



(10) **DE 10 2004 043 357 B4** 2015.10.22

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 043 357.7**  
(22) Anmeldetag: **08.09.2004**  
(43) Offenlegungstag: **09.03.2006**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **22.10.2015**

(51) Int Cl.: **B81B 3/00 (2006.01)**  
**B81C 1/00 (2006.01)**  
**G01L 9/06 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE**

**72762 Reutlingen, DE; Lammel, Gerhard,  
72074 Tübingen, DE; Schelling, Christoph,  
72762 Reutlingen, DE; Brasas, Joerg, 72141  
Walldorfhäslach, DE**

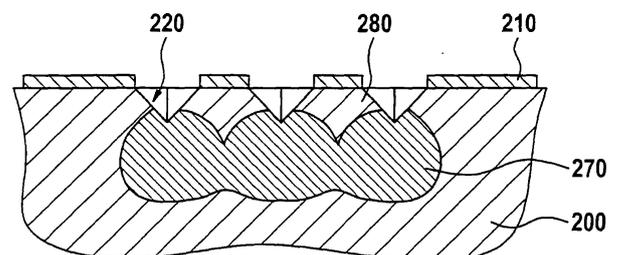
(72) Erfinder:  
**Benzel, Hubert, 72124 Pliezhausen, DE;  
Finkbeiner, Stefan, 72810 Gomaringen, DE; Illing,  
Matthias, 72127 Kusterdingen, DE; Schaefer,  
Frank, 72070 Tübingen, DE; Armbruster, Simon,**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Sensorelements**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Sensorelements mit einem Hohlraum (275, 500, 505) und einer Membran (285, 585), wobei zur Herstellung des Sensorelements die Verfahrensschritte

- Aufbringen einer strukturierten Ätzmaske (210) mit einer Vielzahl von Löchern (230) auf ein Halbleitersubstrat (200), und
- Erzeugen von Vertiefungen (220, 300, 440, 445) unterhalb der Löcher mittels eines Ätzprozesses mit KOH oder TMAH oder einem Trenchätzprozess, und
- Bildung
- mehrerer nebeneinander liegender porösizierten Bereiche (270) unterhalb den Vertiefungen mittels einer Anodisierung im Halbleitersubstrat, wobei vorgesehen ist, dass bei zunehmender Zeitdauer, in der der Anodisierungsprozess durchgeführt wird, die nebeneinander liegenden porösen Bereiche ineinander übergehen und einen gemeinsamen porösen Bereich bilden, und
- einer gitterartigen Struktur (280, 430) an der Oberfläche des Halbleitersubstrats aus unporösizierendem Substratmaterial zwischen den Vertiefungen, und
- Entfernen der Ätzmaske, und
- Erzeugung
- des Hohlraums aus dem wenigstens einen porösizierten Bereich und
- einer monokristallinen Membran oberhalb des Hohlraums aus der gitterartigen Struktur mittels einer Temperaturbehandlung oder einer Elektropolitur des Halbleitersubstrats, vorgesehen sind.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	42 41 045	C1
DE	100 30 352	A1
DE	100 32 579	A1
DE	100 65 026	A1
DE	101 14 036	A1
DE	101 38 759	A1
DE	10 2004 036 035	A1
US	6 261 962	B1
US	2001 / 0 023 094	A1
EP	1 043 770	A1
WO	02/ 002 458	A1

I. Mizushima et al.; "Empty-space-in-silicon technique for fabricating a silicon-on-nothing structure"; Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 20, 13 November 2000, S. 3290 – 3292

**Beschreibung**

## Stand der Technik

**[0001]** Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Sensorelements bzw. einem durch ein derartiges Verfahren hergestelltes mikromechanisches Sensorelement nach den Oberbegriffen der unabhängigen Ansprüche.

**[0002]** Zur Erfassung verschiedener physikalischer Größen (Druck, Temperatur, Luftmasse, Beschleunigung, Drehrate) werden insbesondere im Kraftfahrzeugbereich vielfach Bauelemente mit mikromechanischen Sensorelementen verwendet. Typischerweise werden dabei häufig Messelemente auf Membranen verwendet, die oberhalb einer Kaverne angeordnet sind. Zur Herstellung der Membran bzw. der Kaverne ist neben der sog. Oberflächenmikromechanik, bei der Schichtstapel aus Opfer- und Funktionsschichten abgeschieden, strukturiert und selektiv entfernt werden, auch die sog. Bulkmechanik bekannt, bei der Strukturen aus massivem Material herausgearbeitet werden.

**[0003]** So wird beispielsweise in der WO 02/02458 A1 bzw. DE 100 32 579 A1 ein Verfahren beschrieben, bei dem zur Herstellung eines Hohlraums unter einer Membran unterschiedlich poröse Bereiche in einem Substrat gebildet werden.

**[0004]** Aus der DE 100 30 352 A1 ist bekannt, eine Membran oberhalb einer Kaverne mit Stabilisierungselementen zu stützen. Die Erzeugung derartiger Stabilisierungselemente ist beispielsweise durch Ätzprozesse möglich, die selektiv unterschiedlich dotierte Bereiche aus einem Substrat herauslösen bzw. porös ätzen, wie es auch in den nicht vorveröffentlichten Schriften DE 10 2004 036 035 A1 und DE 101 38 759 A1 beschrieben wird.

**[0005]** Eine weitere Möglichkeit zur Ausbildung eines Hohlraums in einem Substrat wird in der DE 101 14 036 A1 gezeigt. In dem in dieser Schrift beschriebenen Verfahren wird zunächst eine Öffnung in dem Substrat erzeugt, woran sich eine Temperaturbehandlung des Substrats anschließt. Durch die Wahl der Temperatur und der Zeitdauer dieser Temperung bildet sich in der Tiefe des Substrats unter Schließung der Öffnung ein Hohlraum aus. Durch die Verwendung einer Vielzahl von nebeneinander liegender Öffnungen kann mit diesem Verfahren eine Membran mit darunter liegendem Hohlraum erzeugt werden.

**[0006]** In der EP 1 043 770 A1 wird ein Verfahren zur Erzeugung einer Kavität beschrieben, bei dem zunächst mittels eines ersten Ätzschrittes wenigstens ein Graben in einem Substrat erzeugt wird. Nach ei-

ner Passivierung der Wände des Grabens wird im Rahmen eines zweiten anisotropen Ätzschrittes die Kavität gebildet. Zur Bildung einer Membran über der Kavität wird abschließend eine monokristalline Schicht auf das Substrat aufgewachsen.

**[0007]** Aus der Schrift DE 10 2004 036 035 A1 ist ein Verfahren bekannt, eine Gitter als Basis für eine epitaktisch erzeugte Membran zu verwenden. Um den Hohlraum unter dem Gitter zu erzeugen, ist zunächst eine Porösifizierung und anschließend eine thermische Umlagerung des porösen Bereichs vorgesehen. Aus der Schrift DE 100 65 026 A1 ist ein Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Bauelements bekannt, bei dem mittels einer vergrabenen Schicht ein Bereich unter einer Membranbereich erzeugt wird.

**[0008]** Aus der Schrift DE 101 14 036 A1 ist ein SON Verfahren bekannt, bei dem mittels des Einbringens von tiefen Öffnungen in die Oberfläche eines Substrats durch eine nachfolgende Temperaturbehandlung Hohlräume erzeugt werden können.

**[0009]** In der US 2001/0023094 A1 wird ein Verfahren zur Herstellung SOI Wafers beschrieben, bei dem eine vergrabene dotierte Region innerhalb eines Substrats verwendet wird. Durch Trenchlöcher wird diese vergrabene Schicht mittels eines speziellen Ätzangriffs selektiv porös geätzt, bevor die Trenchlöcher mit Polysilizium verfüllt werden.

**[0010]** In der Schrift Mizushima et al.; „Empty-space-in-Silicon technique for fabricating a silicon-on-nothing structure“, Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 20, 13. November 2000, S. 3290–3292 wird die Möglichkeit eines SON beschrieben. Dabei wird ohne eine zusätzliche Behandlung des Substrats eine Membran oberhalb einer Kaverne erzeugt.

## Vorteile der Erfindung

**[0011]** Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Sensorelements bzw. ein durch ein derartiges Verfahren hergestelltes mikromechanisches Sensorelement, welches einen Hohlraum bzw. eine Kaverne und eine Membran zur Erfassung einer physikalischen Größe aufweist. Dabei ist vorgesehen, dass zur Herstellung des Sensorelements verschiedene Verfahrensschritte durchgeführt werden, wobei u. a. eine strukturierte Ätzmaske mit einer Vielzahl von Löchern bzw. Öffnungen auf ein Halbleitersubstrat aufgebracht wird. Weiterhin ist vorgesehen, dass durch einen Ätzvorgang unterhalb der Löcher in der strukturierten Ätzmaske Vertiefungen im Halbleitersubstrat erzeugt werden. Anschließend wird eine Anodisierung des Halbleitermaterials durchgeführt, wobei die Anodisierung vorzugsweise ausgehend von den erzeugten Vertiefungen in dem Halbleitersubstrat statt-

findet. Dabei entstehen unterhalb der Vertiefungen poröse Bereiche, wobei zwischen den porösen Bereichen bzw. den Vertiefungen eine gitterartige Struktur aus unbehandeltem d. h. nicht anodisiertem Substratmaterial stehen bleibt. Diese gitterartige Struktur erstreckt sich vorzugsweise von der Oberfläche des Halbleitersubstrats in die Tiefe. Wahlweise vor oder nach der Anodisierung kann die Ätzmaske zur Erstellung der Vertiefungen entfernt werden. Zur Erzeugung des Hohlraums und der Membran in dem das Sensorelement bildenden Halbleitersubstrat wird eine Temperaturbehandlung durchgeführt. Dabei wird der Hohlraum aus dem wenigstens einen porösizierten Bereich unterhalb einer Vertiefung und die Membran oberhalb des Hohlraums aus der gitterartigen Struktur durch Umlagerung des Halbleitermaterials während der Temperaturbehandlung erzeugt.

**[0012]** Vorteilhafterweise kann durch die Kombination eines Ätzprozesses und einer Anodisierung ein dotierungsfreies bzw. schwach dotiertes monokristallines Gitter oberhalb einer porösen Schicht erzeugt werden, die durch eine thermische Behandlung in eine Membran bzw. einen Hohlraum umgewandelt werden kann. Durch die gezielte Erzeugung der Vertiefungen und deren Eindringtiefe in das Halbleitersubstrat können durch das erfindungsgemäße Verfahren Membranen oder Kanäle bzw. Hohlräume mit geringer Dickentoleranz gebildet werden, die beispielsweise bei der Druckmessung oder der Luftmassenmessung von Vorteil sein können.

**[0013]** In einer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass unter jeder Vertiefung im Substrat genau ein porösizierter (Teil-)Bereich erzeugt wird, wobei der Hohlraum aus einer Vielzahl zusammenhängender porösizierten (Teil-)Bereiche entsteht.

**[0014]** Bei der Herstellung der Vertiefungen kann ein (Kristall-)anisotroper Ätzprozess, beispielsweise mit KOH- oder TMAH-Ätzung, oder ein (Kristall-)isotroper Ätzprozess, beispielsweise mittels eines Trenchätzverfahrens, verwendet werden. Dabei kann vorgesehen sein, dass der Trenchätzprozess wenigstens einen Trenchzyklus aufweist, wobei der Trenchzyklus wenigstens einen Trenchätzschritt und einen Passivierungsschritt enthält. Die Tiefe der Vertiefung und somit die Dicke der Membran kann dabei durch die Anzahl der Wiederholungen eines Trenchzyklus bei der Erzeugung der Vertiefung vorgegeben werden. Somit können vorteilhafterweise sowohl die vertikalen Ausdehnungen der Hohlräume als auch die die Hohlräume bedeckenden Membran in fast beliebiger Dicke vorgegeben werden.

**[0015]** In einer Weiterbildung der Erfindung ist vorgesehen, dass das Halbleitersubstrat wenigstens im porösizierten Bereich und in der gitterartigen Struktur die gleiche Dotierungsart und/oder die gleiche Dotierungskonzentration aufweist. Dabei kann das Halblei-

tersubstrat auch nur sehr schwach dotiert sein, bzw. im Extremfall auch ein Dotierungskonzentration eine Größe von Null aufweisen, d. h. dass Halbleitersubstrat kann vollständig undotiert sein. Eine besondere Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Bildung des porösen Bereichs unterhalb der Vertiefung und die Bildung der gitterartigen Struktur unabhängig von der Dotierungsart und -konzentration sind.

**[0016]** Zur Anodisierung wird das Halbleitersubstrat in eine elektrisch leitfähige Ätzflüssigkeit getaucht, wobei die Ätzflüssigkeit eine Elektrode aufweist, die mit dem Pol einer Spannungsquelle verbunden ist. Im Gegensatz dazu wird das Halbleitersubstrat mit dem anderen Pol der Spannungsquelle verbunden. Vorzugsweise wird dabei die Elektrode mit dem Minuspol und das Substrat mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden, wobei bei entsprechend gewählten Flüssigkeiten und Substraten auch eine umgekehrte Polung denkbar ist.

**[0017]** Die Ausdehnung des porösen Bereichs, der durch die Anodisierung erzeugt wird, kann vorteilhafterweise durch eine erste Zeitdauer vorgegeben werden, in der das Halbleitersubstrat ausgehend von den Vertiefungen anodisiert wird. Dabei kann weiterhin vorgesehen sein, dass die erste Zeitdauer zur Anodisierung in Abhängigkeit von der geometrischen Verteilung der Löcher auf der Ätzmaske bzw. den Vertiefungen im Substrat vorgegeben wird. Dabei kann diese Abhängigkeit beispielsweise über den mittleren Abstand der Löcher bzw. Vertiefungen bestimmt werden. Darüber hinaus ist auch möglich, die Bildung der lateralen und vertikalen Ausdehnungen des Hohlraums in Abhängigkeit von der ersten Anodisierungszeitdauer vorzugeben.

**[0018]** In weiteren Ausgestaltungen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Temperaturbehandlung der gitterartigen Struktur oberhalb des Hohlraums dazu führt, dass sich eine monokristalline Membran bildet. Weiterhin ist denkbar, dass die Lochgeometrie in der Ätzmaske und somit die Verteilung der Vertiefungen auf dem Halbleitersubstrat in Abhängigkeit von der Kristallstruktur des einkristallinen Halbleitersubstrats vorgegeben wird. Bevorzugterweise ist das Halbleitersubstratmaterial nur schwach dotiert oder undotiert. Optional kann auf die durch die Temperaturbehandlung erzeugte Membran eine weitere Schicht, beispielsweise epitaktisch, aufgebracht werden.

**[0019]** Weiterhin kann der vorgeschlagene Membranherstellungsprozess in einen Halbleiterprozess (CMOS- oder mixed-Signal) integriert werden, der keinen Epitaxieschritt aufweist. Daneben kann jedoch ein optionaler Epitaxieschritt die Membrandicke weiter erhöhen oder die Membran mit einer weiteren funktionalen Schicht belegen. Insbesondere durch die Verwendung eines dotierungsfreien Substrats

kann das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft mit einem Schaltungsprozess zur Erzeugung einer Auswerteschaltung kombiniert werden. So können mikroelektronische Bauelemente auch im Bereich des Kanals bzw. des Hohlraums oder der Membran integriert werden. Durch die Herstellung einer einkristallinen Halbleitermembran bzw. -hohlraumstruktur können weitere Vorteile in Form einer erhöhten mechanischen Festigkeit erreicht werden. Darüber hinaus können in monokristallinen Membranen bzw. Gitter- oder Kanalstrukturen zur Auswertung von darin eingebrachten Stress Piezowiderstände mit hohem K-Faktor integriert werden, die ein hohes Messsignal liefern. Die Herstellung des Hohlraums ist auch durch Elektropolitur möglich, wodurch keine Umlagerung des porösen Materials durch einen thermischen Prozess nötig ist. Dabei entsteht direkt bei der Anodisierung ein freitragendes Gitter. Durch das vorgestellte Verfahren kann allgemein ein Hohlraum mit beliebiger vertikaler und lateraler Ausdehnung in beliebiger Tiefe erzeugt werden.

**[0020]** Durch die Verwendung eines Trenchätzprozesses können tiefere Vertiefungen erzeugt werden, so dass der Hohlraum in größeren Tiefen erzeugt werden kann. Dadurch kann die Dicke der Membran in weiten Grenzen freigewählt werden. Ein Epitaxieschritt wie beim bekannten Stand der Technik kann entfallen. Dadurch kann der Prozess in einen Halbleiterschaltungsprozess integriert werden, der keinen Epitaxieschritt beinhaltet, beispielsweise in einen CMOS-Prozess.

**[0021]** Weitere Vorteile ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen bzw. aus den abhängigen Patentansprüchen.

#### Zeichnungen

**[0022]** In den **Fig. 1a bis c** ist schematisch ein Prozessablauf zur Herstellung einer Kaverne mit einer darüber liegenden Membran mittels porösen Siliziums dargestellt, wie er aus dem Stand der Technik bekannt ist. Dagegen zeigen die **Fig. 2a bis f** den erfindungsgemäßen Verfahrensverlauf. **Fig. 3** zeigt eine alternative Herstellung von Vertiefungen, von denen das erfindungsgemäße Verfahren ausgeht. In den **Fig. 4a bis f** sind verschiedene Öffnungsgeometrien u. a. in relativer Position zu der Kristallgeometrie des Halbleitersubstrats dargestellt, die alternativ zur Erzeugung der Vertiefungen verwendet werden können. Schlussendlich sind in den **Fig. 5a und b** weitere Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Erzeugung eines Kanals abgebildet.

#### Ausführungsbeispiel

**[0023]** Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird das erfindungsgemäße Verfahren anhand der Herstellung eines Sensorelements mit einer Membran

und einem Hohlraum verdeutlicht. Dieses erfindungsgemäße Sensorelement kann vorzugsweise bei einem Drucksensor eingesetzt werden, wobei darüber hinaus auch eine Verwendung in einem Luftmassensensor, einem Temperatursensor, einem Beschleunigungssensor und/oder einem Drehratensensor denkbar ist.

**[0024]** In den **Fig. 1a bis c** ist schematisch ein bekanntes Verfahren zur Herstellung einer Membran über einer Kaverne dargestellt. Dabei wird das Material in einem ersten Bereich **110** eines dotierten beispielsweise einkristallinen Siliziumsubstrats **100** entweder in eine andere Dotierungsart umgewandelt oder mit einer anderen Dotierungskonzentration versehen. Anschließend kann durch einen entsprechenden lokalen Anodisierungsprozess dieser Bereich **110** porös geätzt werden, indem der Ätzprozess bevorzugt die im Bereich **110** vorhandene Dotierungsart bzw. Dotierungskonzentration selektiv ätzt. Auf das so erzeugte poröse Silizium im Bereich **110** kann in einem weiteren Verfahrensschritt eine Epitaxieschicht **130** aufgebracht werden, die ebenfalls einkristallin aufwachsen kann. Durch die Epitaxiebedingungen oder eine zusätzliche Temperaturbehandlung des Substrats **100** kann das poröse Siliziummaterial im Bereich **110** umgelagert werden, so dass ein Hohlraum **120** unter der Epitaxieschicht **130** entsteht, wobei gleichzeitig eine Membran **160** gebildet wird. Abschließend können weitere Halbleiterprozesse durchgeführt werden, die beispielsweise Piezowiderstände **140** und/oder eine Auswerteschaltung **150** in oder auf dem so hergestellten mikromechanischen Sensorelement erzeugen.

**[0025]** In dem erfindungsgemäßen Verfahren, welches schematisch in den **Fig. 2a bis f** dargestellt ist, kann dagegen auf eine spezielle Dotierung bzw. auf eine Umdotierung des späteren Hohlraumbereichs verzichtet werden. Darüber hinaus ist das Verfahren auch bei nur schwach dotierten Substraten einsetzbar. Zunächst wird auf einem Substrat **200**, beispielsweise aus einem Halbleitermaterial wie Silizium, eine geeignete (Ätz-)Maske **210**, z. B. Lack, Oxid- oder Nitrid-Schicht(en), für die nachfolgende Herstellung von Vertiefungen **220** im Substrat **200** mittels eines Ätzprozesses erstellt und strukturiert. Bei der Strukturierung der Maske **210** werden Löcher **230** beispielsweise in regelmäßigen Abständen erzeugt, wobei unterschiedliche Muster, z. B. rechteckig, diagonal, hexagonal, ringförmig oder streifenförmig, denkbar sind. Des Weiteren ist nicht nur die Anordnung der Löcher variabel, sondern auch die Form der einzelnen Löcher. So können die Löcher z. B. quadratisch (siehe u. a. die Aufsicht in **Fig. 2a**), rund (siehe **Fig. 4b**) oder rechteckig (siehe u. a. **Fig. 4e**) gestaltet sein. Mit Hilfe dieser so strukturierten Ätzmaske **210** können nun durch einen Ätzprozess entsprechende Vertiefungen **220** in das Siliziumsubstrat **200** eingebracht werden. In der **Fig. 2a bzw. b** sind Vertiefungen **220**

dargestellt, die mittels eines anisotropen Ätzprozesses, beispielsweise mit KOH oder TMAH typische pyramidenförmige Strukturen in das Substrat geätzt wurden. Die Pyramidenwände der Vertiefungen **220** bilden dabei bevorzugte Ätzrichtungen im (einkristallinen) Siliziumsubstrat **200** ab, wobei die Ätzfront stoppt, nachdem pyramidenförmige Strukturen geätzt wurden. Nach Erzeugung der Vertiefungen **220** kann das so vorgeätzte Substrat **200** zur Anodisierung in eine elektrisch leitfähige Ätzlösung **240**, beispielsweise (Flusssäure) getaucht werden. Wird nun das Siliziumsubstrat **200** mit einem Pol einer Spannungsquelle verbunden und in die elektrisch leitfähige Lösung **240** eine Elektrode **250** getaucht, die mit dem anderen Pol der Spannungsquelle verbunden ist, so kann die Anodisierung gestartet werden, da sich innerhalb des Siliziumsubstrats **200** Feldlinien **260** beginnend von den Spitzen der Vertiefungen **220** ausbilden. Wie in **Fig. 2c** gezeigt wird, kann dabei vorzugsweise das Substrat **200** auf das positive Potential gelegt werden, wohingegen die Elektrode **250** in der Lösung **240** auf Massepotential liegt. Durch die so durchgeführte Anodisierung kann das Substratmaterial unter den Vertiefungen **220** porös geätzt werden, so dass mehrere nebeneinander liegende poröse Bereiche **270** entstehen, wie in **Fig. 2d** gezeigt wird. Mit zunehmender Zeitdauer, in der der Anodisierungsprozess durchgeführt wird, vergrößern sich die porösen Bereiche unterhalb der Vertiefungen sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung, bis mehrere nebeneinander liegende poröse Bereiche ineinander übergehen und einen gemeinsamen großen porösen Bereich bilden. Dabei ist naheliegend die Anodisierungszeit in Abhängigkeit von der geometrischen Verteilung oder dem mittleren Abstand der Vertiefungen **220** und/oder der Löcher **230** in der Ätzmaske **210** vorzugeben, um ein gezieltes Ineinanderwachsen der porösen Bereiche zu ermöglichen. Neben dem Abstand der Ätzlöcher beeinflusst auch das Vorhandensein einer möglicherweise vorliegenden Dotierung des Substrats das Ätzergebnis. Zwischen den Vertiefungen **220** entstehen durch diesen Anodisierungsprozess Bereiche **280**, die nicht geätzt werden und somit dem unbehandelten Substratmaterial entsprechen. Aus der Gesamtheit der ungeätzten Bereiche entsteht somit eine gitterartige Struktur **280**, welche ebenfalls wie das Substrat **200** einkristallin vorliegt und vorzugsweise schwach oder gering dotiert ist. Nach dem Entfernen der Ätzmaske **210** vom Substrat **200** ist vorgesehen, eine Temperaturbehandlung durchzuführen. Im Rahmen dieser Temperaturbehandlung erfolgt eine Umlagerung des Siliziummaterials sowohl in der gitterartigen Struktur **280** als auch im porösen Bereich **270**. So schließen sich die anfangs pyramidenförmigen Vertiefungen **220** und bilden eine vorzugsweise einkristalline Membran **285**, während sich das Siliziummaterial im porösen Bereich **270** zu einem unter der Membran geschlossenen Hohlraum **275** umlagert. Auch die Spitzen zwischen den einzelnen Vertiefungen, wie sie in **Fig. 2d**

abgebildet sind, werden durch diese Temperaturbehandlung geglättet, so dass eine durchgehend (monokristalline) Membran **285** entsteht. Optional kann auf das so erzeugte mikromechanische Sensorelement noch eine weitere Materialschicht **290** aus dem gleichen oder einem anderen Material abgeschieden werden, beispielsweise mit einem Epitaxieverfahren.

**[0026]** Statt einem anisotropen Ätzprozess, wie er anhand der **Fig. 2a** und **Fig. 2b** zur Erzeugung der Vertiefungen **220** verwendet wird, kann auch ein isotropes Ätzverfahren bzw. ein Trenchätzverfahren verwendet werden, um Vertiefungen **300** zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird ebenfalls zunächst eine Ätzmaske **210** auf das Substrat **200** aufgebracht, welche Löcher **230** zur Erzeugung der Vertiefungen **300** aufweist. Durch diese Ätzmaske können nun mittels wenigstens eines Trenchzyklus die Vertiefungen **300** erzeugt werden. Typischerweise wird bei einem bevorzugten Trenchätzverfahren wie das RIE- oder das DRIE-Verfahren in einem Trenchzyklus abwechselnd ein Trenchätzschritt (z. B. mit  $\text{SF}_6$ ) mit nachfolgender Passivierung (z. B. mit  $\text{C}_1\text{F}_8$ ) der getrenchten Seitenwände durchgeführt. Dabei entsteht an den Seitenwänden eine typische Einbuchtung, die bei einer Wiederholung des Trenchzyklus zu einer Riffelung führt, wie sie in **Fig. 3** am Rand der Vertiefung **300** dargestellt sind (siehe Bereich **310**). Durch die Wahl der Wiederholungen, in denen jeweils ein Trenchzyklus durchgeführt wird, kann die vertikale Ausdehnung der Vertiefung **300** und schlussendlich die Dicke der Membran **285** eingestellt werden. Die Anodisierung erfolgt im weiteren entsprechend dem vorherig beschriebenen Verfahren (vergleiche auch **Fig. 2c**).

**[0027]** Durch die Verwendung eines Trenchätzprozesses können tiefere Vertiefungen erzeugt werden, so dass der Hohlraum in größeren Tiefen erzeugt werden kann. Dadurch kann die Dicke der Membran in weiten Grenzen frei gewählt werden. Ein Epitaxieschritt wie beim bekannten Stand der Technik kann entfallen. Dadurch kann der Prozess in einen Halbleiterprozess integriert werden, der keinen Epitaxieschritt beinhaltet, beispielsweise einen CMOS-Prozess.

**[0028]** Neben der Anordnung der Löcher **230** in der Ätzmaske **210** können, wie bereits erwähnt, auch andere geometrische Verteilungen oder Ausgestaltungen zur Erzeugung der Vertiefungen gewählt werden, wie sie in den **Fig. 2a**, **Fig. 4b**, **Fig. 4c**, **Fig. 4d**, **Fig. 4e** und **Fig. 4f** dargestellt sind. Darüber hinaus kann die Lochgeometrie bzw. die Ausrichtung des Anodisierungsprozesses auch an bestimmte Kristallstrukturen des Substrats bzw. eines Wafers ausgerichtet werden. So ist beispielsweise denkbar, dass ein Wafer zur Herstellung des erfindungsgemäßen Sensorelements verwendet wird, wie er in **Fig. 4a** dargestellt ist, der eine Oberfläche mit einer (100)-Orientierung und einer Seitenfläche mit (110)-Orientierung

aufweist. Somit kann die Lochgeometrie und die Ätzprozesse entsprechend abgestimmt werden, um ein optimales Zusammenwachsen der porösen Bereiche unterhalb der Vertiefungen zu ermöglichen.

**[0029]** In der **Fig. 4c** ist eine Aufsicht auf ein Substrat gezeigt, welches einen Membranrand **420**, eine gitterartige Struktur **430** und Ätzlöcher **440** aufweist. Durch die Ätzlöcher **440** erfolgt eine (Kristall-)anisotrope Unterätzung, beispielsweise mit KOH oder TMAH, so dass sich benachbarte Bereiche überlappen. Zwischen den unterätzten Bereichen können Stellen **460** entstehen, die bei einer entsprechenden Steuerung des Ätzprozesses ebenfalls unterätzt werden. Eine Abwandlung zur Lochgeometrie, wie sie in **Fig. 4e** dargestellt ist, zeigt **Fig. 4f**. Dabei ermöglicht die Verwendung zusätzlicher Ätzöffnungen **445** eine gleichmäßigere Unterätzung am Membranrand und somit ein bessere Randeinspannung. Allgemein können die gitterartigen Strukturen in den **Fig. 4c** bis **Fig. 4f** sowohl bei porös geätzten, als auch bei mit KOH oder TMAH geätzten Bereichen verwendet werden.

**[0030]** Neben der Verwendung für das erfindungsgemäße Verfahren können die vorgeschlagenen Lochgeometrien der **Fig. 4b** bis **f** auch bei der Herstellung eines Hohlraums bzw. einer Membran mit dotiertem Substratmaterial verwendet werden, wie sie beispielsweise in der DE 10 2004 036 035 A1 und DE 101 38 759 A1 beschrieben werden. Dabei können die Ätzöffnungen sowohl durch das Überwachsen mit einer weiteren Materialschicht als auch durch eine Temperaturbehandlung verschlossen werden.

**[0031]** In einem weiteren Ausführungsbeispiel wird das erfindungsgemäße Verfahren dazu genutzt, durch Membranen **585** vergrabene Kanäle **500**, wie sie in **Fig. 5a** dargestellt sind, zu erzeugen. Derartige Kanäle lassen sich beispielsweise dadurch erzeugen, dass die Löcher **230** entsprechend nebeneinander angeordnet sind, so dass durch die Unterätzung ein zusammenhängender länglicher Hohlraum entsteht. Diese Kanäle **500** können eine oder mehrere Zugangsöffnungen **510** aufweisen, die nach der Temperaturbehandlung und somit nach dem Verschließen der Ätzöffnungen und Bildung der Membran **585** zusätzlich in die Membran und somit in das Substrat eingebracht werden können. Als spezielle Ausgestaltung ist in **Fig. 5b** ein mäanderartiger Verlauf eines so erzeugten vergrabenen Kanals **505** im Substrat **200** dargestellt, der ebenfalls durch geeignete Anordnungen der Löcher **230** gebildet werden kann und bei dem zwei Zugangsöffnungen **515** vorgesehen sind. Durch diese Zugangsöffnungen kann dann beispielsweise ein Medium durch den Kanal geleitet werden.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Sensorelements mit einem Hohlraum (**275, 500, 505**) und einer Membran (**285, 585**), wobei zur Herstellung des Sensorelements die Verfahrensschritte

- Aufbringen einer strukturierten Ätzmaske (**210**) mit einer Vielzahl von Löchern (**230**) auf ein Halbleitersubstrat (**200**), und
- Erzeugen von Vertiefungen (**220, 300, 440, 445**) unterhalb der Löcher mittels eines Ätzprozesses mit KOH oder TMAH oder einem Trenchätzprozess, und
- Bildung
- mehrerer nebeneinander liegender porösizierten Bereichs (**270**) unterhalb den Vertiefungen mittels einer Anodisierung im Halbleitersubstrat, wobei vorgesehen ist, dass bei zunehmender Zeitdauer, in der der Anodisierungsprozess durchgeführt wird, die nebeneinander liegenden porösen Bereiche ineinander übergehen und einen gemeinsamen porösen Bereich bilden, und
- einer gitterartigen Struktur (**280, 430**) an der Oberfläche des Halbleitersubstrats aus unporösizierendem Substratmaterial zwischen den Vertiefungen, und
- Entfernen der Ätzmaske, und
- Erzeugung
- des Hohlraums aus dem wenigstens einen porösizierten Bereich und
- einer monokristallinen Membran oberhalb des Hohlraums aus der gitterartigen Struktur mittels einer Temperaturbehandlung oder einer Elektropolitur des Halbleitersubstrats, vorgesehen sind.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- der Hohlraum vollständig vergraben im Halbleitersubstrat erzeugt wird und
- wenigstens zwei Durchgangsöffnungen (**510, 515**) durch die Membran erzeugt werden, so dass ein Kanal (**585**) im Halbleitersubstrat gebildet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erzeugte Kanal einen mäanderförmigen Verlauf im Substrat darstellt.

4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausdehnung des porösizierten Bereichs im Halbleitersubstrat durch eine vom mittleren Abstand der Löcher bzw. Vertiefungen abhängige erste Anodisierungszeitdauer vorgebar ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verhältnis der Durchmesser der Löcher bzw. Vertiefungen zu deren Abstand in lateraler Richtung ein Verhältnis von 0,3 zu 2,3 bzw. in wenigstens einer lateraler Richtung ein Verhältnis von 0,4 zu 2,3 aufweist.

6. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- der Trenchätzprozess wenigstens einen Trenchzyklus aufweist, und
- der Trenchzyklus einen Trenchätzschritt und einen Passivierungsprozess aufweist, und
- die Tiefe der Vertiefung und somit die Dicke der Membran in Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Trenchzyklen bei der Erzeugung der Vertiefung vorgebar ist.

7. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Halbleitersubstrat im porösizierten Bereich und in der gitterartigen Struktur die gleiche Dotierungskonzentration aufweist, wobei insbesondere vorgesehen ist, dass

- die Bildung des porösizierten Bereichs unterhalb der Vertiefungen und
- die Bildung der gitterartigen Struktur dotierungsunabhängig ist.

8. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Anodisierung das Substrat in eine elektrisch leitfähige Ätzflüssigkeit, insbesondere Flusssäure, getaucht wird, wobei

- die Ätzflüssigkeit eine Elektrode (**250**) aufweist, die mit dem Minuspol einer Spannungsquelle verbunden ist und
- das Substrat mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- die Lochgeometrie auf der Ätzmaske in Abhängigkeit von der Kristallstruktur des einkristallinen Halbleitersubstrats vorgebar ist, und/oder
- das Halbleitersubstratmaterial nur schwach dotiert ist, und/oder
- auf die Membran eine weitere, insbesondere epitaktische, Schicht (**290**) aufgebracht wird.

10. Mikromechanisches Sensorelement hergestellt nach einem der in den Ansprüchen 1 bis 9 beschriebenen Herstellungsverfahren, wobei vorgesehen ist, dass das Sensorelement

- den in dem Halbleitersubstrat vergrabenen Hohlraum (**275, 500, 505**) und
- die über dem Hohlraum befindliche einkristalline Membran (**285, 585**) aus dem Halbleitersubstratmaterial aufweist, wobei der Hohlraum einen Kanal (**500, 505**) mit wenigstens zwei Zugangsöffnungen (**510, 515**) durch die Membran aufweist.

11. Mikromechanisches Sensorelement nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass vorgesehen ist, dass der Kanal (**505**) einen mäanderförmigen Verlauf im Halbleitersubstrat (**200**) aufweist.

12. Mikromechanisches Sensorelement nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Medium durch die Zugangsöffnungen und den Kanal geleitet werden kann.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1a

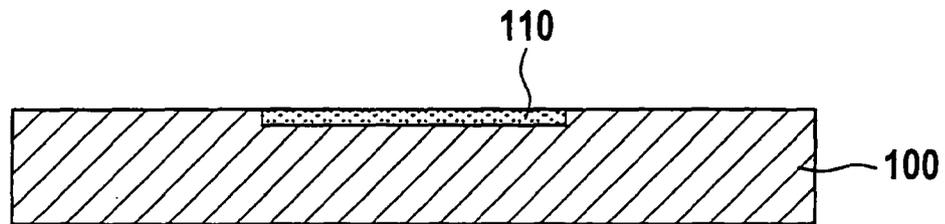


Fig. 1b

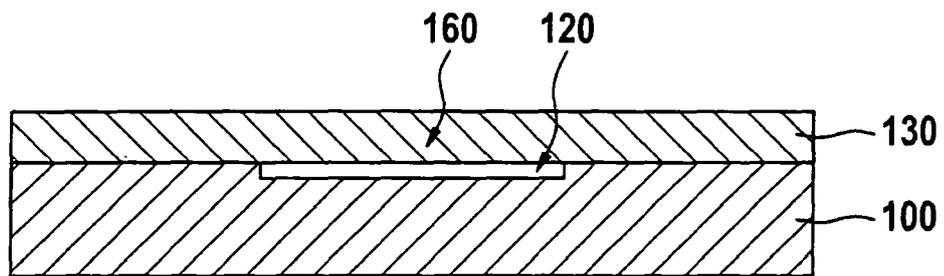


Fig. 1c

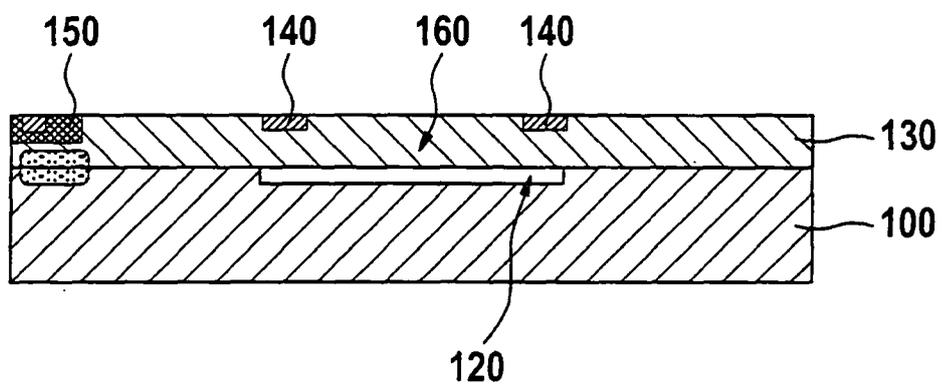


Fig. 2a

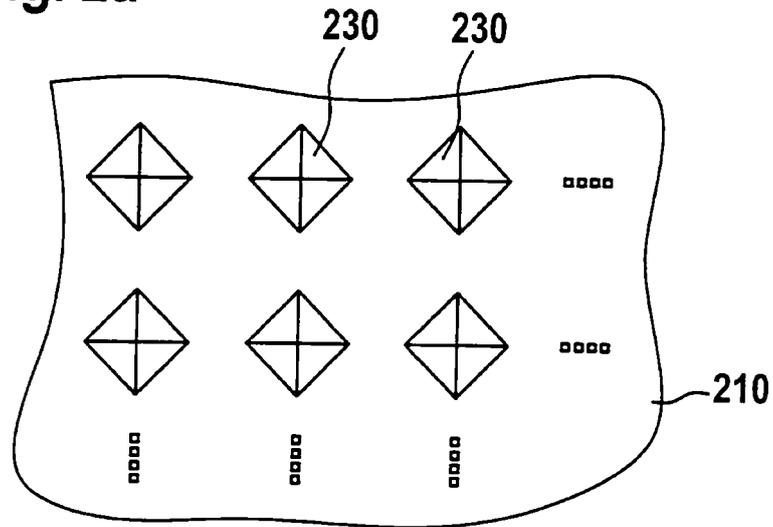


Fig. 2b

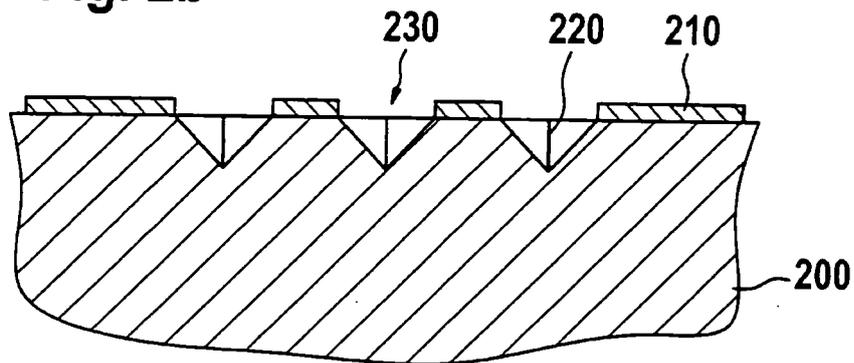
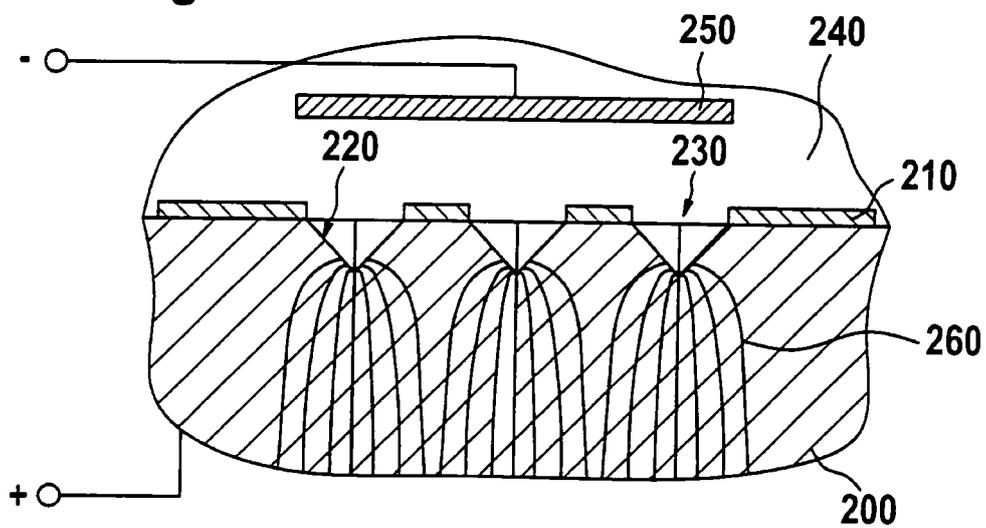
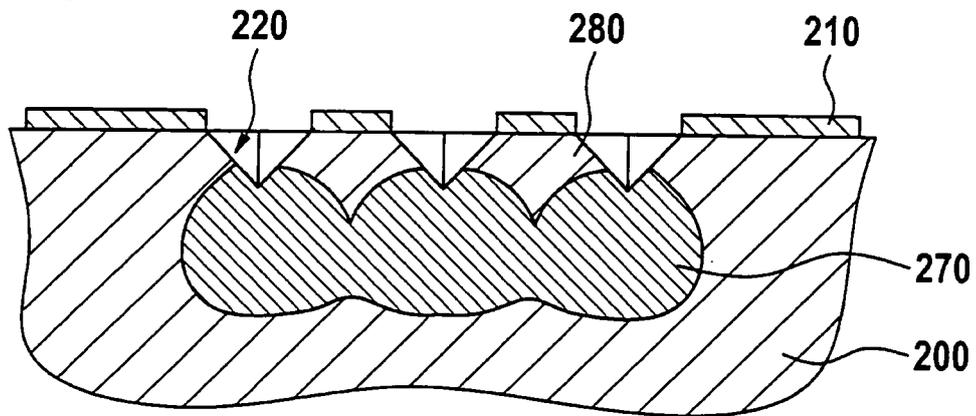


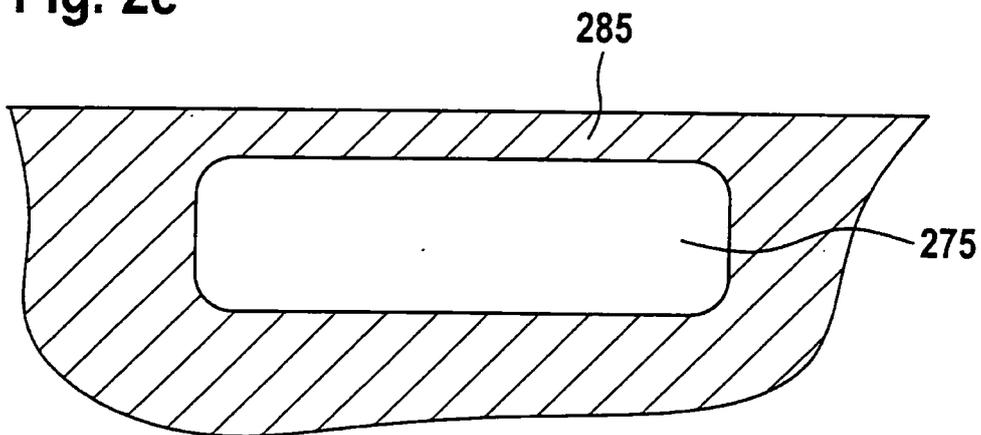
Fig. 2c



**Fig. 2d**



**Fig. 2e**



**Fig. 2f**

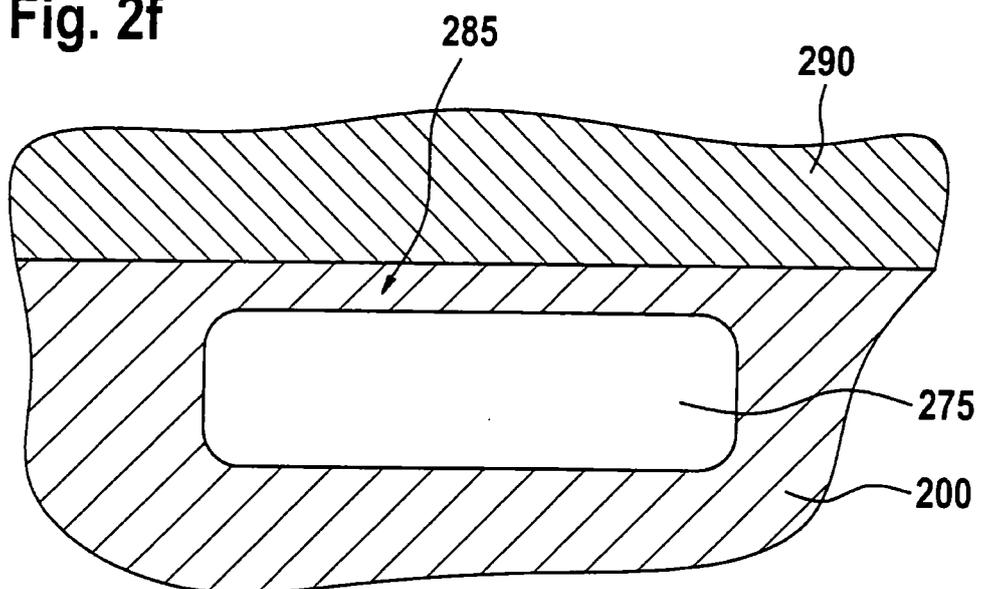


Fig. 3

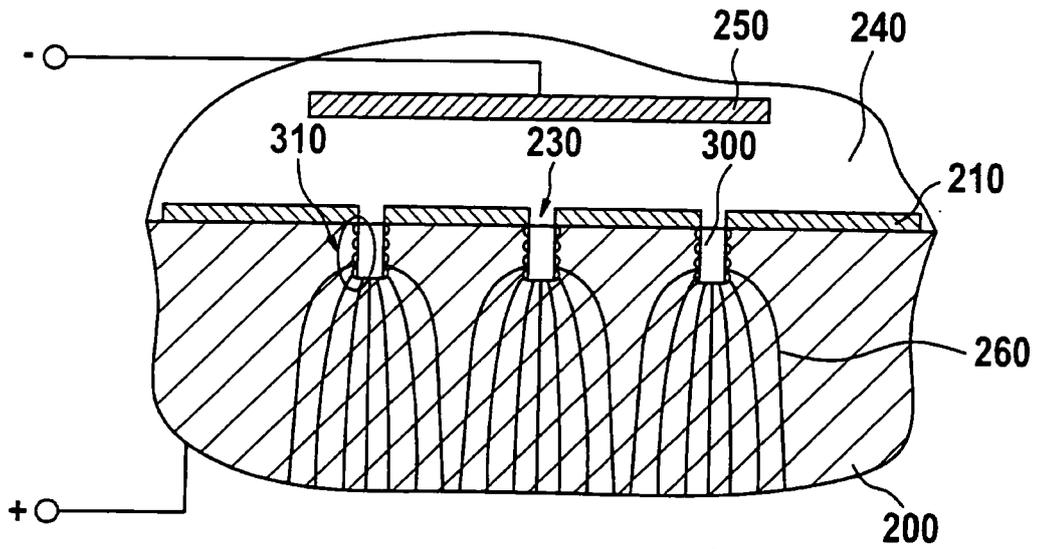
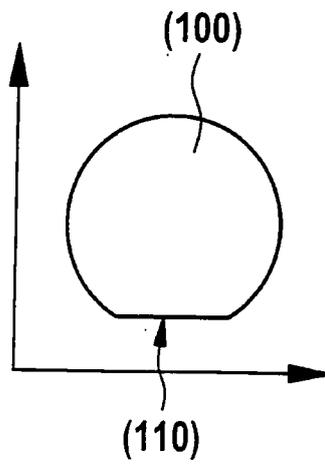
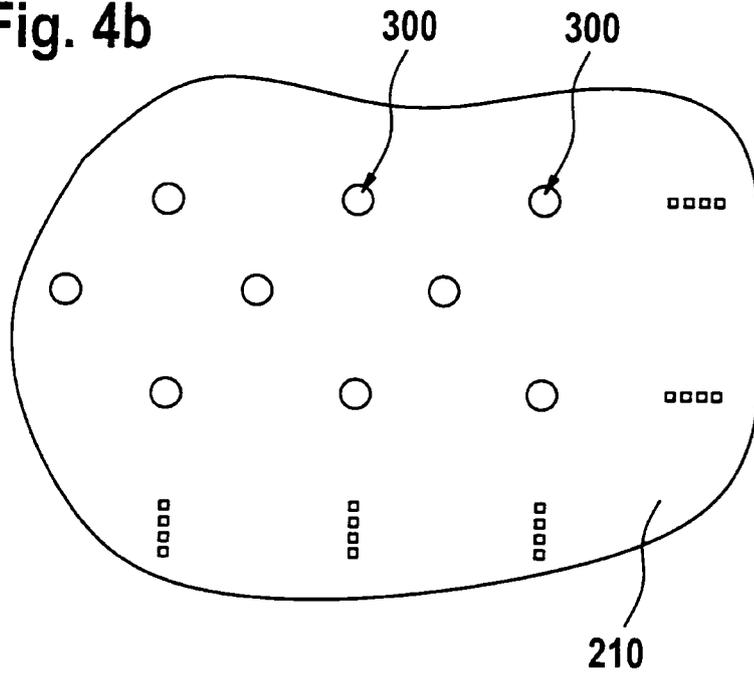


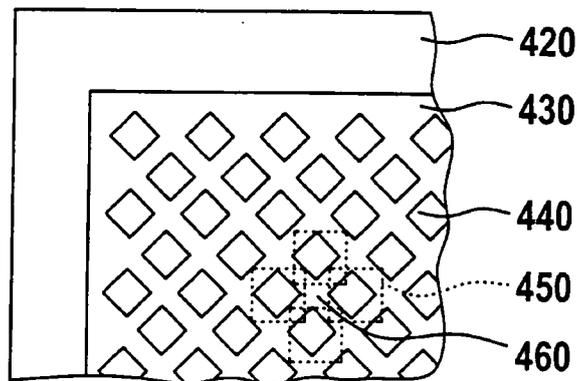
Fig. 4a



**Fig. 4b**



**Fig. 4c**



**Fig. 4d**

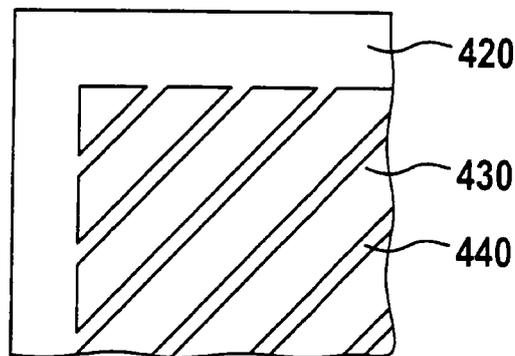


Fig. 4e

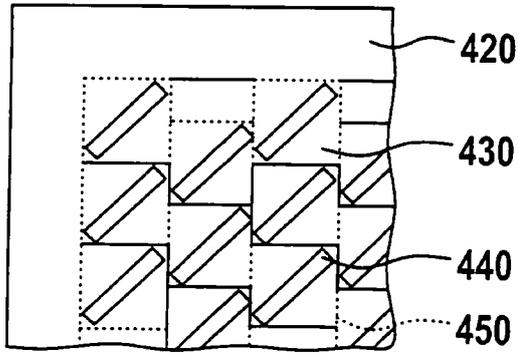


Fig. 4f

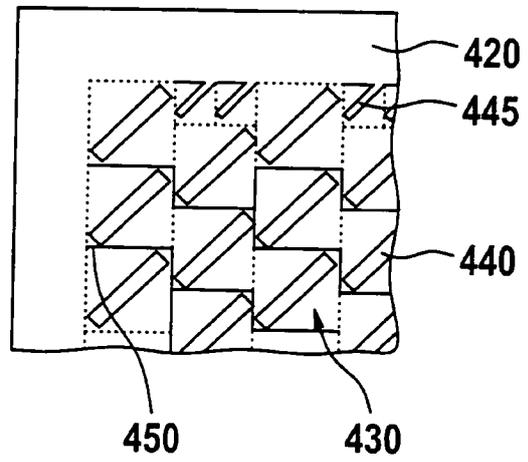


Fig. 5a

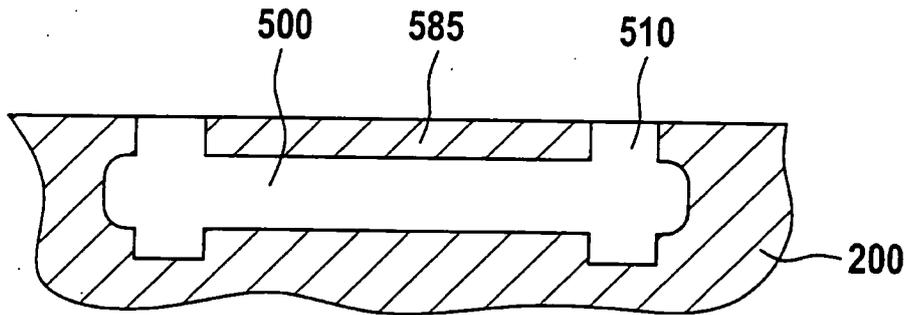


Fig. 5b

