

Beschreibung

Elektroakustischer Wandler

5 Die vorliegende Erfindung betrifft einen elektroakustischen Wandler. Bei dem elektroakustischen Wandler kann es sich um einen mit akustischen Oberflächenwellen arbeitenden Wandler (Surface Acoustic Wave = SAW) oder um einen mit akustischen Volumenwellen arbeitenden Wandler (Bulk Acoustic Wave = BAW)
10 handeln.

Eine Erhöhung des Kopplungsfaktors eines elektroakustischen Wandlers ist gleichbedeutend mit der Reduzierung der Verluste bei der Umwandlung zwischen elektrischer Energie und
15 mechanischer Energie in dem Wandler. Ein hoher Kopplungsfaktor ermöglicht eine große Bandbreite des Wandlers.

In "Acoustic waves in fields and solids" von B. Auld, Volume
20 II, John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto, 1973, Seiten 347 ff. und 357 ff. ist ein sogenannter "thin plate resonator" beschrieben. Dabei wird eine Schwingung einer Platte in zwei Raumrichtungen untersucht und die entsprechenden Moden beschrieben.

25 Ferner wird in dem Vortrag "Cross-sectional Dilation Mode Resonator with Very High Electromechanical Coupling up to 10 % using AlN" von C. Zuo et al., der auf dem Frequency Control Symposium 2012 gehalten wurde, beschrieben, wie der
30 Kopplungsfaktor einer AlN-Schicht durch eine zweidimensionale Strukturierung erhöht werden kann. Die AlN-Schicht wird derart strukturiert, dass eine zweidimensionale Schwingungsmode angeregt wird, wobei in Dickenrichtung der

AlN-Schicht ein elektrisches Wechselfeld angelegt wird, das neben der Anregung in Dickenrichtung zusätzlich eine Anregung in eine Breitenrichtung bewirkt. Dadurch wird der elektromechanische Kopplungsfaktor im Vergleich zu einer
5 reinen Dickenschwingung, die beispielsweise bei einem FBAR auftritt, erhöht.

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine weitere Möglichkeit anzugeben, bei einem elektroakustischen Wandler
10 den Kopplungsfaktor zu erhöhen.

Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand des vorliegenden Anspruchs 1 gelöst. Weitere Ausgestaltungen und vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der weiteren Ansprüche.

15

Es wird ein elektroakustischer Wandler mit einer piezoelektrischen Schicht vorgeschlagen, die derart strukturiert ist, dass bei einem in einer Raumrichtung angelegten elektrischen Wechselfeld eine Schwingungsmode mit
20 Schwingungen in drei Raumrichtungen angeregt wird.

Gegenüber Schwingungsmoden mit Schwingungen in lediglich eine oder in zwei Raumrichtungen ist der Kopplungsfaktor bei einer Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen
25 weiter erhöht. In diesem Fall können mehr Komponenten des Piezotensors ausgenutzt werden und tragen zum Kopplungsfaktor bei.

Im Gegensatz zur eindimensionalen Schwingungsmode, bei der
30 nur ein Element des Piezotensors genutzt wird, nämlich die longitudinale Komponente oder die Scherkomponente, werden bei Schwingungsmoden mit Schwingungen in drei Raumrichtungen

mindestens drei und bis zu sechs Elemente des Piezotensors genutzt.

Von diesen maximal sechs Elementen sind je drei für
5 longitudinale Schwingungen und drei für Scherschwingungen
verantwortlich. Durch diese Nutzung möglichst vieler Elemente
des Piezotensors wird eine Erhöhung des Kopplungsfaktors
erzielt. Hierbei ist es nicht erheblich, ob es sich nur um
longitudinale oder Scheranregungen handelt, da auch jede
10 beliebige Kombination derselben den Zweck einer Erhöhung des
Kopplungsfaktors erfüllt.

Ein elektroakustischer Wandler, dessen Kopplungsfaktor auf
diese Weise erhöht ist, kann beispielsweise in Einzelfiltern,
15 Duplexern, Resonatoren, Sensoren, Resonatorfiltern, Modulen,
Bandsperrern oder Notchfiltern verwendet werden.

Das in einer Raumrichtung angelegte elektrische Wechselfeld
ist üblicherweise ein elektrisches Wechselfeld, das zwischen
20 zwei flächigen Elektroden anliegt. Die piezoelektrische
Schicht kann dabei zwischen den beiden Elektroden angeordnet
sein. Die piezoelektrische Schicht ist hier derart
strukturiert, dass sich keine einfache akustische
Volumenwelle ausbildet, bei der die piezoelektrische Schicht
25 lediglich in einer Raumrichtung schwingt, sondern vielmehr
eine Schwingungsmode angeregt wird, bei der die
piezoelektrische Schicht in drei Raumrichtungen schwingt.

Die piezoelektrische Schicht kann beispielsweise eines der
30 folgenden Materialien aufweisen: Zinkoxid (ZnO),
Aluminiumnitrid (AlN), Lithiumtantalat, Lithiumniobat, Blei-
Zirkonat-Titanat (PZT) und PZT-Ersatzmaterialien. Ferner kann
die piezoelektrische Schicht Zusätze und Dotierungen zu den

piezoelektrischen Materialien aufweisen, beispielsweise kann AlN mit Sc dotiert sein.

Die piezoelektrische Schicht kann eine flächige Schicht
5 aufweisen, die mit Löchern und/oder Schlitzen strukturiert ist.

Hier hat sich überraschenderweise gezeigt, dass durch die Strukturierung einer flächigen Schicht mit Löchern und/oder
10 Schlitzen der Kopplungsfaktor erhöht werden kann. Durch das Strukturieren mit Löchern und/oder Schlitzen entstehen in der piezoelektrischen Schicht Strukturen, die die Anregung einer Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen ermöglichen.

15

Der Wandler kann einen Bereich aufweisen, in dem die Ausdehnung der piezoelektrischen Schicht in der Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht am höchsten ist, mindestens genauso groß ist wie die Ausdehnung
20 der piezoelektrischen Schicht in die übrigen Raumrichtungen. In diesem Bereich können die Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen besonders gut angeregt werden. Je größer dieser Bereich ausgestaltet ist, desto stärker wird der Kopplungsfaktor des elektroakustischen Wandlers erhöht,
25 da der Anteil der Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen in diesem Fall erhöht wird.

In einem Randbereich der piezoelektrischen Schicht kann die Ausdehnung der piezoelektrischen Schicht in Richtung der
30 höchsten Schallgeschwindigkeit kleiner sein als die Ausdehnung der piezoelektrischen Schicht in die übrigen Raumrichtungen. Dadurch kann die Entstehung von Störmoden in den Randbereichen vermieden werden, die sonst auf Grund der

endlichen Dimensionierung der piezoelektrischen Schicht entstehen könnten.

Die Ausdehnung der piezoelektrischen Schicht in der Richtung,
5 in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht am höchsten ist, kann so gewählt werden, dass der Resonator in der Grundmode betrieben wird. Dazu kann die Dicke der piezoelektrischen Schicht zwischen 30 und 70 % der akustischen Wellenlänge der Resonanzfrequenz des Wandlers
10 gewählt werden. Vorzugsweise liegt die Dicke in einem Bereich zwischen 40 und 60 % der akustischen Wellenlänge der Resonanzfrequenz des Wandlers. Des Weiteren ist ein Betrieb des Resonators auch in einer Obermode denkbar.

15 Die Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit am höchsten ist, wird durch die Kristallstruktur der piezoelektrischen Schicht bestimmt. Die Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit am höchsten ist, kann beispielsweise eine vertikale Richtung sein, die senkrecht zu den flächigen
20 Elektroden ausgerichtet ist. Die Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit am höchsten ist, kann jedoch auch einen beliebigen anderen Winkel zu den Elektroden ausbilden.

Der elektroakustische Wandler kann eine erste und eine zweite
25 Elektrode aufweisen, wobei eine Oberseite der piezoelektrischen Schicht mit der ersten Elektrode und eine Unterseite der piezoelektrischen Schicht mit der zweiten Elektrode verbunden ist. Die erste Elektrode wird auch als Top-Elektrode bezeichnet. Die zweite Elektrode wird auch als
30 Bottom-Elektrode bezeichnet.

Dabei können die Ober- und die Unterseite jeweils unmittelbar an der jeweiligen Elektrode anliegen. Ferner weist die

piezoelektrische Schicht eine Seitenfläche auf, die senkrecht zu der Oberseite und zu der Unterseite sein kann. Die Seitenfläche kann auch einen anderen Winkel mit der Ober- und der Unterseite bilden. Die Seitenfläche kann frei von den
5 Elektroden sein.

Die erste und die zweite Elektrode können beispielsweise eines der folgenden Metalle und deren Legierungen aufweisen: Al, Cu, Au, Ag, Pt, Pd, W, Ni, Mo, Nb, V, Ti, Cr, Mg, Fe, Ir,
10 Ru, Rh, Os, Bi, Hf. Ferner können die erste und die zweite Elektrode die hier nicht explizit aufgeführten Nebengruppenmetalle und Lanthanoide sowie refraktorisches Carbide, Nitride und Boride der früheren Nebengruppen-Metalle, insbesondere der Gruppen 4, 5, 6 (alte Bezeichnung IVB, VB, VIB), also Ti,
15 Zr, Hf (Gruppe 4), V, Nb, Ta (Gruppe 5), Cr, Mo, W (Gruppe 6), aufweisen, sowie beliebige Mischsysteme hieraus. Die Elektroden können aus einem einzigen leitfähigen Material bestehen oder aus Stapel von mehreren Schichten aufgebaut sein, wobei zumindest eine dieser Schicht ein leitfähiges
20 Material aufweist.

Die piezoelektrische Schicht kann mehrere Blöcke aufweisen, die ein piezoelektrisches Material aufweisen, wobei die Ausdehnung der Blöcke in der Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht am höchsten
25 ist, mindestens so groß sein wie die Ausdehnung des jeweiligen Blocks in die übrigen Raumrichtungen. Die Blöcke können voneinander isoliert sein. Insbesondere kann zwischen zwei benachbarten Blöcken je ein Zwischenraum angeordnet
30 sein, so dass die benachbarten Blöcke sich nicht berühren. Wie im Folgenden noch genauer diskutiert wird kann in dem Zwischenraum eine Verbindungsstruktur, ein Vakuum, Luft oder ein beliebiges anderes Material, vorzugsweise ein Material

mit einem anormalen thermomechanischen Verhalten, angeordnet sein.

Darüber hinaus kann die piezoelektrische Schicht weitere
5 Blöcke enthalten, die ebenfalls ein piezoelektrisches
Material aufweisen und die diese Konstruktionsvorschrift
nicht erfüllen. Entscheidend ist lediglich, dass ein
wesentlicher Teil, beispielsweise mindestens 70 %, aller
Blöcke der piezoelektrischen Schicht die Konstruktions-
10 vorschrift erfüllen. Die Blöcke, bei denen die Ausdehnung in
Richtung der höchsten Schallgeschwindigkeit mindestens so
groß ist wie die Ausdehnung in die übrigen Raumrichtungen,
ermöglichen das Anregen einer Schwingungsmode mit
Schwingungen in alle drei Raumrichtungen.

15

Die Elektrode kann eine erste und eine zweite Elektroden-
struktur aufweisen, wobei jeder der Blöcke entweder mit der
ersten oder mit der zweiten Elektrodenstruktur verbunden ist.
Dementsprechend können an benachbarten Blöcken, von denen der
20 eine mit der ersten Elektrodenstruktur verbunden ist und der
andere mit der zweiten Elektrodenstruktur verbunden ist,
unterschiedliche Potentiale angelegt werden, sodass die
Blöcke gegenläufig zueinander gekoppelt sind. Eine gegen-
läufige Kopplung verschiedener Bereiche der piezoelektrischen
25 Schicht ermöglicht es, Nichtlinearitäten des Wandlers zu
unterdrücken.

Dementsprechend können die Blöcke und die Elektrodenstruktur
derart angeordnet sein, dass zwei benachbarte Blöcke mit
30 unterschiedlichen Elektrodenstrukturen verbunden sind.

Sowohl die erste als auch die zweite Elektrode können eine
erste und eine zweite Elektrodenstruktur aufweisen.

Alternativ könnte der Wandler derart ausgestaltet sein, dass eine der ersten und der zweiten Elektrode eine erste und eine zweite Elektrodenstruktur aufweist und die jeweils andere Elektrode eine einzige durchgängige Elektrodenstruktur aufweist.

Zwischen zwei Blöcken kann eine Verbindungsstruktur angeordnet sein, die die beiden Blöcke in einer lateralen Richtung miteinander verbindet. Die laterale Richtung kann senkrecht zu einer Flächennormale der Elektroden sein. Die Verbindungsstruktur kann ein dielektrisches Material aufweisen.

Die Verbindungsstruktur kann einen Steg bilden, der sich von einem ersten Block in der lateralen Richtung zu dem zweiten Block erstreckt. Die Zwischenräume zwischen den Blöcken können nicht vollständig durch die Verbindungsstruktur ausgefüllt sein.

Ferner können benachbarte Blöcke auch in einer zweiten lateralen Richtung, die senkrecht zur oben genannten lateralen Richtung ist, durch die Verbindungsstruktur verbunden sein.

Es kann sich ein Aufbau der piezoelektrischen Schicht ergeben, bei dem die Verbindungsstruktur parallel zueinander verlaufende erste Stege aufweist, die sich in der lateralen Richtung erstrecken, und ebenfalls parallel zueinander verlaufende zweite Stege aufweist, die sich senkrecht zu den ersten Stegen der ersten Verbindungsstruktur in der zweiten lateralen Richtung erstrecken. Die ersten und zweiten Stege können auch in einem anderen Winkel zueinander angeordnet sein. Beispielsweise können die piezoelektrische Schicht und

die Stege derart angeordnet sein, dass die ersten und zweiten Stege Winkel von 30°, 45° oder 60° einschließen.

An den Schnittpunkten der ersten Stege und der zweiten Stege
5 der Verbindungsstruktur kann jeweils ein Block angeordnet
sein. Zwischen den Stegen und Blöcken kann ferner ein
Zwischenraum frei bleiben. Der Zwischenraum kann
beispielsweise mit einem Vakuum, mit Luft oder mit einem
dielektrischen Material gefüllt sein.

10

Das dielektrische Material kann weitere vorteilhafte
Eigenschaften aufweisen, die den Resonator in einer
gewünschten Weise beeinflussen. Beispielsweise kann das
dielektrische Material ein anormales thermomechanisches
15 Verhalten aufweisen, das den Temperaturgang des Resonators
minimieren kann. Das dielektrische Material kann ein steifes
bzw. hartes Material mit einem geringen oder negativen
Ausdehnungskoeffizienten, so dass es über den auftretenden
Stress ebenfalls den Temperaturgang des Resonators
20 beeinflussen kann. Der Ausdehnungskoeffizient des
dielektrischen Materials kann insbesondere kleiner sein als
der Ausdehnungskoeffizient des piezoelektrischen Materials.

25

Materialien, die sich in ihren elastischen Eigenschaften von
dem piezoelektrischen Material unterscheiden, können ferner
z.B. dazu verwendet werden, eventuell auftretende Störmoden
zu unterdrücken oder in ihrer Frequenzlage zu beeinflussen.

30

Auch die Stege können aus einem solchen dielektrischen
Material mit zumindest einigen der oben beschriebenen
Eigenschaften ausgeführt sein.

Eine Struktur aus zwei miteinander lateral gekoppelten Blöcken und der dazwischen angeordneten Verbindungsstruktur kann bei einer Schwingung der Blöcke zu einer oberflächenwellenartigen Schwingung, beispielsweise einer echten Oberflächenwelle oder einer Lambwelle, angeregt werden. Dabei können die Blöcke gegenläufig zueinander gekoppelt sein. Die Verbindungsstruktur kann zu einer zusätzlichen Erhöhung des Kopplungsfaktors beitragen.

10 Ferner kann ein Bereich der piezoelektrischen Schicht von einer Mantelschicht bedeckt sein, die ein anomales thermomechanisches Verhalten und/oder eine geringere Steifigkeit als die piezoelektrische Schicht aufweist.

15 Weist die piezoelektrische Schicht Blöcke auf, so kann zumindest einer der Blöcke kann von einer Mantelschicht ummantelt sein, die ein anormales thermomechanisches Verhalten aufweist. Die Mantelschicht kann dabei ein normales thermomechanisches Verhalten des Materials des Blockes kompensieren. Dementsprechend wird insgesamt die Temperaturempfindlichkeit des elektroakustischen Wandlers reduziert, d.h. die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und Antiresonanzfrequenz der Gesamtstruktur werden betragsmäßig möglichst gering gehalten.

25

Die Mantelschicht kann eine Verspannung der piezoelektrischen Schicht bewirken. Diese Verspannung beeinflusst das Temperaturverhalten des Wandlers und kann auf diese Weise eine Temperaturkompensation bewirken.

30

Die Mantelschicht kann darüber hinaus auch für andere Zwecke verwendet werden. Die Mantelschicht kann ein steifes bzw. hartes Material mit einem geringen oder negativen

Ausdehnungskoeffizienten aufweisen, so dass über auftretende Verspannungen ebenfalls der Temperaturgang des Wandlers beeinflusst werden kann. Der Ausdehnungskoeffizient der Mantelschicht kann insbesondere kleiner sein als der

5 Ausdehnungskoeffizient des piezoelektrischen Materials.

Des Weiteren kann die Mantelschicht ein dielektrisches Material aufweisen, das zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweist

10 und das das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflusst.

Die Mantelschicht kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt.

15 Beispielsweise kann die Mantelschicht für eine Passivierung sorgen.

Ist die piezoelektrische Schicht durch Löcher und/oder Schlitze strukturiert, so können die Seitenwände der Löcher und/oder Schlitze mit der Mantelschicht bedeckt sein. Auch in

20 diesem Fall kann die Mantelschicht ein normales thermomechanisches Verhalten der piezoelektrischen Schicht kompensieren und so die Temperaturempfindlichkeit des elektroakustischen Wandlers reduzieren.

25

Das anormale thermomechanische Verhalten der Mantelschicht kann beispielsweise darin bestehen, dass das Material der Mantelschicht sich bei einer Temperaturerhöhung versteift.

30 Die piezoelektrische Schicht kann Ausnehmungen aufweisen, die mit einem Material, das ein anormales thermomechanische Verhalten oder passivierende Eigenschaften aufweist, gefüllt sein. Es kann sich beispielsweise um ein dielektrisches

Material handeln. Das dielektrische Material kann dabei zumindest einige der oben für dielektrische Materialien diskutierten Eigenschaften aufweisen. Auf diese Weise kann das dielektrische Material das Frequenz- und/oder

5 Temperaturverhalten des Wandlers beeinflussen.

Bei dem Füllmaterial kann es sich beispielsweise um Al_2O_3 , Si_3N_4 oder SiO_2 handeln.

10 Bei den Ausnehmungen kann es sich um die Löcher und/oder die Schlitze handeln, mit denen die piezoelektrische Schicht strukturiert sein kann. Bei den Ausnehmungen kann es sich auch um Zwischenräume zwischen zwei Blöcken der piezo-

15

Das Material, mit dem die Ausnehmungen gefüllt sind, kann ein dielektrisches Material sein. Auf Grund des anormalen thermomechanischen Verhaltens des Materials wird eine Temperaturempfindlichkeit des elektroakustischen Wandlers

20 kompensiert.

Die piezoelektrische Schicht des elektroakustischen Wandlers kann auf einem akustischen Spiegel angeordnet sein. Der akustische Spiegel kann durch einen Stapelaufbau erzeugt werden, bei dem verschiedene Schichten des Stapels eine unterschiedliche akustische Impedanz aufweisen. Dementsprechend wird eine Welle, die aus der piezoelektrischen Schicht austritt von dem Spiegel zurückreflektiert.

25

30 Alternativ kann der Wandler auf einem Substrat, beispielsweise einem Siliziumsubstrat, einem Saphir, SiC , Spinell oder Diamant, oder freihängend angeordnet sein.

Die piezoelektrische Schicht kann eine Phononic Bandgap Struktur ausbilden. In einer Phononic Bandgap Struktur breiten sich in zwei oder drei Raumrichtungen in einem Stoppbandfrequenzbereich keine akustischen Laufwellen aus.

5

Die piezoelektrische Schicht kann eine erste Teilschicht aus einem piezoelektrischen Material und eine zweite Teilschicht aus einem piezoelektrischen Material aufweisen und der elektroakustische Wandler kann eine Zwischenschicht aufweisen, die zwischen der ersten Teilschicht und der zweiten Teilschicht angeordnet ist. Die Zwischenschicht kann ein zu dem piezoelektrischen Material entgegengesetztes thermomechanisches Verhalten aufweisen, insbesondere ein anormales thermomechanisches Verhalten. Auf diese Weise sorgt die Zwischenschicht dafür, dass die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und der Antiresonanzfrequenz des Wandlers möglichst gering gehalten werden.

Die Zwischenschicht kann auch zwischen der ersten Elektrode und der piezoelektrischen Schicht oder zwischen der piezoelektrischen Schicht und der zweiten Elektrode angeordnet werden.

Die Zwischenschicht kann aus einem der folgenden Materialien bestehen oder zumindest eines der folgenden Materialien aufweisen: SiO_2 , GeO_2 , TeO_2 , BeF_2 , B_2O_3 oder Zinkmetaphosphat.

Eine andere Methode, die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und Antiresonanzfrequenz des Wandlers betragsmäßig möglichst gering zu halten, wird im Folgenden beschrieben: Die Zwischenschicht kann eine Verspannung der piezoelektrischen Schicht bewirken. Diese Verspannung

beeinflusst das Temperaturverhalten des Wandlers und kann auf diese Weise eine Temperaturkompensation bewirken.

Die Zwischenschicht kann darüber hinaus auch für andere
5 Zwecke verwendet werden. Die Zwischenschicht kann ein steifes bzw. hartes Material mit einem geringen oder negativen Ausdehnungskoeffizienten aufweisen, so dass über auftretende Verspannungen ebenfalls der Temperaturgang des Wandlers beeinflusst werden kann. Der Ausdehnungskoeffizient der
10 Zwischenschicht kann insbesondere kleiner sein als der Ausdehnungskoeffizient des piezoelektrischen Materials.

Ferner kann durch die Zwischenschicht die Frequenzlage geändert werden oder es können eventuell auftretende
15 Störmoden beeinflusst werden.

Die piezoelektrische Schicht weist eine Kristallstruktur auf, die ausgewählt sein kann aus einer der Kristallklassen 1, 3, m, 3m, $\bar{6}$, 32, 2, mm2, 4, $\bar{4}$, 4mm, 222, 23, $\bar{4}3m$, 6 und 6mm.
20

Die Definition der Kristallstrukturen entspricht dabei der Definition aus Nye, J.F. "Physical Properties of Crystals". Dabei wird die Kristallstruktur durch ein Kristallkoordinatensystem mit den kristallografischen Achsen a, b, c
25 beschrieben. Ferner wird das elektrische Wechselfeld durch die Koordinatenachsen x, y, z beschrieben. Gemäß dieser Definition ist

- bei monoklinen Kristallklassen die kristallografische b-Achse parallel zur y-Koordinatenachse,
- 30 - bei tetragonalen, trigonalen und hexagonalen Kristallklassen die kristallografische c-Achse parallel zur z-Koordinatenachse und die kristallografische a-Achse parallel zur x-Koordinatenachse, und

- bei orthorombischen sowie kubischen Kristallklassen die kristallografische a-Achse parallel zur x-Koordinatenachse, die kristallografische b-Achse parallel zur y-Koordinatenachse und die kristallografische c-Achse parallel zur z-Koordinatenachse.

Die angeregte Schwingungsmoden der Schwingung mit Schwingungen in drei Raumrichtungen kann eine Longitudinalschwingung, eine Scherschwingung oder eine Kombination aus beiden umfassen.

Die piezoelektrische Schicht kann Kristallite aufweisen, deren Kristallachse überwiegend parallel ausgerichtet ist. Vorteilhaft ist die Schicht quasiepitaktisch oder epitaktisch. Es ist aber ausreichend, wenn bei einem Messverfahren zur Orientierungsbestimmung, beispielsweise durch Electron Backscatter Diffraction (EBSD) oder Röntgendiffraktion (X-ray diffraction, XRD), eine Vorzugsorientierung der piezoelektrischen Schicht zumindest bezüglich einer Kristallachse erkennbar ist. Die piezoelektrische Schicht sollte nicht amorph oder polykristallin beziehungsweise nanokristallin sein.

Für die Kristallklassen 6 und 6mm, zu der insbesondere AlN und ZnO gehören, ist nur eine Vorzugsorientierung der Kristallite bezüglich der kristallografischen c-Achse vonnöten, da um diese Achse transversale Isotropie vorliegt, d.h. diese Materialien sind bezüglich ihrer Eigenschaften invariant bei Rotation um diese Achse.

30

Im Folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und der dazugehörigen Figuren näher erläutert. Die Figuren zeigen anhand schematischer und nicht maßstabgetreuer

Darstellungen verschiedene Ausführungsbeispiele der Erfindung.

Es zeigen:

- 5
- Figur 1 einen elektroakustischen Wandler,
- Figur 2 eine Elektrode,
- 10 Figur 3 eine alternative Ausführungsform der Elektrode,
- Figur 4 eine weitere alternative Ausführungsform der Elektrode,
- 15 Figur 5 eine piezoelektrische Schicht mit Verbindungsstruktur in einer perspektivischen Ansicht,
- Figur 6 einen schematischen Querschnitt durch einen Teil
- 20 des Wandlers,
- Figur 7 eine alternative Ausführungsform des Wandlers im Querschnitt,
- 25 Figuren 8 bis 26 jeweils Querschnitte durch piezoelektrische Schichten des Wandlers gemäß verschiedenen Ausführungsbeispielen.

Figur 1 zeigt einen elektroakustischen Wandler 1. Es handelt

30 sich dabei um einen mit akustischen Volumenwellen arbeitenden Wandler. Der Wandler 1 weist eine erste Elektrode 2 und eine zweite Elektrode 3 auf. Zwischen der ersten Elektrode 2 und der zweiten Elektrode 3 ist eine piezoelektrische Schicht 4

angeordnet. Die piezoelektrische Schicht 4 weist eine Oberseite 5 und eine Unterseite 6 auf, wobei die Unterseite 6 der Oberseite 5 gegenüberliegen. Die Oberseite 5 liegt an der ersten Elektrode 2 an. Die Unterseite 6 liegt an der zweiten Elektrode 3 an. Ferner weist die piezoelektrische Schicht eine Seitenfläche 7 auf, die senkrecht zu der Oberseite 5 und zu der Unterseite 6 angeordnet ist. Die Seitenfläche 7 ist frei von den Elektroden 2, 3.

10 Wird zwischen der ersten und der zweiten Elektrode 2, 3 eine Wechselspannung angelegt, so wird dadurch in der piezoelektrischen Schicht 4 eine akustische Volumenwelle erzeugt.

15 Die piezoelektrische Schicht 4 weist mehrere Blöcke 8, die jeweils ein piezoelektrisches Material aufweisen, auf. Zwischen den Blöcken 8 befinden sich Ausnehmungen 9. In den Ausnehmungen 9 der piezoelektrischen Schicht 4 ist kein piezoelektrisches Material angeordnet. Dementsprechend sind
20 die Blöcke 8 voneinander isoliert.

Die piezoelektrische Schicht 4 ist derart strukturiert, dass bei einem in einer Raumrichtung angelegten elektrischen Wechselfeld eine Schwingungsmode mit Schwingungen in drei
25 Raumrichtungen angeregt wird. Insbesondere kann an die erste Elektrode 2 ein erstes elektrisches Potential und an die zweite Elektrode 3 ein zweites elektrisches Potential angelegt werden. Dementsprechend bildet sich ein elektrisches Wechselfeld aus, das von der ersten Elektrode 2 zur zweiten
30 Elektrode 3 hingerichtet ist.

Die Blöcke 8 der piezoelektrischen Schicht 4 sind derart strukturiert, dass sie durch das elektrische Wechselfeld, das

zwischen der ersten und der zweiten Elektrode 2, 3 anliegt, zu einer Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen angeregt werden. Es handelt sich dabei um eine dreidimensionale Schwingungsmode. Die Schwingungsmode weist
5 eine Schwingungskomponente in einer Richtung entlang des elektrischen Wechselfeldes und zwei Schwingungskomponenten in die zwei weiteren Raumrichtungen auf. Es können dabei sowohl longitudinal Wellen als auch Scherwellen angeregt werden.

10 Durch die Anregung der dreidimensionalen Schwingungsmode wird der Kopplungsfaktor des Wandlers 1 gegenüber einer eindimensionalen Schwingungsmode erhöht, da die dreidimensionale Schwingungsmode mehr Komponenten des Piezotensors nutzt als die eindimensionale Schwingungsmode.
15 Dieses ist möglich, wenn die Struktur des Piezotensors so beschaffen ist, dass beim Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes in einer Raumrichtung eine Anregung in alle drei Raumrichtungen erfolgt. Dieses ist beispielsweise für Piezomaterialien mit einer der folgenden Kristallstruktur der
20 Fall:

- bei den Kristallstrukturen 1 und 3, sofern das elektrische Wechselfeld in x-, y- oder z-Richtung angelegt ist.
- 25 - bei der Kristallstruktur m, sofern das elektrische Wechselfeld in x- oder z-Richtung angelegt ist.
- bei der Kristallstruktur 3m, sofern das elektrische Wechselfeld in y- oder z-Richtung angelegt ist.
- bei der Kristallstruktur $\bar{6}$, sofern das elektrische
30 Wechselfeld in x- oder y-Richtung angelegt ist.
- bei der Kristallstruktur 32, sofern das elektrische Wechselfeld in x-Richtung angelegt ist.

- bei der Kristallstruktur 2, sofern das elektrische Wechselfeld in y-Richtung angelegt ist.
- bei jeder der Kristallstrukturen $mm2$, 4, $\bar{4}$, $4mm$, 6 und $6mm$, sofern das elektrische Wechselfeld in z-Richtung angelegt ist.

Bei den Kristallstrukturen 3, $3m$, $mm2$, 4, $4mm$, 6 und $6mm$ ist es dabei möglich, Schwingungen ohne einen Anteil einer Scherschwingung anzuregen.

Ferner kann auch für Piezomaterialien mit anderen Kristallstrukturen eine Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen durch das Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes erreicht werden, falls das elektrische Wechselfeld nicht genau entlang einer Koordinatenachse angelegt wird. So ergibt z.B. das Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes entlang der Raumdiagonale bei den Kristallklassen 222 , 23 und $\bar{4}3m$ Scherschwingungen in allen drei Raumrichtungen. Diese Möglichkeit besteht auch für die oben genannten Piezomaterialien.

Eine Schwingungsmode mit Schwingungen in drei Raumrichtungen kann für eine piezoelektrische Schicht 4 angeregt werden, falls die piezoelektrische Schicht 4 einen orientierten Bereich aufweist. Der orientierte Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Kristallachse der Kristallite oder der Körner des piezoelektrischen Materials in diesem Bereich überwiegend parallel ausgerichtet ist. Parallel ist hierbei nicht in exakt mathematischem Sinne zu verstehen, sondern als „bis auf einige Grad Abweichung in die gleiche Richtung weisend“. Die piezoelektrische Schicht 4 ist dementsprechend nicht amorph oder poly- bzw. nanokristallin.

Stattdessen kann die piezoelektrische Schicht 4 quasi epitaktisch oder epitaktisch sein. Es ist für das Anregen einer dreidimensionalen Schwingungsmoden ausreichend, wenn in einem Verfahren zur Orientierungsbestimmung, beispielsweise durch Electron Backscatter Diffraction (EBSD) oder Röntgendiffraktion (X-ray diffraction, XRD), eine Vorzugsorientierung der piezoelektrischen Schicht 4 zumindest bezüglich einer Kristallachse erkennbar ist.

Die Ausdehnung des Blocks 8 in eine Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht am höchsten ist, wird mit T bezeichnet. Die Ausdehnungen des Blocks 8 in die zwei weiteren Raumrichtungen werden als L1 und L2 bezeichnet.

15

Die Ausdehnung T der Blöcke 8 in die Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht am höchsten ist, kann so gewählt werden, dass der Resonator in der Grundmode betrieben wird. Dazu kann die Dicke der

20

piezoelektrischen Schicht zwischen 30 und 70 % der akustischen Wellenlänge der Resonanzfrequenz des Wandlers 1. Vorzugsweise beträgt die Abmessung des Blocks 8 in dieser Richtung zwischen 40 und 60 % der akustischen Wellenlänge der Resonanzfrequenz des Wandlers. Des Weiteren ist auch ein

25

Betreiben des Resonators in einer Obermode denkbar.

Bei dem in Figur 1 gezeigten Ausführungsbeispiel ist die Schallgeschwindigkeit in der Richtung, die parallel zu den Flächennormalen der ersten und zweiten Elektrode 2, 3 ist, am höchsten. In dem in Figur 1 gezeigten Ausführungsbeispiel ist die Ausdehnung T der Blöcke 8 in die Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht am

30

höchsten ist, somit gleich dem Abstand der ersten Elektrode 2 zur zweiten Elektrode 3.

In anderen Ausführungsbeispielen kann die Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der piezoelektrischen Schicht 4 am höchsten ist, jeden anderen beliebigen Winkel zu den Flächennormalen der ersten und zweiten Elektrode 2, 3 einnehmen. In welche Richtung die Schallgeschwindigkeit einer anregbaren Mode am höchsten ist, ist abhängig von der Orientierung der piezoelektrischen Schicht 4 beziehungsweise der Körner oder der Kristallite der piezoelektrischen Schicht 4 bezüglich des angelegten elektrischen Wechselfeldes.

Die Ausdehnungen L_1 , L_2 des Blockes 8 in die verbleibenden Raumrichtungen sind maximal genauso groß wie die Ausdehnung T des Blockes 8 in die Richtung der höchsten Schallgeschwindigkeit.

Dementsprechend ergeben sich für die Blöcke 8 der piezoelektrischen Schicht 4 folgende Konstruktionsvorschriften, die die Aspektverhältnisse A_1 , A_2 der Blöcke angibt:

$$A_1 = T/L_1 \geq 1 \quad \text{und} \quad A_2 = T/L_2 \geq 1.$$

Die Aspektverhältnisse A_1 , A_2 geben die Verhältnisse der Ausdehnung T der Blöcke 8 entlang der Richtung der höchsten Schallgeschwindigkeit zu den Ausdehnungen L_1 , L_2 in die verbliebenen Richtungen an. Sind die Ausdehnungen L_1 und L_2 bei isotropen Strukturen jeweils gleich L , so kann die Konstruktionsvorschrift für die Blöcke 8 durch ein einziges Aspektverhältnis angegeben werden, das die folgende Konstruktionsvorschrift erfüllen muss:

$$A = T / L \geq 1.$$

Ausgehend von dieser Konstruktionsvorschrift ergeben sich für eine Frequenz im 1 GHz-Bereich Blöcke 8, deren Ausdehnung T, L1, L2 in alle Raumrichtungen sehr klein ist. Beispielsweise können die Blöcke 8 Abmessungen im Mikrometerbereich aufweisen. Aus diesem Grund werden viele dieser Blöcke 8 elektrisch parallel zueinander verschaltet. Dementsprechend weist die piezoelektrische Schicht 4 ein Array von Blöcken 8 auf. Es ist dabei nicht erforderlich, dass jeder der Blöcke 8 die oben genannte Konstruktionsvorschrift erfüllt. Ein wesentlicher Teil der Blöcke 8, beispielsweise zumindest 70% der Blöcke 8, erfüllt die oben genannte Konstruktionsvorschrift.

15

Figur 1 weisen die Oberseite 5 und die Unterseite 6 der Blöcke 8 jeweils eine quadratische Form auf. Grundsätzlich ist jede beliebige Form für die Oberseite 5 und die Unterseite 6 der Blöcke 8 möglich, beispielsweise Rechtecke, Parallelogramme, andere Vierecke, Ellipsen, Kreise, Sechsecke, Zwölfecke, weitere n-Ecke und regelmäßige Polygone. Ferner müssen die Oberseite 5 und die Unterseite 6 eines Blocks 8 nicht die gleiche Form haben.

Für piezoelektrische Schichten 4, deren Kristalle der Gruppe 6mm angehören, haben sich Quadrate, regelmäßige Sechs- und regelmäßige Zwölfecke als besonders vorteilhafte Formen der Oberseite 5 und der Unterseite 6 erwiesen. In diesem Fall können die Symmetrieeigenschaften des Piezotensors besonders gut ausgenutzt werden.

30

Durch die geeignete Wahl der Form der Oberseite 5 und der Unterseite 6 lässt sich die Lage und Anregbarkeit weiterer

störender Schwingungsmoden beeinflussen, während sich der Kopplungsfaktor der Grundmode nicht wesentlich ändert. Dementsprechend können durch eine geschickte Formgebung der Blöcke 8 eventuell störende Nebenmoden unterdrückt werden.

5

Der Block 8 muss keine exakten 90°-Kanten haben, sondern kann auch konvexe oder konkave Kanten aufweisen. Dementsprechend kann sich der Block 8 verdicken oder verjüngen. Entscheidend ist hier nicht die Kantenform, sondern das oben beschriebene Aspektverhältnis.

10

Bei dem in Figur 1 gezeigten Ausführungsbeispiel weisen die erste Elektrode 2 und die zweite Elektrode 3 jeweils eine durchgehend flächige Form auf.

15

Figur 2 zeigt eine alternative Ausgestaltung einer Elektrode 2, 3. Es kann sich hierbei um die erste oder die zweite Elektrode 2, 3 handeln.

20

Die in Figur 2 gezeigte Elektrode 2, 3 weist eine erste Elektrodenstruktur 10 und eine zweite Elektrodenstruktur 11 auf. Die erste Elektrodenstruktur 10 und die zweite Elektrodenstruktur 11 sind räumlich voneinander getrennt.

25

Die erste und die zweite Elektrodenstruktur 10, 11 sind jeweils kammförmig ausgestaltet. Die erste und die zweite Elektrodenstruktur 10, 11 weisen jeweils einen äußeren Streifen 12 auf, der sich in einer ersten Raumrichtung erstreckt. Die erste Raumrichtung ist dabei senkrecht zur

30

Flächennormale der jeweiligen Elektrodenstruktur 10, 11. Ferner weist die erste und die zweite Elektrodenstruktur 10, 11 fingerartige Streifen 13 auf, die sich jeweils von dem äußeren Streifen 12 ausgehend hin zur jeweils anderen

Elektrodenstruktur 10, 11 erstrecken. Die fingerartigen Streifen 13 sind dabei senkrecht zu dem jeweiligen äußeren Streifen 12. Die fingerartigen Streifen 13 sind nicht mit der gegenüberliegenden Elektrodenstruktur 10, 11 verbunden.

5

Die fingerartigen Streifen 13 der beiden Elektrodenstrukturen 10, 11 greifen ineinander. Die äußeren Streifen 12 und die fingerartigen Streifen 13 verbinden jeweils mehrere, in einer Reihe angeordnete Blöcke 8 miteinander. Die Blöcke 8 und die Elektrodenstrukturen 10, 11 sind dabei derart angeordnet, dass in einer Richtung benachbarte Blöcke 8 abwechselnd mit der ersten und der zweiten Elektrodenstruktur 10, 11 verbunden sind.

15 Dementsprechend ermöglicht es eine Ausgestaltung der Elektrode 2, 3 mit zwei Elektrodenstrukturen 10, 11, benachbarte Blöcke 8 mit unterschiedlichen Elektrodenstrukturen 10, 11 zu verbinden. Wird nunmehr an den beiden Elektrodenstrukturen 10, 11 ein unterschiedliches Potential angelegt, sind die benachbarten Blöcke 8 gegenläufig gekoppelt. Auf diese Weise können Nichtlinearitäten des Wandlers 1 unterdrückt werden.

Beispielsweise kann die erste Elektrode 2 des Wandlers 1 eine durchgehende flächige Form, wie in Figur 1 gezeigt, aufweisen, an die ein Referenzpotential angelegt wird. Das Referenzpotential kann beispielsweise ein Massepotential sein. Ferner kann die zweite Elektrode 3 eine Ausgestaltung gemäß Figur 2 aufweisen, wobei an der ersten und der zweiten Elektrodenstruktur 10, 11 unterschiedliche Potentiale angelegt sind.

Alternativ können sowohl die erste als auch die zweite Elektrode 2, 3 eine erste und eine zweite Elektrodenstruktur 10, 11 aufweisen. Auch in diesem Fall sind benachbarte Blöcke 8 gegenläufig zueinander koppelbar, so dass Nichtlinearitäten des Wandlers 1 ausgeglichen werden.

Die Figuren 3 und 4 zeigen weitere Ausführungsformen der Elektroden 2, 3. Die in Figur 3 und 4 gezeigten Elektroden weisen eine Lochgitterstruktur auf. Die Lochgitterstruktur weist geschlossene Bereiche 14 und Öffnungen 15 auf. Diese Ausführungsform einer Elektrode 2, 3 ist sowohl für die erste als auch für die zweite Elektrode 2, 3 möglich. Die in den Figuren 1 bis 4 gezeigten Ausführungsformen der Elektrode 2, 3 können beliebig als erste und zweite Elektrode 2, 3 miteinander kombiniert werden.

Figur 5 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel der piezoelektrischen Schicht 4. Die piezoelektrische Schicht 4 weist hier eine Verbindungsstruktur 17 auf. Die Verbindungsstruktur 17 ist zwischen zwei benachbarten Blöcken 8 angeordnet und verbindet die beiden Blöcke 8 in einer lateralen Richtung miteinander. Die laterale Richtung ist senkrecht zu den Flächennormalen der Oberseite 5 und der Unterseite 6 der Blöcke 8.

Die Anordnung aus den lateral gekoppelten Blöcken 8 und der Verbindungsstruktur 17 kann eine Oberflächenwelle oder eine Lambwelle erzeugen. Sind zwei unmittelbar benachbarte Blöcke 8 gegenläufig gekoppelt und durch die Verbindungsstruktur 17 miteinander lateral verbunden, so wird durch die in den Blöcken 8 angeregten akustischen Volumenwellen ferner die Anordnung aus den beiden Blöcken 8 und der Verbindungsstruktur 17 oberflächenwellenartig bewegt.

Die Verbindungsstruktur 17 weist ein dielektrisches Material auf oder besteht aus einem solchen.

Die in Figur 5 gezeigte Ausführungsform der piezoelektrischen Schicht 4 mit der Verbindungsstruktur 17 kann besonders vorteilhaft mit einer der in Figur 3 und 4 gezeigten Ausführungsformen der Elektrode 2, 3 mit der Lochgitterstruktur kombiniert werden. Dabei kann die Elektrode 2, 3 derart auf der piezoelektrischen Schicht 4 positioniert werden, dass die Öffnungen 15 der Lochgitterstruktur jeweils über den Ausnehmungen 9 der piezoelektrischen Schicht 4 liegen, in denen weder einer der Blöcke 8 noch die Verbindungsstruktur 17 angeordnet ist. Auf der Verbindungsstruktur 17 liegen dann jeweils geschlossene Bereiche 14 der Elektrode 2, 3 auf. In diesem Fall sorgt die Verbindungsstruktur 17 für eine hohe mechanische Stabilität der Elektrode 2, 3, da die Verbindungsstruktur 17 eine große Auflagefläche bereitstellt. Ferner vereinfacht die Verbindungsstruktur 17 das Herstellungsverfahren, da die Elektrode 2, 3 direkt auf der Verbindungsstruktur 17 aufgebracht werden kann.

Die Ausnehmungen 9 zwischen den Blöcken 8 können in jeder der oben diskutierten Ausführungsformen mit einem dielektrischen Material gefüllt sein. Dadurch können die Blöcke 8 ebenfalls lateral miteinander gekoppelt werden. Wie bereits im Zusammenhang mit der in Figur 5 gezeigten Verbindungsstruktur 17 diskutiert, führt eine laterale Kopplung der Blöcke 8 dazu, dass zwischen gegenläufig gekoppelten Blöcken 8 eine oberflächenwellenartige Welle angeregt wird.

Das dielektrische Material, das die Ausnehmungen 9 zwischen den Blöcken 8 ausfüllt, kann ein anormales thermomechanisches

Verhalten aufweisen. Beispielsweise kann sich auf Grund des anormalen thermomechanischen Verhaltens das dielektrische Material bei Erwärmung versteifen. Dementsprechend kompensiert das anormale thermomechanische Verhalten des dielektrischen Materials das typischerweise normale thermomechanische Verhalten der Blöcke 8. Das dielektrische Material, das in den Ausnehmungen 9 zwischen den Blöcken 8 angeordnet ist, ermöglicht es, die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und der Antiresonanzfrequenz des Wandlers 1 betragsmäßig möglichst gering zu halten.

Des Weiteren kann das dielektrische Material, das die Ausnehmungen 9 zwischen den Blöcken 8 ausfüllt, zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweisen und das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflussen.

Das dielektrische Material, das die Ausnehmungen 9 zwischen den Blöcken 8 ausfüllt, kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt. Beispielsweise kann es für eine Passivierung sorgen.

Alternativ oder ergänzend zum Auffüllen der Ausnehmungen 9 mit dem dielektrischen Material mit anormalen thermomechanischen Eigenschaften können die Blöcke 8 von einer Mantelschicht, die ein Material mit einem anormalen thermomechanischen Verhalten aufweist, ummantelt sein. Auch eine solche Mantelschicht ermöglicht es, das thermomechanische Verhalten der Blöcke 8 zu kompensieren und die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und der Antiresonanzfrequenz des Wandlers 1 betragsmäßig möglichst gering zu halten.

Des Weiteren kann die Mantelschicht ein dielektrisches Material aufweisen, das zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweist und das das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflusst.

Die Mantelschicht kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt. Beispielsweise kann die Mantelschicht für eine Passivierung sorgen.

Figur 6 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen Teil des Wandlers 1. In Figur 6 ist die erste und die zweite Elektrode 2, 3 gezeigt. Zwischen der ersten und der zweiten Elektrode 2, 3 ist die piezoelektrische Schicht 4 angeordnet. Die piezoelektrische Schicht 4 weist eine erste Teilschicht 18, die ein piezoelektrisches Material aufweist, und eine zweite Teilschicht 19 die ebenfalls ein piezoelektrisches Material aufweist, auf.

Ferner weist der Wandler 1 eine Zwischenschicht 20 auf. Die Zwischenschicht 20 ist zwischen der ersten und der zweiten Teilschicht 18, 19 der piezoelektrischen Schicht 4 angeordnet. Alternativ kann die Zwischenschicht 20 auch zwischen einer der Elektroden 2, 3 und der piezoelektrischen Schicht 4 angeordnet sein. Die Zwischenschicht 20 kann anormale thermische Eigenschaften aufweisen. Dadurch sorgt sie dafür, dass die thermischen Eigenschaften der piezoelektrischen Schicht 4 ausgeglichen werden und die Frequenzcharakteristik des Wandlers 1 über verschiedene Temperaturen möglichst stabil gehalten werden kann. Dementsprechend ermöglicht es die Zwischenschicht 20 die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und der Antiresonanz-

frequenz des Wandlers 1 betragsmäßig möglichst gering zu halten.

Weist die Zwischenschicht 20 ein anormales thermomechanisches Verhalten auf, so kann sie zur Temperaturkompensation verwendet werden. In diesem Fall kann die Zwischenschicht 20 aus einem der folgenden Materialien bestehen oder zumindest eines der folgenden Materialien aufweisen: SiO_2 , GeO_2 , TeO_2 , BeF_2 , B_2O_3 oder Zinkmetaphosphat.

10

Figur 7 zeigt eine alternative Ausführungsform des Wandlers 1 im Querschnitt. Hier weist der Wandler 1 zwei Temperaturkompensationsschichten 20 auf. Ferner weist die piezoelektrische Schicht 4 die erste Teilschicht 18, die zweite Teilschicht 19 und eine dritte Teilschicht 21 auf. Zwischen den beiden Elektroden 2, 3 sind abwechselnd Teilschichten 18, 19, 21 der piezoelektrischen Schicht 4 und Temperaturkompensationsschichten 20 angeordnet.

15

In den hier gezeigten Ausführungsbeispielen sind die Blöcke 8 stets regelmäßig angeordnet. Es ist jedoch auch möglich, die Blöcke 8 teilweise oder vollständig unregelmäßig anzuordnen. Die Anordnung der Blöcke 8 kann eine Modulation folgen oder vollkommen zufällig sein.

20

Ferner können Blöcke 8 unterschiedlicher Größe in einem Wandler 1 miteinander kombiniert werden. Ist die Dicke der Blöcke 8 in Richtung der Flächennormale der Oberseite 5 gleich und unterscheiden die Blöcke 8 sich in ihren Breiten, d.h. in ihren Ausdehnungen in die Raumrichtungen senkrecht zur Flächennormale der Oberseite 5, so wird dadurch eine Verschmierung der Störmoden des Wandlers 1 ermöglicht.

30

Der Wandler 1 kann auf einem Stapel von Schichten angeordnet sein, wobei die Schichten sich in ihrer akustischen Impedanz unterscheiden. Insbesondere können die Schichten einen SMR-type Spiegel (SMR = Solidly Mounted Resonator) bilden. Die Schichten unterschiedlicher akustischer Impedanz reflektieren aus der piezoelektrischen Schicht 4 heraustretende Wellen in diese zurück.

Alternativ kann der Wandler 1 auf einem Substratmaterial, beispielsweise Silizium, Saphir, SiC oder Spinell, angeordnet sein. Ferner kann der Wandler 1 auch frei hängend angeordnet sein.

In jedem der hier beschriebenen Ausführungsbeispiele können die Blöcke 8 eine Phononic Bandgap Struktur ausbilden. Dementsprechend breiten sich in zwei oder drei Raumrichtungen in einem Stopppband Frequenzbereich keine akustischen Laufwellen aus.

Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel kann die piezoelektrische Schicht 4 auch durch Löcher 22 und Schlitz 23 strukturiert werden. Beispiele für piezoelektrische Schichten 4, die durch Löcher 22 und/oder Schlitz 23 strukturiert sind, finden sich in den Figuren 8 bis 26. In diesen Figuren ist jeweils ein Querschnitt durch die piezoelektrische Schicht 4 des Wandlers 1 gezeigt, wobei die Schnittebene parallel zur Oberseite 5 der piezoelektrischen Schicht 4 ist.

Figur 8 zeigt einen Querschnitt durch eine piezoelektrische Schicht 4, die mit zufällig angeordneten Löchern 22 und Schlitz 23 strukturiert ist.

Die Seitenwände einiger der Löcher 22 sind ferner mit einer Mantelschicht 16 bedeckt sein, die ein anomales thermomechanisches Verhalten aufweist. Diese Mantelschicht 16 kompensiert das normale thermomechanische Verhalten der piezoelektrischen Schicht 4. Auch die Seitenwände der Schlitze 23 könnten mit der Mantelschicht 16 bedeckt werden.

Des Weiteren kann die Mantelschicht ein dielektrisches Material aufweisen, das zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweist und das das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflusst.

Die Mantelschicht kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt. Beispielsweise kann die Mantelschicht für eine Passivierung sorgen.

Ferner sind einige der Löcher 22 und einige der Schlitze 23 mit einem dielektrischen Material 24, das ein anomales thermomechanisches Verhalten aufweist, gefüllt. Es kann hierzu jedes Material, das ein anomales thermomechanisches Verhalten aufweist, verwendet werden.

Des Weiteren kann das Füllmaterial ein dielektrisches Material aufweisen, das zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweist und das das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflusst.

30

Das Füllmaterial kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt.

Beispielsweise kann das Füllmaterial für eine Passivierung sorgen.

5 In dem Ausführungsbeispiel der Figur 1 kann das dielektrische Material 24 ferner die Ausnehmungen 9 zwischen den Blöcken 8 ausfüllen. Alternativ können die Blöcke 8 mit der Mantelschicht 16 bedeckt sein.

Die in den Figuren 9 und 10 gezeigten piezoelektrischen Schichten 4 ergeben sich durch ein Ineinanderschieben der Blöcke 8 aus Figur 1. Dementsprechend weist die piezoelektrische Schicht 4 hier nicht mehr voneinander isolierte Blöcke 8 auf, sondern es ergibt sich eine zusammenhängende Struktur. Überraschend zeigt sich, dass die zusammenhängende Struktur gegenüber einer durchgängigen piezoelektrischen Schicht ebenfalls einen erhöhten Kopplungsfaktor aufweist. Wie im Zusammenhang mit den in Figur 1 gezeigten Blöcken 8 diskutiert, wird auch in der zusammenhängenden Struktur eine Schwingungsmoden mit Schwingungen in drei Raurichtungen angeregt.

Dieses überraschende und unerwartete Ergebnis findet seine Erklärung bei Betrachtung der Piezostruktur, die die einzelnen Blöcke 8 aufweisen. Die in den Figuren 8 und 9 gezeigte piezoelektrische Schicht 4 kann als Struktur aus überlappenden oder verknüpften Blöcken 108 aufgefasst werden. Die Verknüpfung beziehungsweise Überlappung der Blöcke 108 führt dazu, dass sich die dreidimensionalen Schwingungsmoden in den verknüpften beziehungsweise überlappten Blöcken 108 nicht mehr perfekt, d.h. komplett, ausbilden können, aber immer noch Teile der verknüpften Blöcke 108 zu dieser dreidimensionalen Schwingungsmoden beitragen. Der Effekt der Erhöhung der elektromechanischen Kopplung ist somit in diesem

Fall geringer als bei dem in Figur 1 gezeigten Ausführungsbeispiel, aber immer noch signifikant.

Die Löcher 22 und Schlitze 23 werden derart positioniert und ihre Größe wird derart gewählt, dass die piezoelektrische Schicht 4 in großen Teilen die oben genannten Konstruktionsvorschrift für ein Aspektverhältnis $A \geq 1$ erfüllt. Dementsprechend ist weiterhin das Anregen einer dreidimensionalen Schwingungsmode möglich.

Die oben diskutierten Ausführungsformen der Blöcke 8 sind auch für die zusammenhängende Struktur mit verknüpften bzw. überlappenden Blöcken 108, wie in Figuren 9 und 10 gezeigt, möglich. Ferner sind diese Ausführungsformen auch für eine piezoelektrische Schicht 4 möglich, die mit Löchern 22 und Schlitzen 23 strukturiert ist.

Beispielsweise kann eine derart ausgestaltete piezoelektrische Schicht 4 mit einer Elektrode 2, 3 die eine erste und eine zweite Elektrodenstruktur 10, 11 aufweist, wie in Figur 2 gezeigt, kombiniert werden. Dementsprechend können verschiedene Bereiche der piezoelektrischen Schicht 4 gegenläufig zueinander gekoppelt werden.

Die hier gezeigte piezoelektrische Schicht 4 kann auf einem Schichtstapel mit variierender akustischer Impedanz, auf einem Substrat, beispielsweise Silizium oder freihängend angeordnet werden. Ferner können in die piezoelektrische Schicht 4 eine oder mehrere Temperaturkompensationsschichten eingefügt werden, wie in den Figuren 6 und 7 gezeigt.

Die Anordnung der Löcher 22 in der piezoelektrischen Schicht 4 muss nicht regelmäßig sein. Auch eine Anordnung die einer

Modulationsregel folgt oder die rein zufällig vorgenommen wird, ist möglich. Die Löcher 22 können auch derart angeordnet werden, dass sich Bereiche mit unterschiedlicher lateraler Ausdehnung in der piezoelektrischen Schicht 4
5 ergeben. Dementsprechend können Störmoden der piezoelektrischen Schicht 4 verschmiert werden. Die Kanten der piezoelektrischen Schicht 4 sind in den Figuren 8 und 9 jeweils geradlinig ausgestaltet. Diese Kantenform ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Vielmehr sind auch konvexe oder
10 konkave Kanten möglich. Darüber hinaus ist auch jede andere Kantenform möglich.

Die Ausnehmungen 9 zwischen den verknüpften beziehungsweise überlappenden Blöcken 108 können ganz oder teilweise mit
15 einem oder mehreren Materialien gefüllt werden. Diese Materialien können unstrukturiert, beispielsweise als komplette Füllung oder als Seitenwandbedeckung, aufgetragen werden oder selbst eine Struktur, beispielsweise kleinere Löcher, aufweisen. Zumindest eines dieser Materialien kann
20 ein anormales thermomechanisches Verhalten aufweisen und auf diese Weise zu einer Kompensation des normalen thermomechanischen Verhaltens der piezoelektrischen Schicht 4 beitragen. Auf diese Weise können die Temperaturkoeffizienten der Resonanz- und der Antiresonanzfrequenz des Wandlers
25 betragsmäßig gering gehalten werden.

Des Weiteren kann das Füllmaterial ein dielektrisches Material aufweisen, das zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweist
30 und das das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflusst.

Das Füllmaterial kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt. Beispielsweise kann das Füllmaterial für eine Passivierung sorgen.

5

Auch eine piezoelektrische Schicht 4 mit verknüpften beziehungsweise überlappenden Blöcken 108 kann eine Phononic Bandgap Struktur ausbilden.

10 Die Figuren 10 bis 26 zeigen weitere Ausführungsformen der piezoelektrischen Schicht 4. Die piezoelektrische Schicht 4 entfernt sich in den Figuren 10 bis 26 immer mehr von
ineinander geschobenen Blöcken 108 hin zu einer piezo-
elektrischen Schicht 4, die durch Löcher 22 und Schlitze 23
15 strukturiert ist. Überraschenderweise zeigt sich, dass auch für eine solche piezoelektrische Schicht 4 eine Erhöhung des Kopplungsfaktors gegenüber einer durchgängigen piezo-
elektrischen Schicht auftritt. Werden also in einer
durchgehend piezoelektrischen Schicht Löcher 22 und/oder
20 Schlitze 23 erzeugt, so wird dadurch der Kopplungsfaktor der Schicht erhöht.

Es müssen also keine Blöcke 8 wie im Zusammenhang mit Figur 1
gezeigt erkennbar sein, sondern lediglich Löcher 22 und/oder
25 Schlitze 23 in der piezoelektrischen Schicht 4 vorhanden sein.

Die Erklärung hierfür ist, dass Bereiche der piezoelektri-
schen Schicht 4 immer noch die Konstruktionsvorschrift für
30 das Aspektverhältnis erfüllen. Die Löcher 22 und Schlitze 23 geben dem Material die Möglichkeit, sich ausreichend in
lateralen Richtung auszudehnen, um die Anregung von

Schwingungsmoden mit Schwingungen in drei Raumrichtungen zu ermöglichen.

Eine an diese Ausführungsbeispiele angepasste Definition des
5 Aspektverhältnisses A wird im Folgenden diskutiert. Als
laterale Ausdehnung L wird dabei die kürzeste Verbindungs-
linie zweier benachbarter Löcher 22 betrachtet. T gibt
weiterhin die Ausdehnung der piezoelektrischen Schicht 4 in
Richtung der höchsten Schallgeschwindigkeit an. Dabei kann es
10 sich beispielsweise um die Ausdehnung der piezoelektrischen
Schicht 4 in Richtung der Flächennormale der Oberseite 5
handeln. Es ergibt sich wiederum die Konstruktionsvorschrift
 $A = T/L \geq 1$. Die piezoelektrische Schicht 4 muss diese
Konstruktionsvorschrift zumindest in einigen Bereichen
15 erfüllen, um das Anregen einer Schwingungsmoden mit
Schwingungen in drei Raumrichtungen zu ermöglichen, die zu
einer Erhöhung des Kopplungsfaktors führt.

Die Ausführungsform der piezoelektrischen Schicht 4 mit
20 Löchern 22 und/oder Schlitz 23 ist besonders vorteilhaft,
da sie technologisch am einfachsten zu realisieren ist.
Insbesondere kann zunächst eine durchgehende piezoelektrische
Schicht 4 geformt werden, die anschließend durch Erzeugen der
Löcher 22 und/oder Schlitz 23 strukturiert wird.

25

Die Form der Löcher 22 kann kreisförmig, elliptisch, beliebig
polygonal und unregelmäßig sein. Die genaue Form der Löcher
22 ist für den beschriebenen Effekt irrelevant. Entscheidend
ist vielmehr, dass die oben genannte Konstruktionsvorschrift
30 für das Aspektverhältnis in wesentlichen Teilen der piezo-
elektrischen Schicht 4, beispielsweise in zumindest 70 % der
piezoelektrischen Schicht 4, erfüllt ist. Ferner müssen die
Löcher 22 in Richtung der Flächennormale der Unterseite 6

nicht den gleichen Querschnitt aufweisen. Die Löcher 22 können sich vielmehr verjüngen oder verbreitern.

Die bereits beschriebenen Ausführungsbeispiele der piezo-
5 elektrischen Schicht 4 können auch für eine piezoelektrische Schicht 4, die mit Löchern 22 und/oder Schlitten 23 strukturiert ist angewendet werden. Im Einzelnen können die Löcher 22 und/oder Schlitten 23 derart angeordnet werden, dass die piezoelektrische Schicht 4 eine Phononic Bandgap Struktur
10 ausbildet.

Die Löcher 22 und/oder Schlitten 23 können, wie oben beschrieben, mit einem oder mehreren Materialien gefüllt sein. Insbesondere kann es sich bei dem Material um ein Material
15 mit anormalem thermomechanischen Verhalten handeln, das die thermomechanischen Eigenschaften der piezoelektrischen Schicht 4 ausgleicht. Die Löcher 22 und/oder Schlitten 23 können jedoch auch ungefüllt bleiben, sodass sich in den Löchern 22 und/oder Schlitten 23 ein Vakuum oder Luft
20 befindet.

Des Weiteren kann das Füllmaterial ein dielektrisches Material aufweisen, das zumindest einige der oben für dielektrische Materialien genannten Eigenschaften aufweist
25 und das das Frequenz- und/oder Temperaturverhalten des Wandlers in gewünschter Weise beeinflusst.

Das Füllmaterial kann aber auch Eigenschaften aufweisen, die die piezoelektrische Schicht gegen Umwelteinflüsse schützt.
30 Beispielsweise kann das Füllmaterial für eine Passivierung sorgen.

Die Anordnung der Löcher 22 und/oder Schlitze 23 muss nicht regelmäßig sein. Sie kann regelmäßig, teilweise regelmäßig oder unregelmäßig sein. Eine unregelmäßige Anordnung reicht von einer Modulation auf eine regelmäßige Anordnung bis zu
5 einer vollkommen zufälligen Anordnung.

Ferner können Löcher 22 unterschiedlicher Größe miteinander kombiniert werden. Insbesondere kann bei gleichbleibender Schichtdicke die laterale Abmessung der Löcher 22 variiert
10 werden. Dadurch werden die Eigenschaften des Wandlers 1 verbessert, da es zu einer Verschmierung von Störmoden kommt.

Unterschiedliche Lochformen können miteinander kombiniert werden.

15

Ferner können wie in den Figuren 7 und 8 gezeigt eine oder mehrere Temperaturkompensationsschichten 20 in die piezoelektrische Schicht 4 eingefügt werden. Die Temperaturkompensationsschichten 20 können auch zwischen der
20 piezoelektrischen Schicht 4 und einer oder beiden Elektroden 2, 3 angeordnet werden.

Bezugszeichenliste

	1	Wandler
	2	erste Elektrode
5	3	zweite Elektrode
	4	piezoelektrische Schicht
	5	Oberseite
	6	Unterseite
	7	Seitenfläche
10	8	Block
	9	Ausnehmung
	10	erste Elektrodenstruktur
	11	zweite Elektrodenstruktur
	12	äußerer Streifen
15	13	fingerartiger Streifen
	14	geschlossener Bereich
	15	Öffnung
	16	Mantelschicht
	17	Verbindungsstruktur
20	18	erste Teilschicht
	19	zweite Teilschicht
	20	Zwischenschicht
	21	dritte Teilschicht
	22	Loch
25	23	Schlitz
	24	dielektrisches Material
	108	überlappende oder verknüpfte Blöcke
	T	Ausdehnung in die Richtung der höchsten Schallgeschwindigkeit
30	L1, L2, L	Ausdehnung in eine andere Raumrichtung

Patentansprüche

1. Elektroakustischer Wandler (1),
mit einer piezoelektrischen Schicht (4), die derart
5 strukturiert ist, dass bei einem in einer Raumrichtung
angelegten elektrischen Wechselfeld eine Schwingungsmod
e mit Schwingungen in drei Raumrichtungen angeregt wird.
2. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß Anspruch 1,
10 wobei die piezoelektrische Schicht (4) eine flächige
Schicht aufweist, die mit Löchern (22) und/oder
Schlitzen (23) strukturiert ist.
3. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der
15 vorherigen Ansprüche,
wobei der Wandler (1) einen Bereich aufweist, in dem die
Ausdehnung (T) der piezoelektrischen Schicht (4) in der
Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der
piezoelektrischen Schicht (4) am höchsten ist,
20 mindestens genauso groß ist wie die Ausdehnung (L1, L2,
L) der piezoelektrischen Schicht (4) in die übrigen
Raumrichtungen.
4. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß Anspruch 3,
25 wobei die Ausdehnung (T) der piezoelektrischen Schicht
(4) in der Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in
der piezoelektrischen Schicht am höchsten ist, so
gewählt ist, dass der Resonator in der Grundmode
betrieben wird.
- 30 5. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der
vorherigen Ansprüche,

der eine erste und eine zweite Elektrode (2, 3)
aufweist,
wobei eine Oberseite (5) der piezoelektrischen Schicht
(4) mit der ersten Elektrode (2) und eine Unterseite (6)
5 der piezoelektrischen Schicht (4) mit der zweiten
Elektrode (3) verbunden ist.

6. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der
vorherigen Ansprüche,
10 wobei die piezoelektrische Schicht (4) mehrere Blöcke
(8), die ein piezoelektrisches Material aufweisen,
aufweist, und
wobei die Ausdehnung (T) jedes Blocks (8) in der
Richtung, in der die Schallgeschwindigkeit in der
15 piezoelektrischen Schicht (4) am höchsten ist,
mindestens so groß ist wie die Ausdehnungen (L1, L2, L)
des jeweiligen Blocks (8) in die übrigen Raumrichtungen.

7. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß Anspruch 5 und 6,
20 wobei zumindest eine der Elektroden (2, 3) eine erste
und eine zweite Elektrodenstruktur (10, 11) aufweist,
wobei jeder der Blöcke (8) entweder mit der ersten oder
mit der zweiten Elektrodenstruktur (10, 11) verbunden
ist.

25 8. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß Anspruch 7,
wobei die Blöcke (8) und die Elektrodenstrukturen (10,
11) derart angeordnet sind, dass zwei benachbarte Blöcke
(8) mit unterschiedlichen Elektrodenstrukturen (10, 11)
30 verbunden sind.

9. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der Ansprüche
6 bis 8,

wobei zwischen zwei Blöcken (8) eine Verbindungsstruktur (17) angeordnet ist, die die beiden Blöcke (8) in einer lateralen Richtung miteinander verbindet.

- 5 10. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß Anspruch 9,
wobei die Verbindungsstruktur (17) ein dielektrisches
Material aufweist.
- 10 11. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der
vorherigen Ansprüche,
wobei ein Bereich der piezoelektrischen Schicht (4) von
einer Mantelschicht (16) bedeckt ist, die ein anomales
thermomechanisches Verhalten und/oder passivierende
Eigenschaften aufweist.
- 15 12. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der
vorherigen Ansprüche,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) Ausnehmungen (9)
aufweist, die mit einem Material (24) gefüllt sind, das
20 ein anomales thermomechanische Verhalten und/oder eine
geringere Steifigkeit als die piezoelektrischen Schicht
(4) aufweist.
- 25 13. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der
vorherigen Ansprüche,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) auf einem
akustischen Spiegel angeordnet ist.
- 30 14. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der Ansprüche
1 bis 12,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) freischwingend
angeordnet ist.

15. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) eine Phononic Bandgap Struktur ausbildet.

5

16. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) eine erste Teilschicht (18) aus einem piezoelektrischen Material
und eine zweite Teilschicht (19) aus einem
piezoelektrischen Material aufweist, und
wobei der elektroakustische Wandler (1) eine
Zwischenschicht (20) aufweist, die zwischen der ersten
Teilschicht (18) und der zweiten Teilschicht (19)
angeordnet ist.

10

15

17. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) eine
Kristallstruktur ausgewählt aus einer der
Kristallklassen 1, 3, m, 3m, $\bar{6}$, 32, 2, mm2, 4, $\bar{4}$, 4mm, 222, 23, $\bar{4}3m$, 6 und 6mm aufweist.

20

18. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die angeregte Schwingungsmode eine Longitudinalschwingung, eine Scherschwingung oder eine Kombination aus beiden umfasst.

25

19. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,

30

wobei die piezoelektrische Schicht (4) Kristallite aufweist, deren Kristallachse überwiegend parallel ausgerichtet ist.

- 5 20. Elektroakustischer Wandler (1) gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die piezoelektrische Schicht (4) quasi epitaktisch oder epitaktisch ist.

1/10

Fig. 1

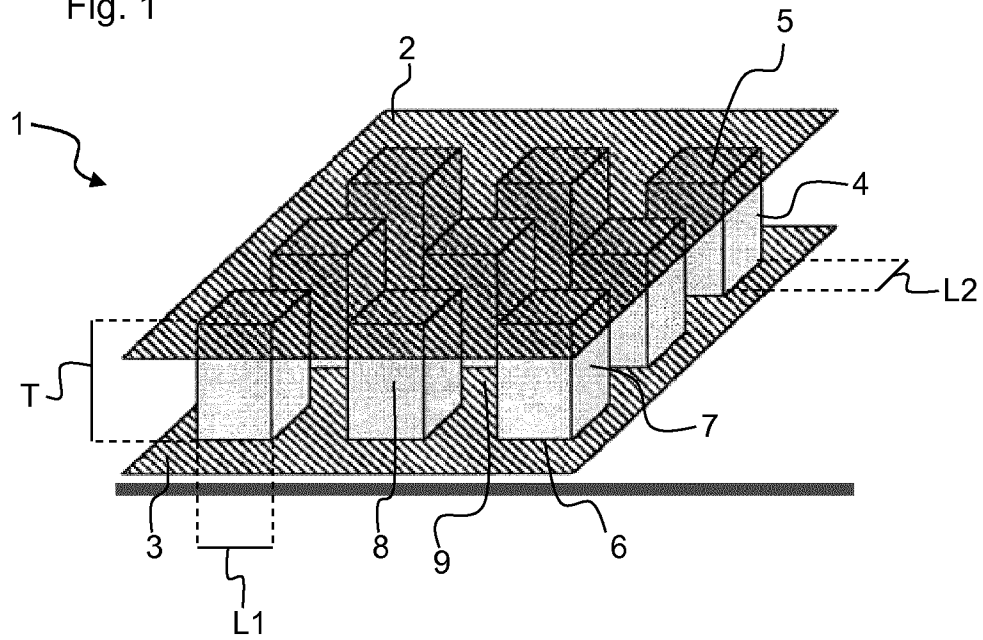
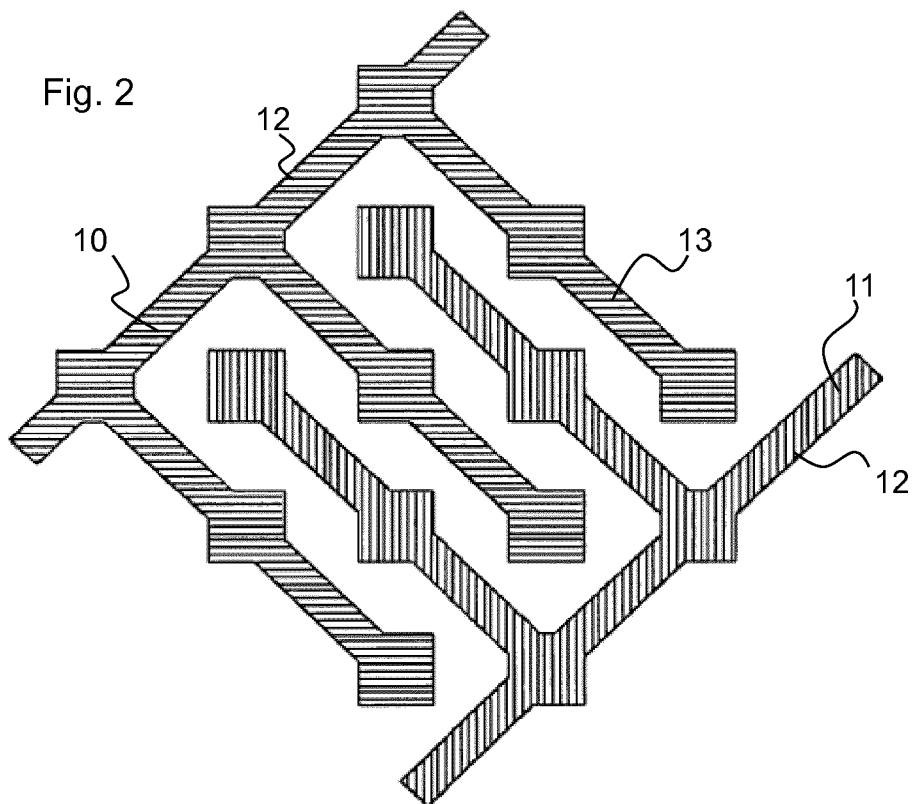


Fig. 2



2/10

Fig. 3

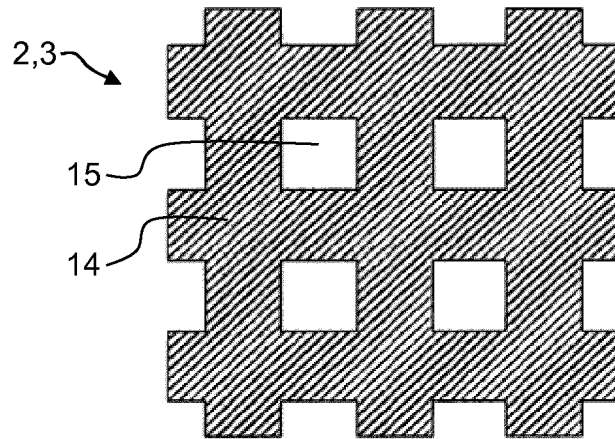
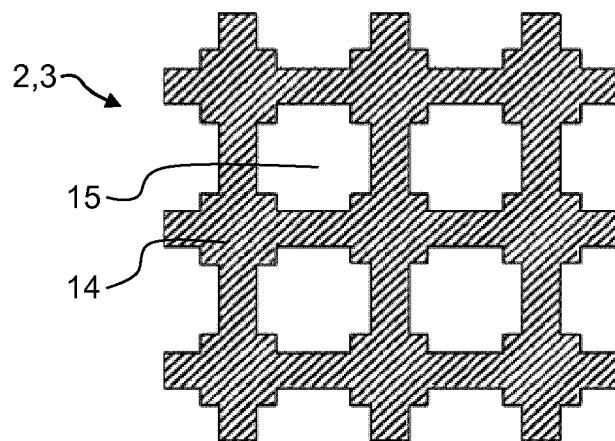


Fig. 4



3/10

Fig. 5

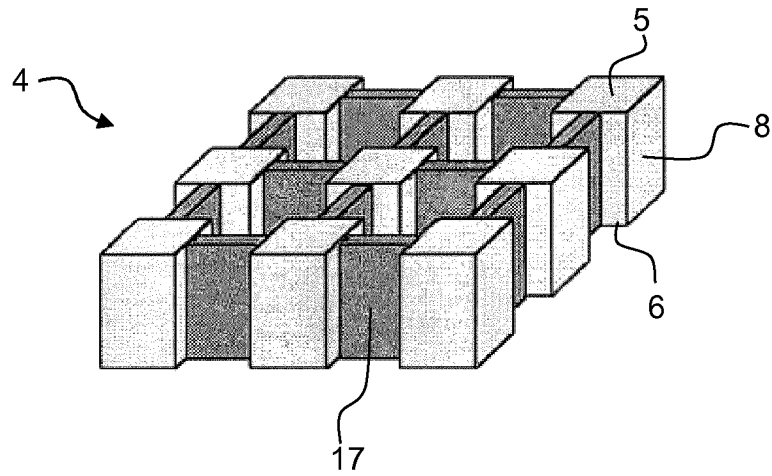


Fig. 6

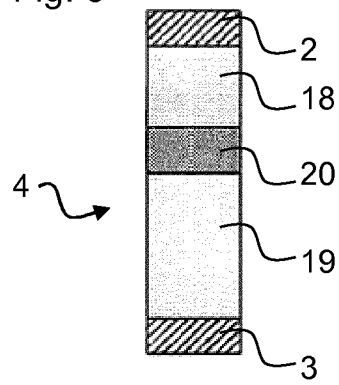
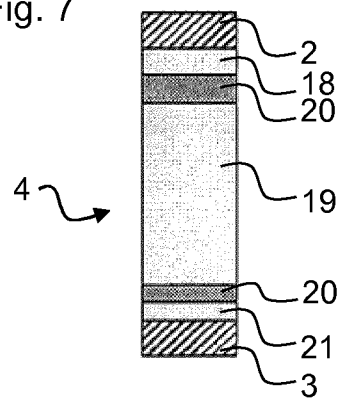


Fig. 7



4/10

Fig. 8

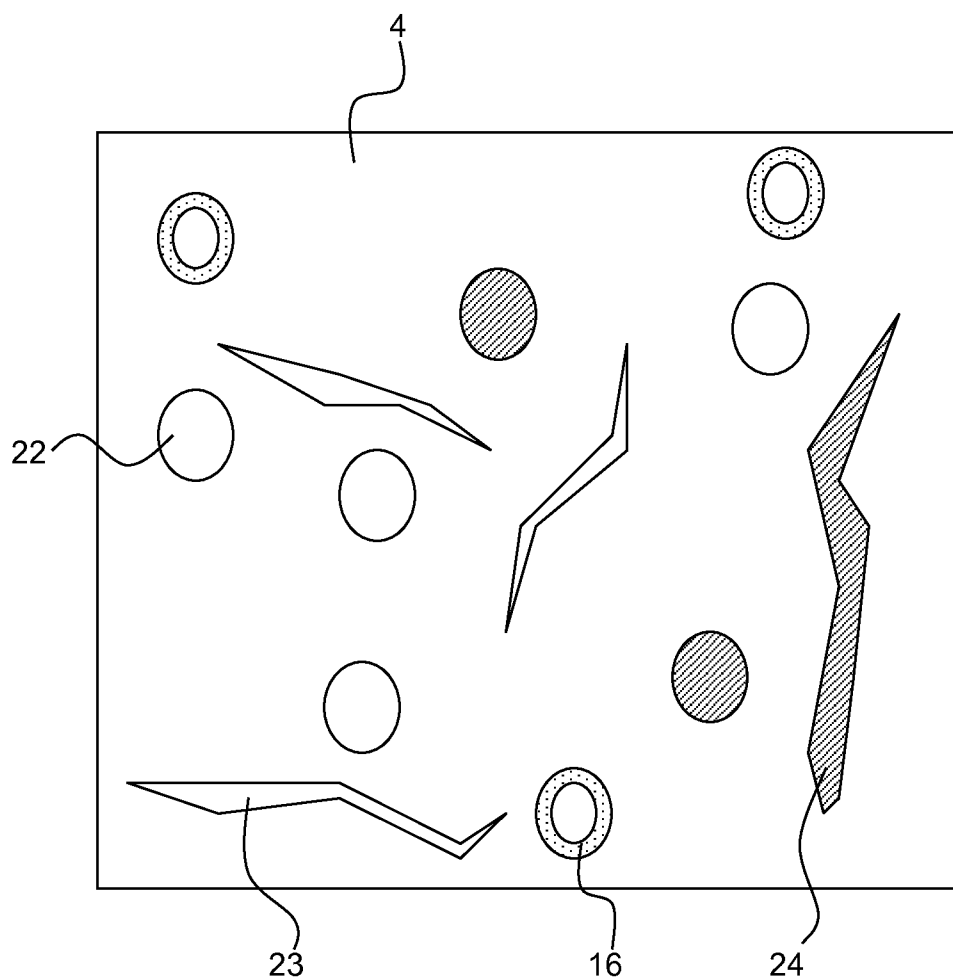


Fig. 9

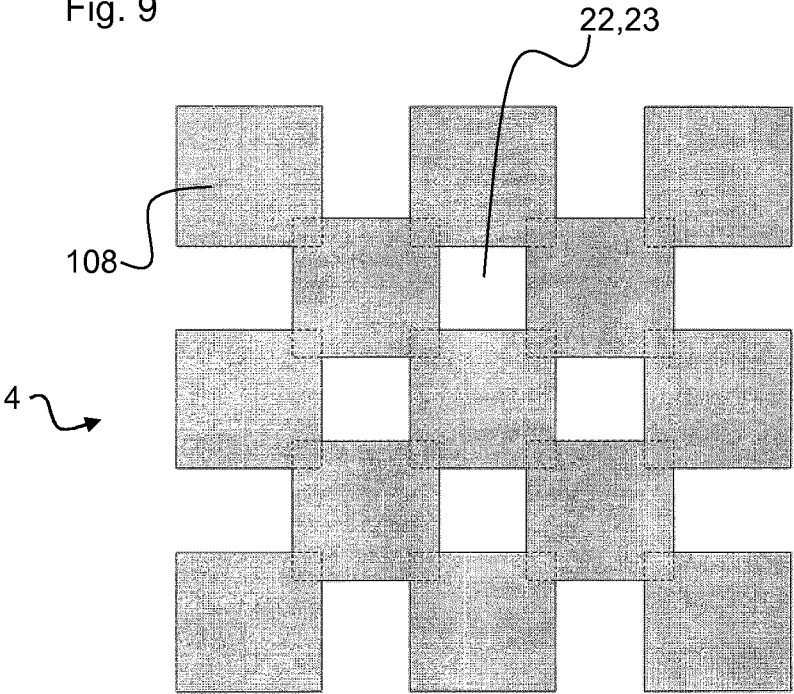


Fig. 10

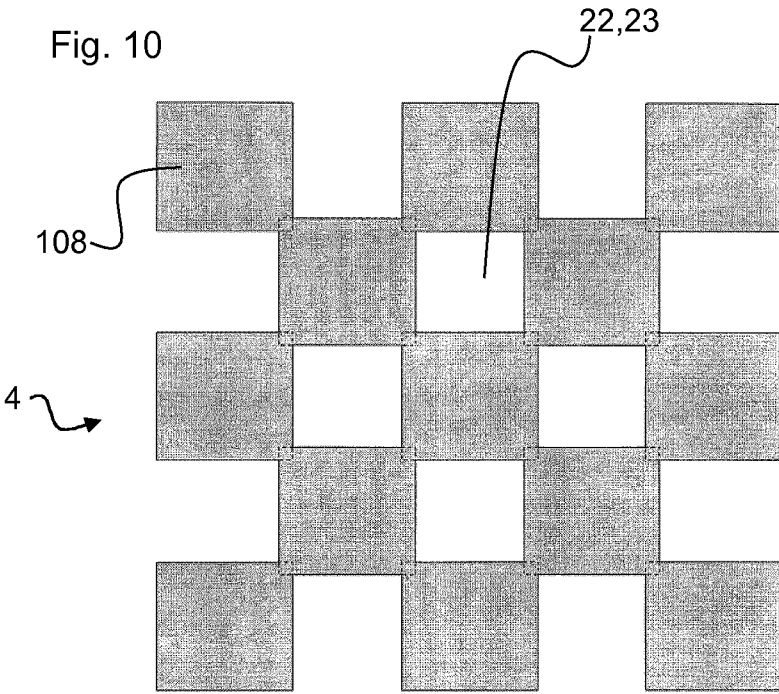


Fig. 11

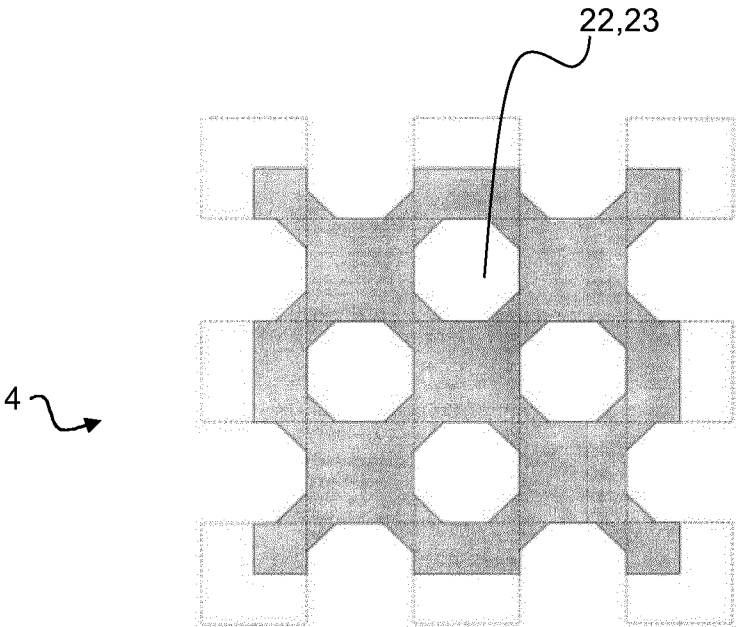


Fig. 12

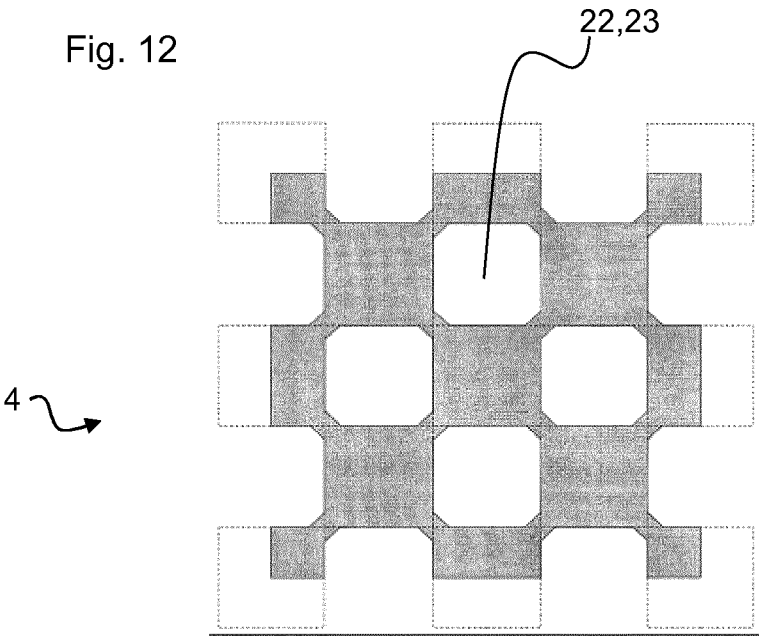


Fig. 13

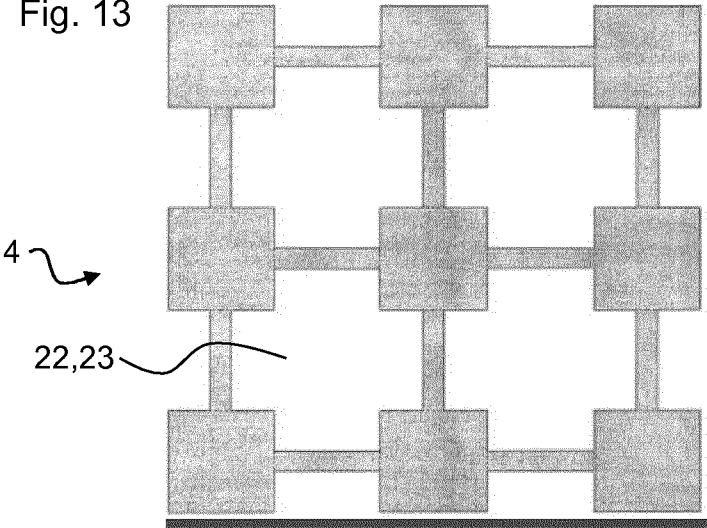


Fig. 14

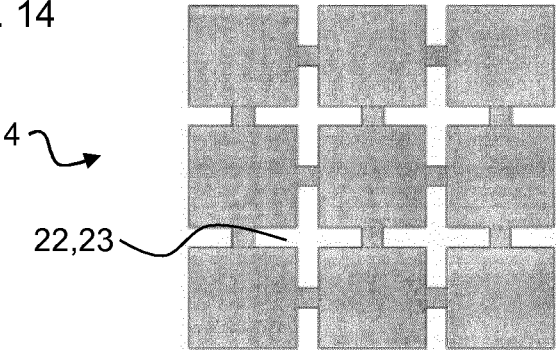


Fig. 15

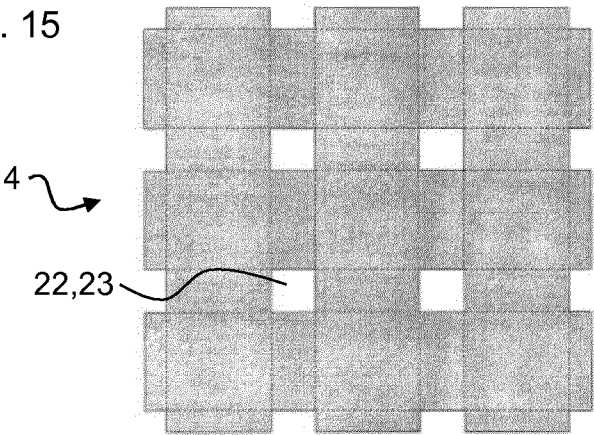


Fig. 16

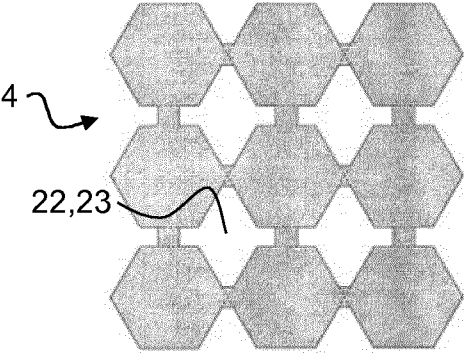


Fig. 17

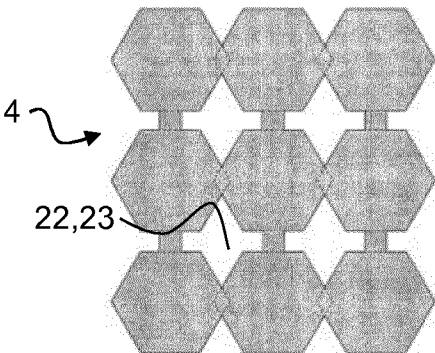


Fig. 18

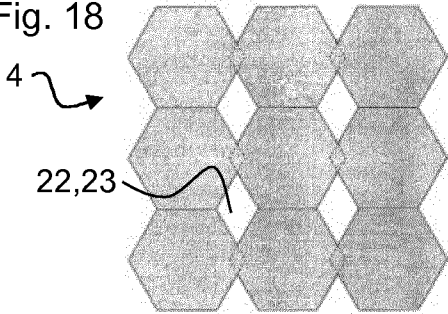
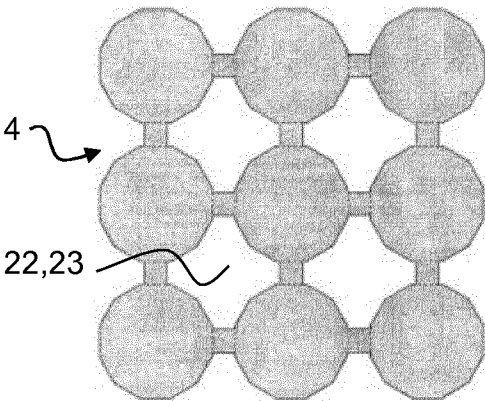


Fig. 19



9/10

Fig. 20

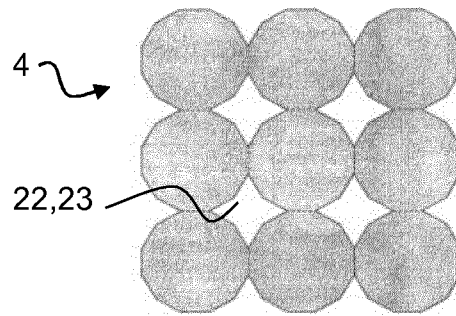


Fig. 21

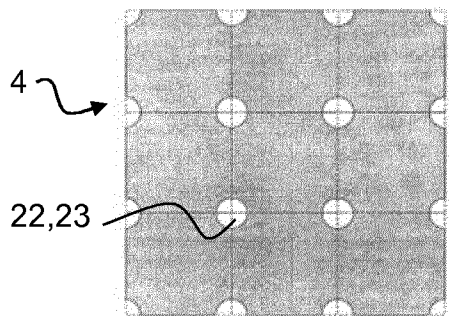


Fig. 22

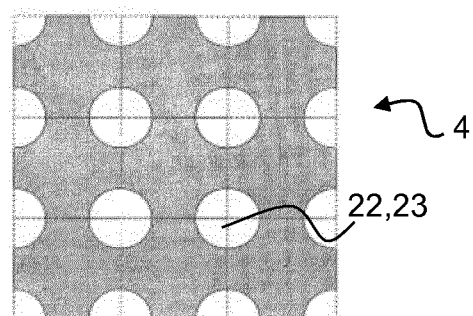


Fig. 23

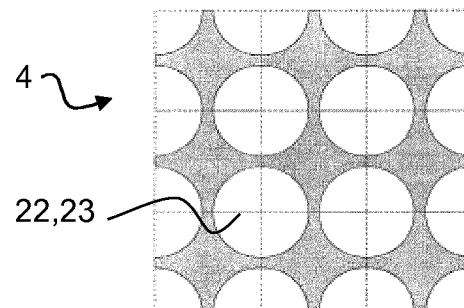


Fig. 24

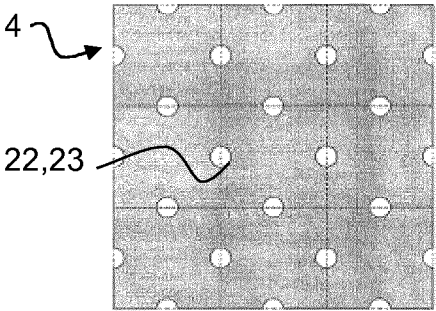


Fig. 25

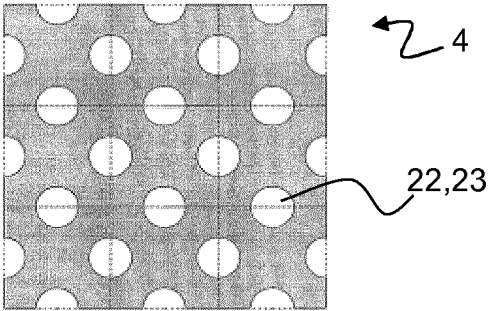


Fig. 26

