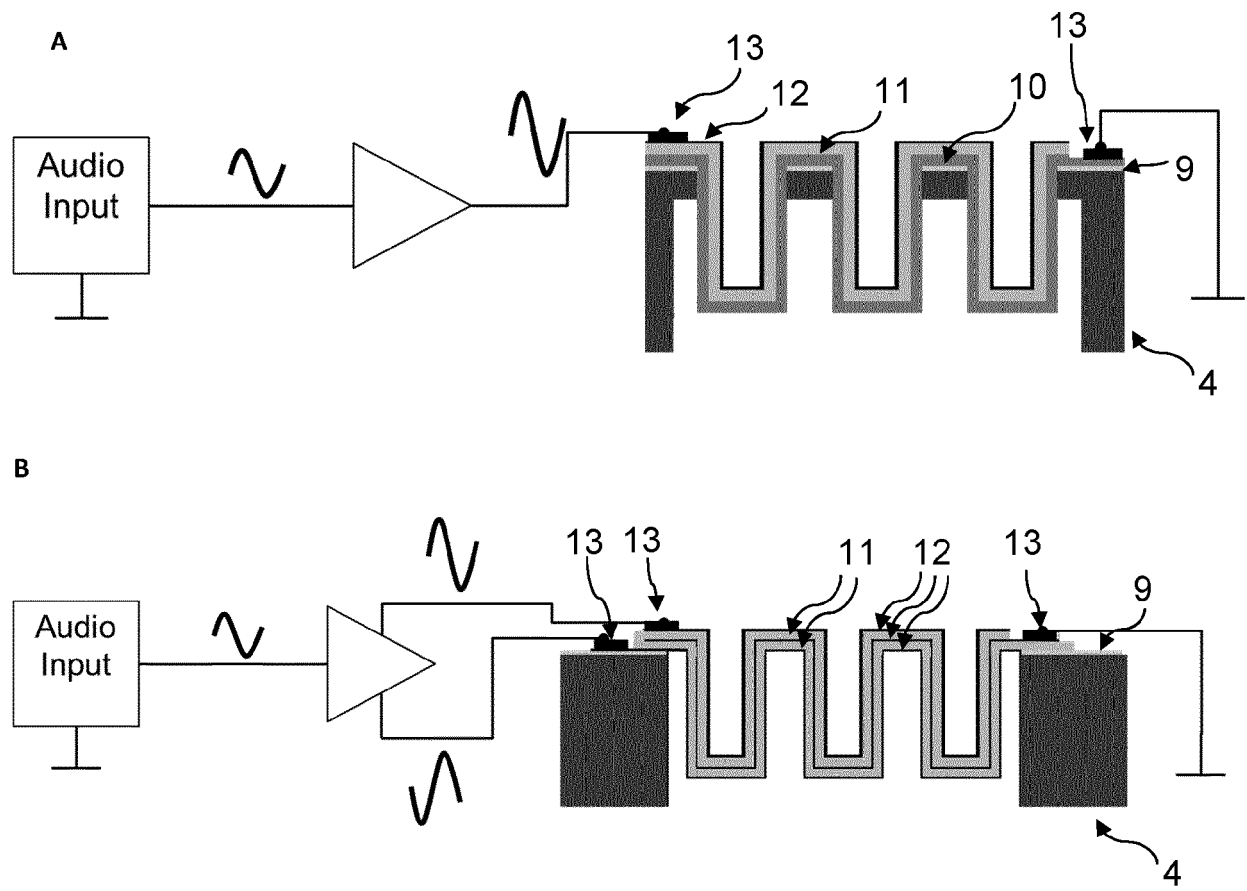


Fig. 7

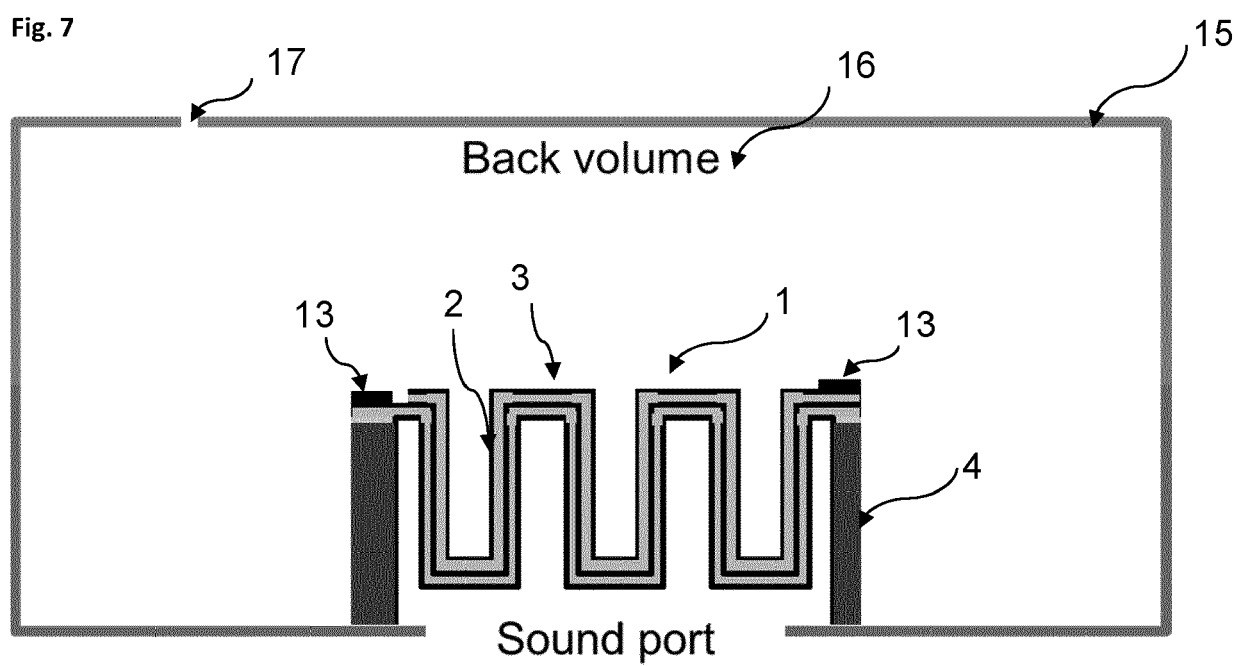
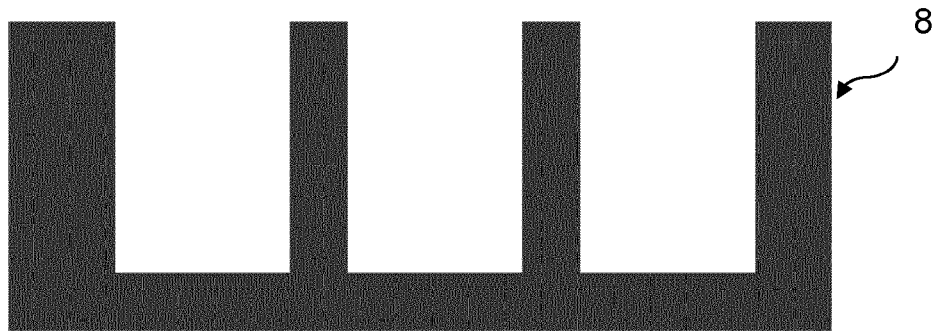
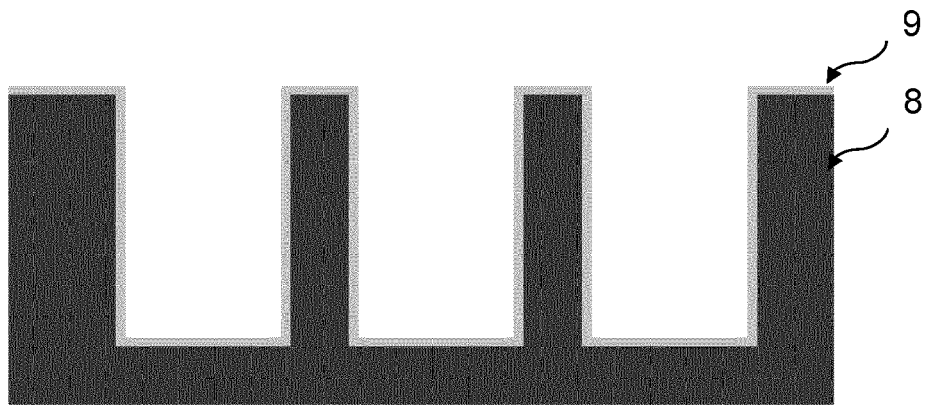


Fig. 8

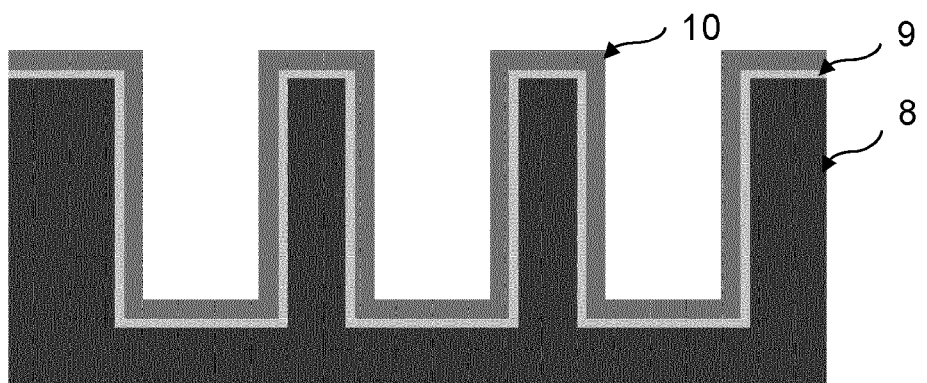
A



B



C



D

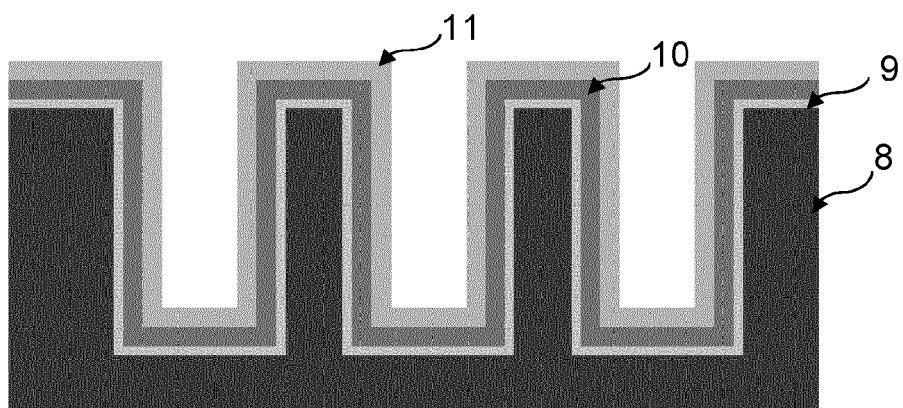
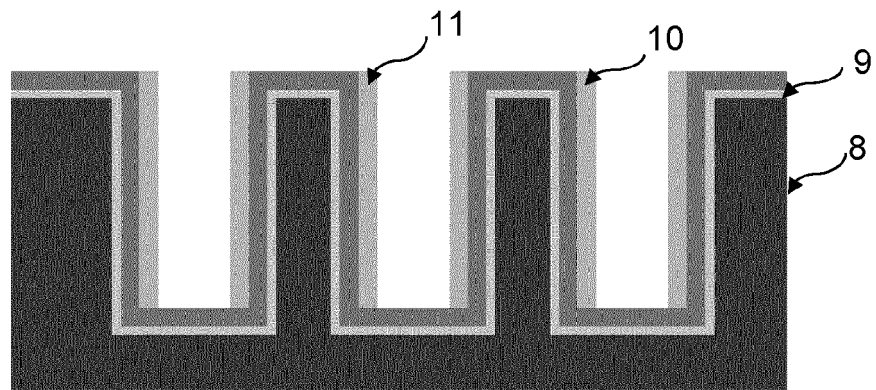
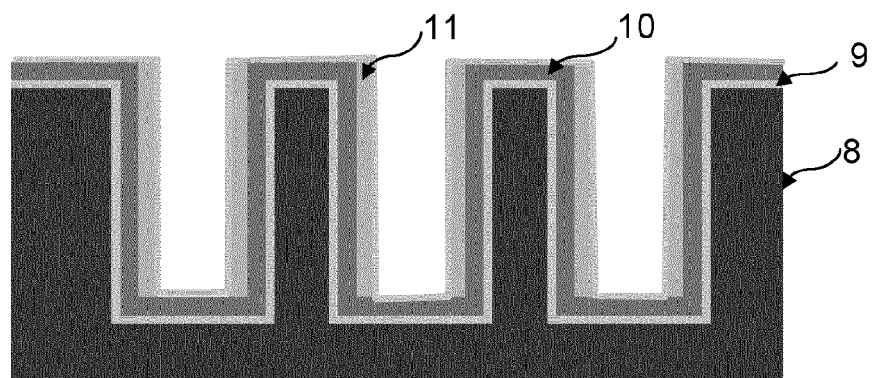


Fig. 8 (cont.)

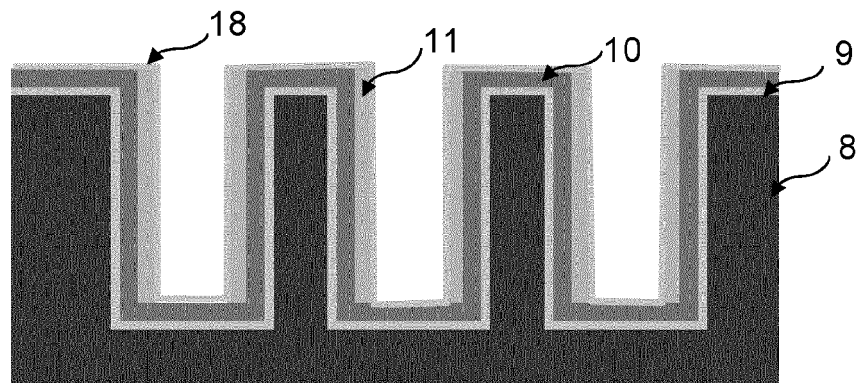
E



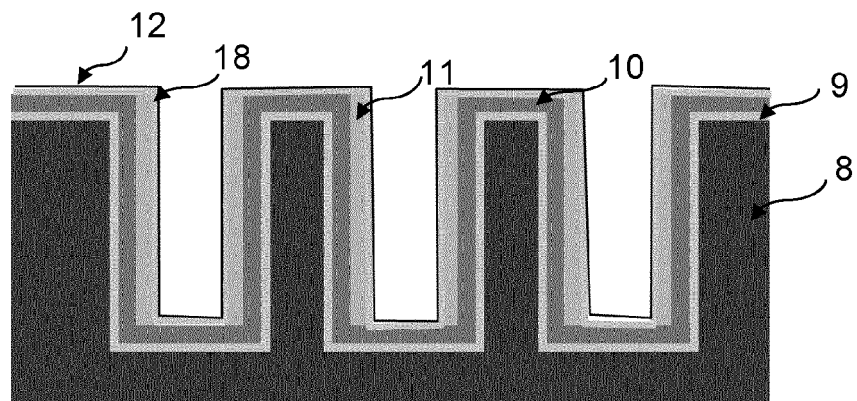
F



G



H



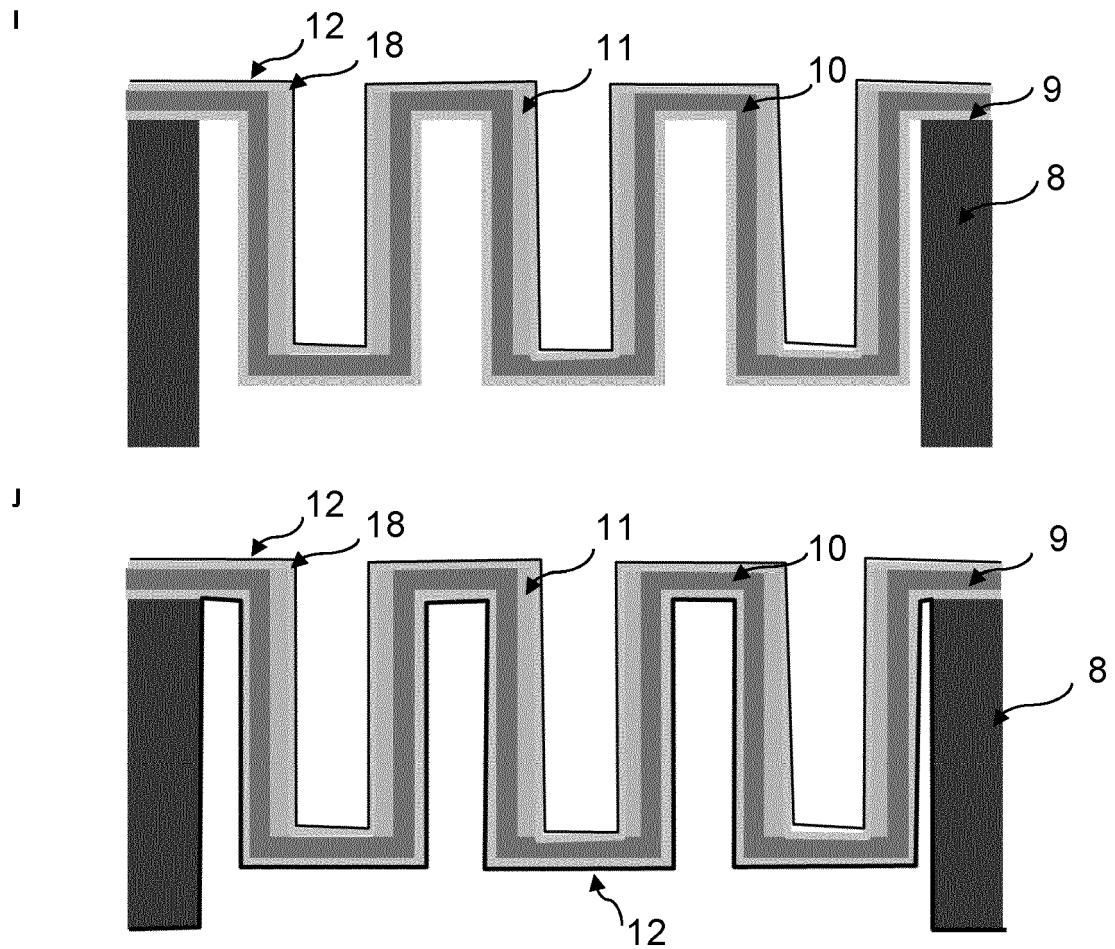
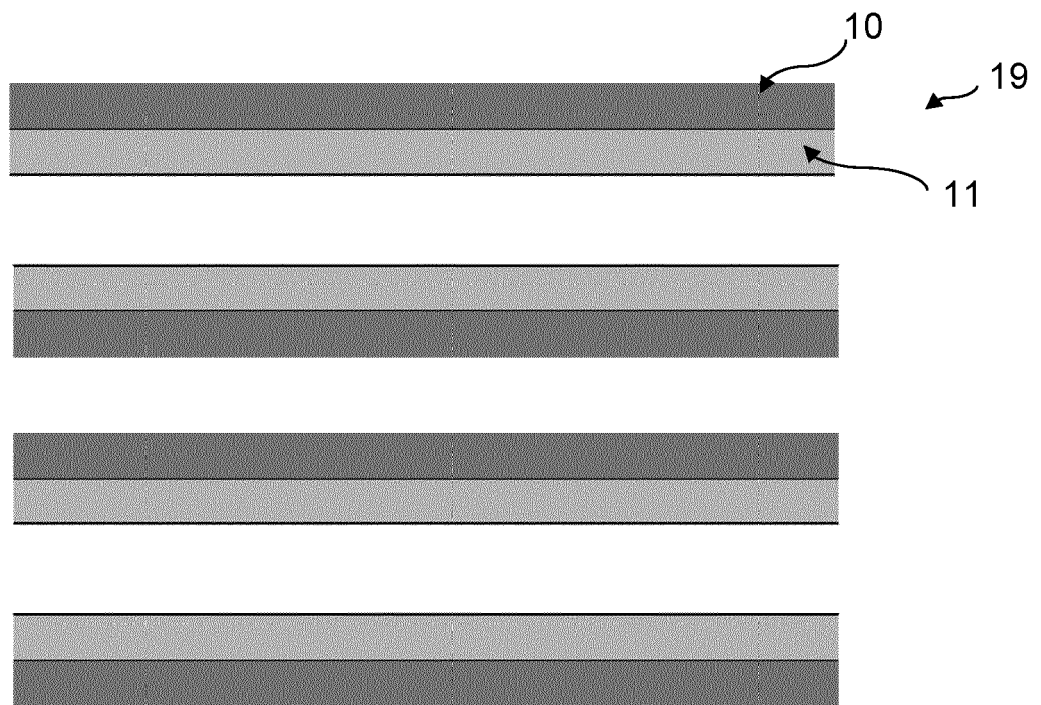


Fig. 9

A



B

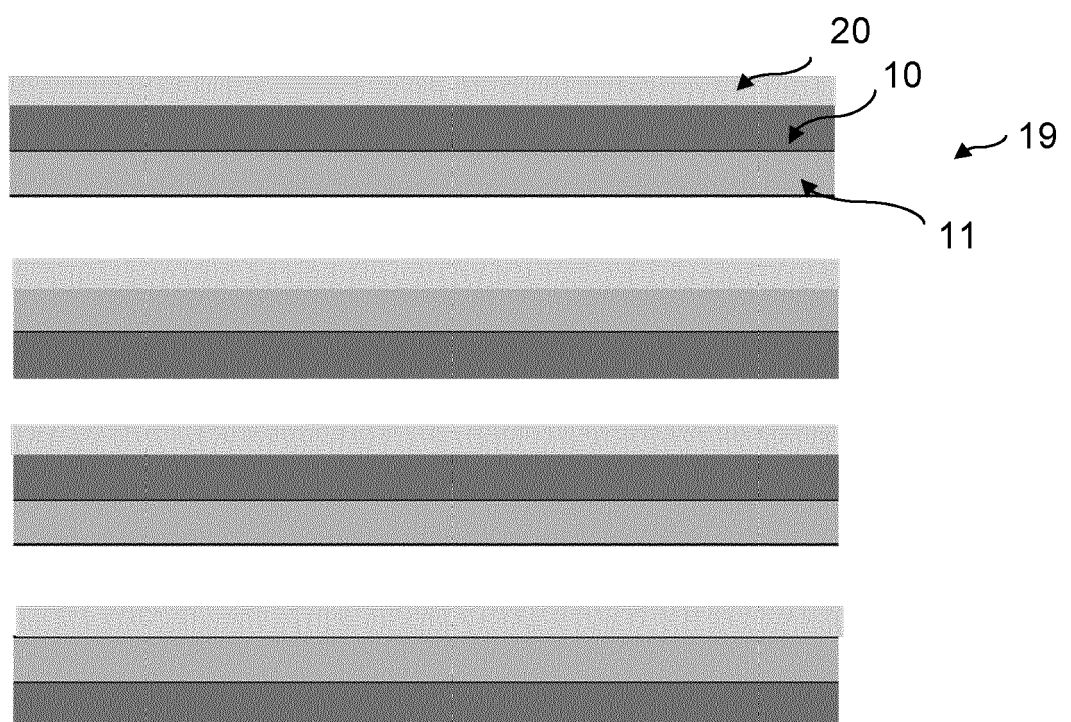
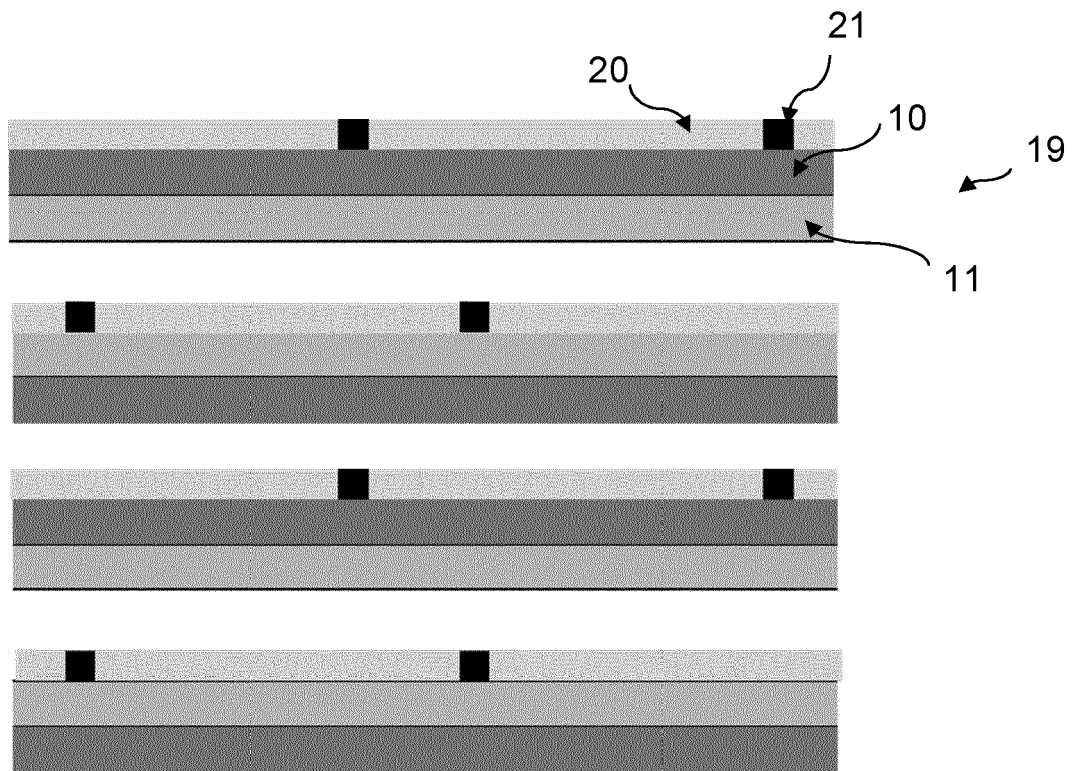


Fig. 9 (cont.)

C



D

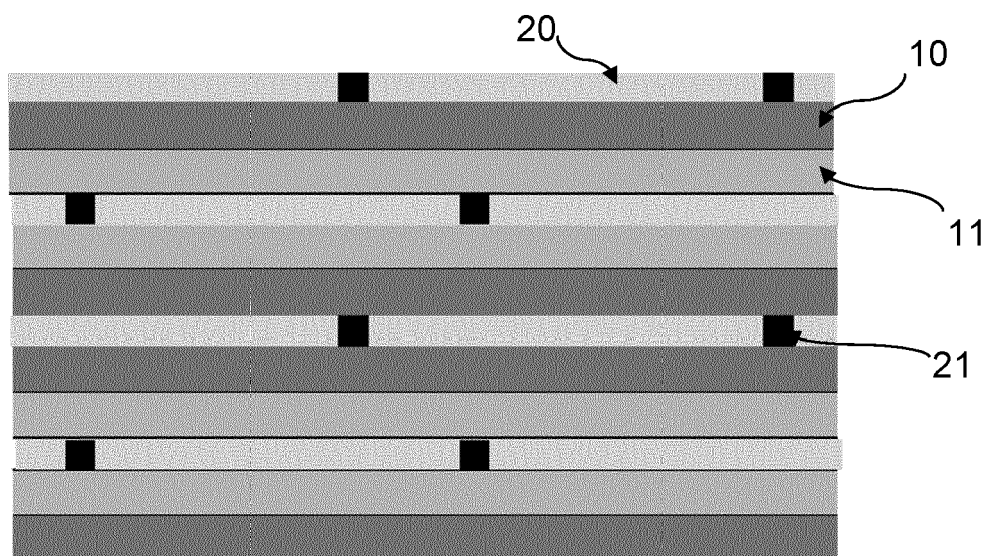
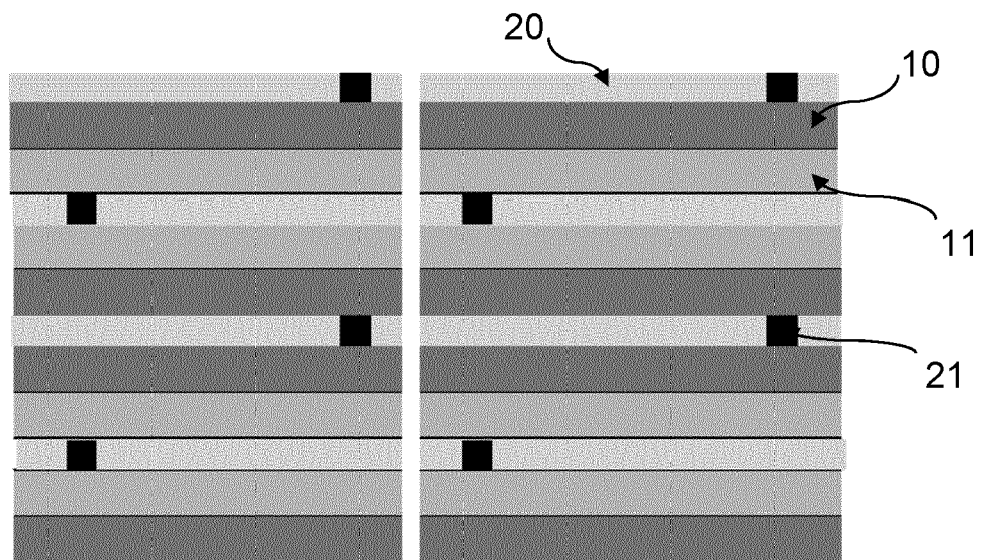


Fig. 9 (cont.)

E



F

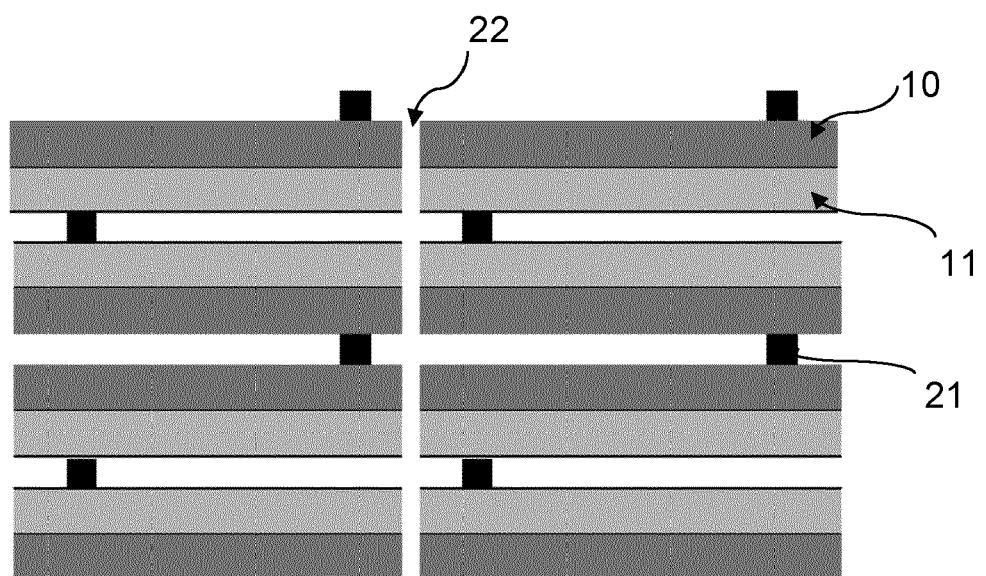
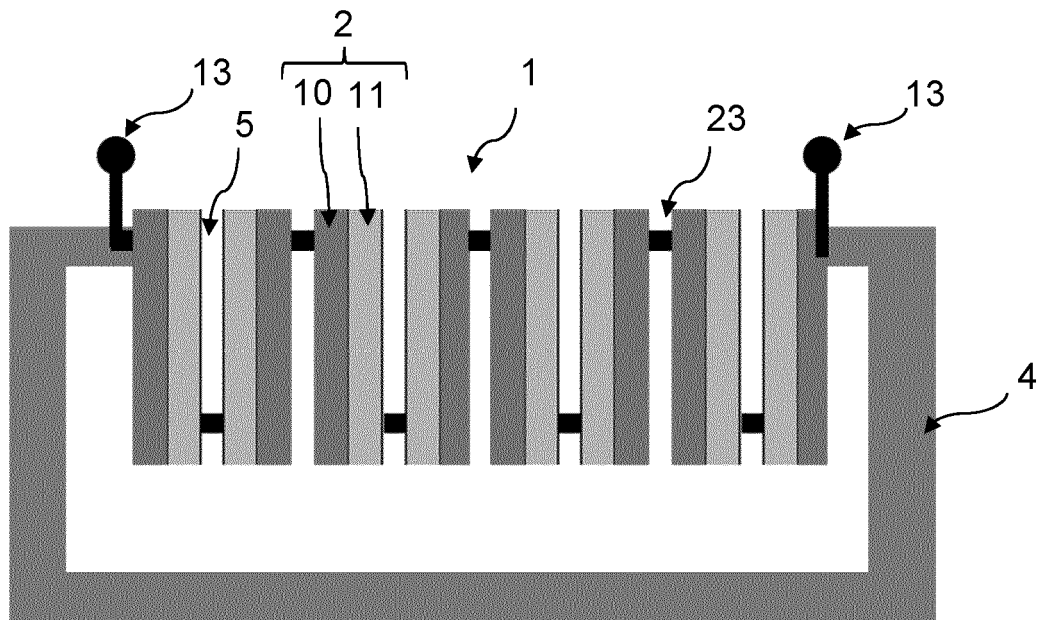


Fig. 9 (cont.)

G





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 20 16 8836

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X A	US 2002/006208 A1 (TAKEI TOSHITAKA [JP]) 17. Januar 2002 (2002-01-17) * Absätze [0003] - [0009], [0051] - [0062], [0071] - [0074]; Abbildungen 1, 2, 4, 5, 7, 8 *	1,2,5-8, 12-14 3,4, 9-11,15	INV. H04R17/00 H04R7/14
X A	JP 3 919695 B2 (TAKEI TOSHITAKA) 30. Mai 2007 (2007-05-30) * Absätze [0005], [0006], [0018] - [0026]; Abbildungen 4-7 *	1,2,4-9, 12-14 3,10,11, 15	
A,D	US 2019/116417 A1 (LIANG JEMM YUE [US] ET AL) 18. April 2019 (2019-04-18) * Absätze [0046], [0047], [0051] - [0053]; Abbildungen 1A, 2-4 *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			H04R
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 16. September 2020	Prüfer Fobel, Oliver
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 20 16 8836

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

16-09-2020

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2002006208 A1	17-01-2002	EP 1173043 A2	16-01-2002
		JP 3820851 B2	13-09-2006
		JP 2002027592 A	25-01-2002
		US 2002006208 A1	17-01-2002

JP 3919695 B2	30-05-2007	JP 3919695 B2	30-05-2007
		JP 2004320601 A	11-11-2004

US 2019116417 A1	18-04-2019	CN 109688529 A	26-04-2019
		EP 3474572 A1	24-04-2019
		KR 20190043489 A	26-04-2019
		US 2019116417 A1	18-04-2019

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 20180179048 A1, Kaiser [0008] [0020]
- US 20190116417 A1 [0011] [0023]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **F. STOPPEL ; C. EISERMANN ; S. GU-STOPPEL ; D. KADEN ; T. GIESE ; B. WAGNER.** NOVEL MEMBRANE-LESS TWO-WAY MEMS LOUDSPEAKER BASED ON PIEZOELECTRIC DUAL-CONCENTRIC ACTUATORS. *Transducers 2017*, 18. Juni 2017 [0167]
- Electromagnetic MEMS Microspeaker for Portable Electronic Devices. **IMAN SHAHOSSEINI ; ELIE LEFEUVRE ; JOHAN MOULIN ; MARION WOYTASIK ; EMILE MARTINCIC et al.** *Microsystem Technologies*. Springer Verlag, 2013, 10 [0167]