



(10) **DE 10 2018 132 890 B4** 2020.08.06

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 132 890.7**
(22) Anmeldetag: **19.12.2018**
(43) Offenlegungstag: **25.06.2020**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **06.08.2020**

(51) Int Cl.: **H03H 9/15 (2006.01)**
H03H 3/007 (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:
RF360 Europe GmbH, 81671 München, DE

(74) Vertreter:
**BARDEHLE PAGENBERG Partnerschaft mbB
Patentanwälte, Rechtsanwälte, 81675 München,
DE**

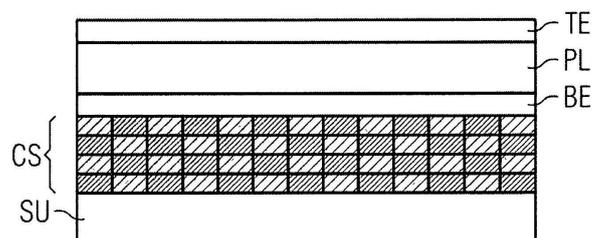
(72) Erfinder:
**Aigner, Willi, Dr., 85452 Moosinning, DE;
Schmidhammer, Edgar, Dr., 83371 Stein, DE;
Schiek, Maximilian, 82178 Puchheim, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2017 105 432	B3
US	2013 / 0 214 879	A1

(54) Bezeichnung: **Mikroakustische Vorrichtung und Herstellungsverfahren**

(57) Zusammenfassung: Eine mikroakustische Vorrichtung umfasst eine Begrenzungsstruktur, die dazu eingerichtet ist, eine Propagation von akustischen Wellen mit einer Betriebsfrequenz der Vorrichtung zu verhindern, um die akustischen Wellen auf den akustischen Pfad oder das akustische Volumen zu begrenzen. Es wird vorgeschlagen, ein Phononischer-Kristall-Material zum Produzieren der Begrenzungsstruktur zu verwenden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft mikroakustische Vorrichtungen, wie SAW- und BAW-Vorrichtungen, und auch ein Herstellungsverfahren. Insbesondere stellt die Erfindung eine bessere Begrenzung der akustischen Wellen innerhalb dieser Vorrichtungen und dadurch eine Verbesserung des Gesamtgütefaktors Q der Vorrichtung bereit.

[0002] Bisher erfolgte eine laterale Energiebegrenzung durch geometriebasierte Gestaltungen. Innerhalb von BAW-Vorrichtungen, die als eine SMR-Vorrichtung (SMR: Solidly Mounted Resonator - fest montierter Resonator) ausgeführt sind, erfolgt eine akustische Isolation zu dem darunterliegenden Substrat durch einen Bragg-Spiegel, der akustische Wellen durch Interferenz an Lambda-Viertel-Schichten reflektiert, wobei Lambda die Wellenlänge der akustischen Welle ist. Innerhalb von BAW-Vorrichtungen, die als FBAR-Vorrichtungen ausgeführt sind, ist die akustische Isolation zu dem darunterliegenden Substrat durch einen luftgefüllten Spalt zwischen dem aktiven Resonatorvolumen, das auf einer Membran angeordnet ist, und dem Substrat bereitgestellt.

[0003] DE 10 2017 105 432 B3 offenbart einen Resonator, der ein piezoelektrisches Material mit einer ersten und einer zweiten Elektrode, die auf dem piezoelektrischen Material bereitgestellt sind, beinhaltet. Ein akustisches Metamaterial umgibt einen aktiven Bereich des Resonators zumindest teilweise.

[0004] SAW-Resonatoren oder Transferfilter verwenden elektrisch kurzgeschlossene Gitter aus Reflektorstreifen. In SAW-Wandlern stellen die Sammelschienen eine gewisse laterale Wellenbegrenzung durch Reflektieren einer Welle an den Rändern von diesen bereit. Außerdem kann ein Transversalwellenleitungsprofil implementiert werden, das eine transversal variierende Wellengeschwindigkeit festlegt, die die Welle auf den gewünschten akustischen Pfad begrenzt.

[0005] Die bekannten akustischen Begrenzungsstrukturen ergeben unterschiedliche Probleme oder erfordern komplexe und teure Herstellungsverfahren.

[0006] Es ist ein Ziel, mikroakustische Vorrichtungen bereitzustellen, die eine verbesserte Begrenzung der akustischen Welle aufweisen, Verluste reduzieren und einfach herzustellen sind.

[0007] Diese und andere Ziele werden durch eine mikroakustische Vorrichtung nach Anspruch 1 und den Verfahren nach Anspruch 8, 11 oder 12 gelöst.

[0008] Weitere Merkmale und vorteilhafte Ausführungsformen sind durch die abhängigen Ansprüche gegeben.

[0009] Eine mikroakustische Vorrichtung umfasst üblicherweise ein Substrat, eine piezoelektrische Schicht auf einer oberen Oberfläche des Substrats und eine Elektrodenstruktur auf der piezoelektrischen Schicht zum Anregen akustischer Wellen bei einer Betriebsfrequenz. Innerhalb der Vorrichtung propagieren die akustischen Wellen entlang eines akustischen Pfades oder innerhalb eines aktiven Volumens der piezoelektrischen Schicht. Daher können mögliche mikroakustische Vorrichtungen gemäß der Erfindung als SAW- und BAW-Vorrichtungen und Varianten wie GBAW (Guided Bulk Acoustic Wave - geleitete akustische Volumenwelle), TFSAW (Thin Film Surface Acoustic Wave - akustische Dünnschichtoberflächenwelle) oder TCSAW (Temperature Compensated Surface Acoustic Wave - temperaturkompensierte akustische Oberflächenwelle) ausgeführt sein.

[0010] Gemäß der Erfindung ist eine Begrenzungsstruktur bei einer Position lateral zu dem akustischen Pfad und/oder zwischen Substrat und piezoelektrischer Schicht und/oder auf der oberen Oberfläche der Elektrodenstruktur oder der piezoelektrischen Schicht angeordnet. Innerhalb der Begrenzungsstruktur und durch die Struktur wird eine Propagation von akustischen Wellen mit der Betriebsfrequenz verhindert und daher werden die akustischen Wellen auf den akustischen Pfad oder das akustische Volumen begrenzt. Die Begrenzungsstruktur umfasst ein Phononisches-Kristall-Material.

[0011] Periodische Strukturen aus Materialien mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften (phononische Kristalle) bieten abstimmbare phononische Bandlücken, bei denen eine Propagation von Schall verboten ist. Die Idee ist, den phononischen Kristall so zu gestalten und zu modellieren, dass die Bandlücke mit der Betriebsfrequenz übereinstimmt. Da keine akustische Welle den phononischen Kristall durchlaufen kann, wirkt er perfekt als ein akustischer Spiegel, der alle auftreffenden Wellen mit einer Frequenz innerhalb der Bandlücke reflektiert. Der phononische Kristall verhindert, dass akustische Wellen mit einer Frequenz innerhalb der phononischen Bandlücke das Material des phononischen Kristalls durchlaufen, unabhängig von der Richtung der Wellenpropagation. Das Anordnen einer solchen Begrenzungsstruktur auf einer beliebigen Seite der mikroakustischen Vorrichtung, wo ansonsten eine Mode den akustischen Pfad oder das aktive Volumen verlassen kann, verhindert ein Lecken von Energie.

[0012] Die Frequenzposition und die Bandbreite der Bandlücken können gesteuert werden, indem die Abmessungen, Aspektverhältnisse, die Kristallstruktur und Materialeigenschaften der phononischen Kristalle gesteuert werden.

[0013] Im Übrigen können solche phononischen Kristalle als akustische Entkopplungsschichten ver-

wendet werden, die neuartige mikroakustische Gestaltungen ermöglichen.

[0014] Das Phononischer-Kristall-Material, das als eine Begrenzungsstruktur verwendet wird, weist ein strukturiertes Muster entlang wenigstens einer Abmessung gemäß einem periodischen Gitter auf. Die gitterartig strukturierte Muster umfasst sich wiederholende Einheiten eines ersten festen Materials, das in einem zweiten festen Material eingebettet ist, wobei sich das erste und zweite Material in wenigstens einem von Material, Dichte, Elastizitätsmoduln, akustischer Impedanz, Geschwindigkeit einer akustischen Welle, Steifigkeit, E-Modul und Härte unterscheiden.

[0015] Die Bandlücke des Phononischer-Kristall-Materials kann modelliert werden, indem eine geeignete Größe der sich wiederholenden Einheiten gewählt wird und indem ein erstes und zweites Material geeignet gewählt werden, so dass sie sich hinsichtlich der akustischen Impedanz ausreichend unterscheiden. Die sich wiederholenden Einheiten sind in einem geeigneten gemeinsamen Abstand angeordnet, um eine maximale Reflexion durch den phononischen Kristall bei der Betriebsfrequenz zu erzielen.

[0016] Der Effekt, der zu der Bandlücke führt, basiert auf der akustischen Reflexion und Interferenz, die an den Grenzflächen unterschiedlicher sich wiederholender Einheiten und an den Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Abschnitten des ersten und zweiten Materials auftreten. Da keine andere Eigenschaft eines ersten und zweiten Materials für den Effekt relevant ist, können nützliche Kombinationen eines ersten und eines zweiten Materials aus beinahe allen festen Materialien ausgewählt werden. Jedoch müssen die Produktion und Verfügbarkeit der Materialien den mikroakustischen Vorrichtungen entsprechen. Eine Materialauswahl kann beispielsweise mit einer maximalen Differenz der akustischen Impedanz erfolgen, die üblicherweise der Dichte von diesem entspricht. Daher kann eines des ersten und zweiten Materials ein Schwermetall, wie z. B. W oder Mo, sein. Das jeweilige andere Material kann dann ein leichtgewichtiges Dielektrikum sein, wie zum Beispiel ein Polymer oder ein geeigneter anorganischer oder keramischer Feststoff, wie zum Beispiel SiO_2 , sein. Jedoch können ebenso zwei Metalle oder zwei Dielektrika als erstes und zweites Material gewählt werden.

[0017] Gemäß einer Ausführungsform umfasst die mikroakustische Vorrichtung eine Anordnung von BAW-Resonatoren, die auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet sind. Unterhalb der Resonatoren, das heißt zwischen Resonator und Substrat, ist eine Begrenzungsstruktur, die als eine Schicht gebildet ist, angeordnet, um eine akustische Kopplung zwischen unterschiedlichen BAW-Resonatoren

zu vermeiden und um ein Lecken akustischer Energie in das Substrat zu vermeiden. Diese Schicht aus Phononischer-Kristall-Material kann den üblichen Bragg-Spiegel substituieren.

[0018] Alternativ dazu oder zusätzlich kann die Begrenzungsstruktur lateral zwischen den unterschiedlichen BAW-Resonatoren angeordnet sein. Dadurch kann die BAW-Resonator-Anordnung mit einer ebenen oberen Oberfläche bereitgestellt werden, wenn alle Spalte zwischen einzelnen BAW-Resonator-Stapeln vollständig mit dem Phononischer-Kristall-Material gefüllt sind.

[0019] Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst die mikroakustische Vorrichtung eine Anordnung von BAW-Resonatoren, die aufeinander auf einem gemeinsamen Substrat gestapelt sind. Eine Begrenzungsstruktur umfasst eine Schicht aus Phononischer-Kristall-Material, die an der Grenzflächenschicht zwischen zwei gestapelten BAW-Resonatoren angeordnet ist. Infolgedessen können die gestapelten Resonatoren vollständig entkoppelt sein und kann eine raumsparende Anordnung unterschiedlicher Resonatoren erzielt werden.

[0020] Das Einsetzen eines Phononischer-Kristall-Materials als eine akustische Entkopplungsschicht in einer Vorrichtung ermöglicht neuartige mikroakustische Gestaltungen, wie etwa die gleichzeitige Produktion von Rx- und Tx-Filtern auf demselben Substrat und Stapeln von akustisch entkoppelten Resonatoren.

[0021] Bei einer speziellen Ausführungsform umfasst die mikroakustische Vorrichtung eine Dünnschicht-SAW-Vorrichtung mit einem akustischen Pfad, der sich innerhalb der piezoelektrischen Dünnschicht und nahe der Oberseite des Substrats befindet. Eine Begrenzungsstruktur eines Phononischer-Kristall-Materials ist lateral angrenzend an den akustischen Pfad der SAW-Vorrichtung angeordnet, um zu verhindern, dass eine SAW den akustischen Pfad verlässt. Zusätzlich zu und ähnlich der zuvor erwähnten BAW-Resonator-Anordnung kann ein Phononischer-Kristall-Material als eine Begrenzungsschicht zwischen Piezoelektrikum und Substrat angeordnet sein.

[0022] In einem Filterschaltkreis umfasst die mikroakustische Vorrichtung ein Substrat mit einer Schicht eines Begrenzungsmaterials auf der Oberfläche von diesem. Unterschiedliche mikroakustische HF-Filter sind auf dem Substrat oberhalb der Schicht des Begrenzungsmaterials angeordnet. Das HF-Filter umfasst ein Rx- und ein Tx-Filter desselben Kommunikationsbands, die jeweils durch eine Schicht eines Begrenzungsmaterials akustisch isoliert sind.

[0023] In einer SAW-Vorrichtung kann die Begrenzungsstruktur auf der piezoelektrischen Schicht oder

dem Substrat angrenzend an die Interdigitalwandler und Reflektoren angeordnet sein. Alternativ dazu kann die Begrenzungsstruktur in dem piezoelektrischen Material nahe der oberen Oberfläche von diesem eingebettet sein.

[0024] In einer BAW-Vorrichtung kann die Begrenzungsstruktur den Bragg-Spiegel unterhalb der Resonanzstruktur (aktivem Resonatorvolumen) substituieren. Alternativ dazu kann die Begrenzungsstruktur lateral angrenzend an das aktive Resonatorvolumen angeordnet sein.

[0025] Bei einer gestapelten Anordnung eines oberen und eines unteren BAW-Resonators kann die Begrenzungsstruktur zwischen der oberen Elektrode des unteren Resonators und der unteren Elektrode des oberen Resonators angeordnet sein.

[0026] Die mikroakustische Vorrichtung kann eine Anzahl an BAW-Resonatoren umfassen, die aneinander angrenzend auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet sind, um einen Filterschaltkreis zu bilden. Die Verschaltung wird durch eine obere Elektroden- oder eine untere Elektrodenverbindung erreicht. Dies bedeutet, dass der verbindende Leiter durch Strukturieren der oberen Elektrode oder der unteren Elektrode gebildet ist. Gemäß einer Ausführungsform wird die entsprechende Verbindung aus einem elektrisch leitenden Phononischer-Kristall-Material gebildet. In diesem Material sind ein erstes und zweites Material so gewählt, dass sie elektrisch leitfähig sind. Leitfähigkeit kann eine intrinsische Eigenschaft des Materials sein oder kann durch Verwenden eines Harzmaterials erreicht werden, das mit einem elektrisch leitfähigen Füllstoff, wie etwa Kohlenstoff- oder Metallperlen oder -flocken, gefüllt ist.

[0027] Nachfolgend wird die Erfindung ausführlicher durch spezielle Ausführungsformen und die betreffenden Figuren erläutert. Die Figuren sind nicht maßstabsgetreu gezeichnet und können daher keine realen Abmessungen oder ein genaues Verhältnis von dargestellten Abmessungen zeigen.

Fig. 1 zeigt Verfahrensschritte eines ersten Verfahrens zum Herstellen einer Begrenzungsstruktur;

Fig. 2 zeigt Verfahrensschritte eines zweiten Verfahrens zum Herstellen einer Begrenzungsstruktur;

Fig. 3 zeigt Verfahrensschritte eines dritten Verfahrens zum Herstellen einer Begrenzungsstruktur;

Fig. 4 zeigt Verfahrensschritte eines 3D-Druckverfahrens zum Herstellen einer Begrenzungsstruktur;

Fig. 5 zeigt eine schematische Basiszelle eines phononischen Kristalls;

Fig. 6 zeigt die Wellenzahlen unterschiedlicher Moden in Abhängigkeit von der räumlichen Propagationsrichtung und der zugewiesenen Frequenz;

Fig. 7 zeigt ein Modell, mit dem eine Berechnung eines Transmissionsverhaltens durchgeführt werden kann;

Fig. 8 zeigt die Transmissionskurve des Phononischer-Kristall-Materials aus **Fig. 5**, wobei die Bandlücke bei einer HF-Frequenz festgelegt ist;

Fig. 9 zeigt die Transmissionskurve eines derzeitigen Bragg-Spiegels;

Fig. 10 zeigt einen BAW-Resonator mit einer lateralen Energiebegrenzungsstruktur;

Fig. 11 zeigt einen BAW-Resonator mit einer vertikalen Energiebegrenzungsstruktur zwischen Resonator und Substrat;

Fig. 12 zeigt zwei gestapelte BAW-Resonatoren mit einer Entkopplungsbegrenzungsstruktur zwischen den zwei Resonatoren;

Fig. 13 zeigt eine SAW-Vorrichtung mit einer lateralen Begrenzungsstruktur;

Fig. 14 zeigt einen BAW-Resonator mit einem elektrisch leitenden Phononischer-Kristall-Material, das so strukturiert ist, dass eine obere Elektrodenverbindung des BAW-Resonators gebildet wird;

Fig. 15 zeigt einen BAW-Resonator mit einer oberen Elektrodenverbindung und einem Phononischer-Kristall-Material, das unterhalb der oberen Elektrodenverbindung angeordnet ist.

[0028] Ein erstes Verfahren zum Herstellen eines Phononischer-Kristall-Materials, das zum Bilden einer Begrenzungsstruktur bei einer mikroakustischen Vorrichtung verwendbar ist, ist unter Bezugnahme auf **Fig. 1A** bis **Fig. 1D** beschrieben. Jede Figur zeigt eine Stufe des Prozesses.

[0029] Der Prozess beginnt mit einem Substrat **SU**, das ein herkömmlicher Träger aus einem mechanisch stabilen Material mit gewünschten thermomechanischen Eigenschaften sein kann. Auf diesen Träger kann eine Schicht aus einem funktionalen Material abgeschieden werden. Alternativ dazu kann das Substrat vollständig aus einem funktionalen Material bestehen, wie zum Beispiel einem piezoelektrischen Wafer. Ferner kann das Substrat funktionale Vorrichtungsstrukturen einer mikroakustischen Vorrichtung aufweisen, zum Beispiel Elektrodenstrukturen einer SAW- oder einer BAW-Vorrichtung.

[0030] Auf diesem Substrat **SU** wird eine Schicht aus einem ersten Material **M1** durch einen geeigneten Abscheidungsprozess abgeschieden, wie in **Fig. 1A** gezeigt ist. Das erste Material kann ein Metall, eine Ke-

ramikschicht oder ein Harz, wie ein Polymer, oder eine beliebige andere Schicht sein, die ein Material bildet, das mit der Vorrichtung und dem Herstellungsprozess kompatibel ist. Die M1-Schicht wird dann durch z. B. selektives Ätzen eines ersten Materials zum Bilden eines periodischen Gitters aus sich wiederholenden Einheiten **RU1** strukturiert. Die Struktur kann Streifen umfassen, die sich nur in einer Richtung erstrecken. Ferner kann die Struktur zweidimensional sein, wie ein Schachbrettmuster.

[0031] Die Abmessungen der sich wiederholenden Einheiten und ebenso ihre Abstände werden so gewählt, dass sie nahe der Wellenlänge der akustischen Welle sind, die reflektiert werden muss, das heißt der Wellenlänge, die der Bandlücke des zu produzierenden Phononischer-Kristall-Materials entspricht.

[0032] Die in **Fig. 1B** gezeigte Struktur ist bereits so konfiguriert, dass sie als ein herkömmlicher akustischer Spiegel wirkt, stellt aber möglicherweise noch keine phononische Bandlücke bereit. Der Spiegel wirkt in einer horizontalen Richtung. Jedoch wird es bevorzugt, die Spalte oder Lücken zwischen den sich wiederholenden Einheiten **RU1** aus dem ersten Material **M1** zu füllen. Daher wird ein zweites Material **M2** über der gesamten Oberfläche der Anordnung abgeschieden, wie in **Fig. 1C** gezeigt ist. Das zweite Material **M2** ist von dem ersten Material **M1** verschieden und zeigt eine stark abweichende akustische Impedanz. Das zweite Material kann als eine Flüssigkeit aufgebracht werden. Alternativ dazu kann das zweite Material als ein Feststoff aufgebracht werden, z. B. durch einen Dampfphasenabscheidungsprozess, wie Sputtern, CVD, Plasmaabscheidung, Aufdampfen und dergleichen.

[0033] In dem gezeigten Fall wird das zweite Material **M2** in die Spalten hinein aufgebracht, erstreckt sich aber über die sich wiederholenden Einheiten **RU1** des ersten Materials. Daher folgt ein Planarisierungsschritt. Z. B. kann ein CMP (chemisch-mechanisches Polieren) durchgeführt werden, um überschüssiges zweites Material zu entfernen, um eine ebene Oberfläche bereitzustellen, wobei erste und zweite sich wiederholende Einheiten **RU1**, **RU2** in einer oder zwei Richtungen alternieren, wie in **Fig. 1D** gezeigt ist.

[0034] **Fig. 2A** bis **Fig. 2D** zeigen unterschiedliche Verfahrensstufen während eines zweiten Herstellungsprozesses. Auf der oberen Oberfläche eines Substrats **SU**, wie in **Fig. 2A** gezeigt, wird eine erste Monoschicht aus monodispersen sphärischen Mikroperlen **MB** aus einem ersten Material abgeschieden, z. B. mittels einer Langmuir-Blodgett-Technik. Dazu kann ein Selbstassemblierungsprozess verwendet werden. Ein solcher Prozess liefert eine dichte und periodische Anordnung von Mikroperlen und

muss nicht mehr strukturiert oder gemustert werden. **Fig. 2B** zeigt die Monoschicht aus Mikroperlen **MB**.

[0035] In dem nächsten Schritt werden die Spalte oder Lücken zwischen den Mikroperlen mit einem zweiten Material **M2** gefüllt. Ein flüssiges Material kann einfach aufgebracht werden und daher wird ein flüssiges Harz, wie etwa ein Epoxid, bevorzugt. Nach dem vollständigen Füllen der Spalte/Lücken wird die so produzierte Schicht ausgehärtet, um das Harz in einen festen Zustand zu transformieren, in dem die Mikroperlen **MB** eingebettet sind, wobei eine stabile Schicht aus einem Phononischer-Kristall-Material gebildet wird, wie in **Fig. 2C** gezeigt ist.

[0036] Auf der ebenen Oberfläche, die nach dem Aushärten erreicht wird, können eine zweite und weitere Schichten produziert werden, um eine dreidimensionale Struktur aus dem Phononischer-Kristall-Material zu bilden. **Fig. 1D** zeigt beispielhaft drei Schichten. Jedoch können mehr Schichten abhängig von der gewünschten Höhe des Phononischer-Kristall-Materials bzw. der daraus gebildeten Begrenzungsstruktur aufgebracht werden.

[0037] Eine Beziehung zwischen den Abmessungen der sich wiederholenden Einheiten und der Frequenz der phononischen Bandlücke kann so sein, wie im Folgenden gezeigt. Bei einem Beispiel beträgt die Schallgeschwindigkeit in einem piezoelektrischen Material etwa 10000 m/s. Daher resultiert bei einer Frequenz von 2 GHz eine Wellenlänge von etwa 5 μm . Mit den sich wiederholenden Einheiten, die durch die oben beschriebenen Mikroperlen gebildet werden, die einen Durchmesser von 1 μm aufweisen und in einem Epoxidmaterial eingebettet sind, kann eine phononische Bandlücke von etwa 2 GHz erzielt werden.

[0038] **Fig. 3A** bis **Fig. 3F** zeigen unterschiedliche Verarbeitungsstufen während einer dritten Herstellungsvariante. **Fig. 3A** bis **Fig. 3D** stellen die gleichen Schritte wie in **Fig. 1A** bis **Fig. 1D** gezeigt dar, so dass eine alternierende Struktur von ersten und zweiten sich wiederholenden Einheiten **RU1** und **RU2** resultiert, die zusammen eine Schicht mit einer ebenen Oberfläche bilden. Darauf wird eine Schicht des ersten Materials abgeschieden, wie in **Fig. 3E** gezeigt ist, und durch ein geeignetes Strukturierungsverfahren strukturiert. Eine Lithografie kann verwendet werden. In der zweiten Schicht werden die sich wiederholenden Einheiten relativ zu ihrer jeweiligen Anordnung in der ersten Schicht verschoben, so dass zweite sich wiederholende Einheiten **RU2** der zweiten Schicht direkt über ersten sich wiederholenden Einheiten **RU1** in der ersten Schicht platziert werden. Wiederholen der Schritte gemäß **Fig. 1A** bis **Fig. 1D** führt zu einer dreidimensionalen periodischen Anordnung, wie in **Fig. 3F** gezeigt ist.

[0039] Unter Bezugnahme auf **Fig. 4A** bis **Fig. 4D** ist ein weiteres Verfahren gezeigt. Eine additive Herstellung von 3D-Strukturen ermöglicht Strukturen mit einer Größe im sub- μm -Bereich, z. B. mittels Zwei-Photonen-Lithografie in einen Fotolack-Metall-Vorläufer gedruckt. Das Ersetzen des nichtfreiliegenden Fotolacks mit einem flüssigen Dielektrikumvorläufer (z. B. TEOS), gefolgt von einem anschließenden Tempereschritt führt zu einem Verkleinern der Struktur mit einem wohldefinierten Verhältnis.

[0040] In dem 3D-Druckprozess kann das Phononischer-Kristall-Material in einer gewünschten Dicke als eine zwei- oder dreidimensionale Struktur gebildet werden. Auf einem Substrat **SU** wird das 3D-Muster direkt durch 3D-Drucken gebildet. Bei einer ersten Variante sind erste sich wiederholende Einheiten **RU1** alternierend zwischen leeren Spalten angeordnet, die zwischen den ersten sich wiederholenden Einheiten **RU1** verbleiben, wie in **Fig. 4B** gezeigt ist. Diese Spalte/Lücken können mit einem zweiten Material **M2** gefüllt werden, das in flüssiger Form aufgebracht wird und anschließend ausgehärtet wird. **Fig. 4C** zeigt die jeweilige Anordnung vor und **Fig. 4D** nach dem Aushärten.

[0041] Gemäß einer zweiten Variante kann der 3D-Druckprozess verwendet werden, um die Struktur der ersten und zweiten sich wiederholenden Einheiten parallel und direkt zu bilden, wie in **Fig. 4D** gezeigt ist. Das erste und zweite Material können so gewählt werden, dass eine gewünschte Differenz der jeweiligen akustischen Impedanzen bereitgestellt wird.

[0042] Nach dem Bilden des Phononischer-Kristall-Materials in einer Blockform kann ein weiterer Strukturierungsprozess verwendet werden, um eine Begrenzungsstruktur einer gewünschten Form zu bilden. Eine solche Formung oder Strukturierung kann notwendig sein, falls es bereits existierende Vorrichtungsstrukturen auf dem Substrat gibt und die Begrenzungsstrukturen bei einer speziellen Stelle innerhalb einer begrenzten Abmessung angeordnet werden müssen. Bei Anwendungen, bei denen die Begrenzungsstruktur als eine Schicht über dem gesamten Substrat oder der gesamten Vorrichtung aufgebracht wird, ist keine Strukturierung erforderlich.

[0043] Nachfolgend werden der Bandlückeneffekt und Eigenschaften eines Phononischer-Kristall-Materials unter Bezugnahme auf ein Modell und eine jeweilige Berechnung basierend auf diesem Modell erklärt.

[0044] **Fig. 5** zeigt eine Struktur, die durch eine dichte Anordnung von sphärischen Körpern eines ersten Materials (SiO_2), eingebettet in einer Matrix aus einem zweiten Material (Epoxid), gebildet wird. Innerhalb dieses Modells können unterschiedliche räumliche Moden definiert werden, um das Verhalten

des phononischen Kristalls entlang dieser räumlichen Richtungen zu berechnen. Die sphärischen Körper weisen einen Durchmesser von etwa $1 \mu\text{m}$ auf und die dargestellte Basiszelle weist einen Durchmesser von etwa $1,5 \mu\text{m}$ auf. Das fcc-Gitter in dieser Basiszelle weist ein r/a -Verhältnis von 0,35 auf.

[0045] **Fig. 6** zeigt ein Dispersionsdiagramm. Es wird offensichtlich, dass die dargestellten Moden variierende Frequenzen in unterschiedlichen räumlichen Richtungen zeigen.

[0046] Aber es gibt eine Bandlücke zwischen 1900 MHz und 2300 MHz, in der weder eine Anregung noch Propagation von irgendeiner akustischen Mode auftritt. Eine weitere Bandlücke kann bei etwa 2800 MHz gefunden werden.

[0047] Ein Transmissionsgrad für akustische Wellen einer solchen Struktur wird unter Bezugnahme auf ein in **Fig. 7** gezeigtes Modell berechnet. In dem Modell ist ein Würfel aus Phononischer-Kristall-Material durch perfekt angepasste Schichten umschlossen, so dass die Ergebnisse für ein Volumen mit unendlicher räumlicher Ausdehnung anwendbar sind. Auf einen beschränkten Oberflächenbereich auf der oberen Oberfläche in dem Zentrum des dargestellten Würfels wird eine Kraft mit einer variierenden Frequenz ausgeübt. Auf der Unterseite und daher gegenüber der Fläche, auf die Kraft ausgeübt wird, wird die Verformung berechnet.

[0048] Dieses Ergebnis ist in **Fig. 8** gezeigt. Die Kurve stellt den berechneten Transmissionsgrad akustischer Wellen in dieser Modellstruktur dar. Innerhalb der Bandlücke nimmt der Transmissionsgrad auf Werte unterhalb von -50 dB ab, während für das verbleibende Spektrum ein hoher Transmissionsgrad von etwa -10 dB und mehr erzielt wird. Daher entspricht der Transmissionsgrad der berechneten Moden-Propagation, wie in **Fig. 7** gezeigt ist.

[0049] **Fig. 9** zeigt den Transmissionsgrad eines Bragg-Spiegels, der momentan als ein akustischer Spiegel in derzeitigen BAW-Vorrichtungen verwendet wird. Die untere Kurve entspricht der Longitudinalmode und die obere Kurve entspricht der jeweiligen Schermode. Die horizontale Linie bei -35 dB entspricht dem maximalen Transmissionsgrad für Longitudinalwellen in dem Reflektorband eines Bragg-Spiegels.

[0050] **Fig. 8** beweist, dass der phononische Kristall eine höhere Reflektivität in der Bandlücke und daher einen geringen Transmissionsgrad als ein herkömmlicher Bragg-Spiegel zeigt. Es ist daher sehr vorteilhaft, den Bragg-Spiegel einer BAW-Vorrichtung durch eine Begrenzungsstruktur zu ersetzen, die aus einem phononischen Kristall wie beschrieben gefertigt ist.

[0051] Fig. 10 zeigt eine Ausführungsform einer mikroakustischen Vorrichtung, die als ein BAW-Resonator unter Verwendung einer lateralen Begrenzungsstruktur **CS** ausgeführt ist, die aus einem Phononischer-Kristall-Material besteht. Der BAW-Resonator umfasst eine untere Elektrode **BE**, eine piezoelektrische Schicht **PL** und eine obere Elektrode **TE**. Zwischen der unteren Elektrode und dem Substrat ist ein akustischer Spiegel angeordnet (nicht gezeigt), um akustische Verluste in das Volumen des Substrats zu vermeiden. Die obere Elektrode **TE** erstreckt sich über den aktiven Resonatorbereich hinaus, in dem die untere Elektrode **BE**, die piezoelektrische Schicht **PL** und eine obere Elektrode **TE** einander überlappen. Diese Ausdehnung wird strukturiert, um eine obere Elektrodenverbindung **TEC** zum elektrischen Kontaktieren eines anderen Resonators oder eines Anschlusses des BAW-Resonators bereitzustellen. Da diese obere Elektrodenverbindung **TEC** anfällig für elektrische Verluste durch Anregung von lateralen Störmoden ist, wird eine Begrenzungsstruktur **CS**, die aus einem strukturierten Phononischer-Kristall-Material besteht, auf dem Substrat unterhalb der oberen Elektrodenverbindung **TEC** angeordnet. Durch eine solche Anordnung können akustische Verluste der oberen Elektrodenverbindung **TEC** erheblich reduziert werden.

[0052] Fig. 11 zeigt eine weitere Ausführungsform, wobei eine Begrenzungsstruktur **CS**, die aus einer Schicht aus einem Phononischer-Kristall-Material besteht, den üblicherweise verwendeten Bragg-Spiegel auf dem Substrat unterhalb der unteren Elektrode **BE** substituiert. Eine solche Schicht kann fünf Schichten aus sich wiederholenden Einheiten umfassen, die ausreichen, um die erforderliche Reflexion innerhalb der Bandlücke bereitzustellen.

[0053] Fig. 12 zeigt eine andere Ausführungsform, wobei eine Begrenzungsstruktur **CS2**, die aus einer Schicht eines Phononischer-Kristall-Materials besteht, verwendet wird, um zwei BAW-Resonatoren **REST**, **RESB** akustisch zu entkoppeln, die auf einem Substrat **SU** übereinander gestapelt sind. Eine weitere Begrenzungsstruktur **CS1**, die aus einer Schicht eines Phononischer-Kristall-Materials besteht, wird als ein akustischer Spiegel auf dem Substrat **SU** verwendet. Jeder BAW-Resonator **RES** umfasst eine untere Elektrode **BE**, eine piezoelektrische Schicht **PL** und eine obere Elektrode **TE**. Da jede solche Zwischenbegrenzungsschicht mit einer ebenen Oberfläche erzeugt werden kann, ist die gestapelte Anordnung nicht auf zwei gestapelte Resonatoren begrenzt.

[0054] Fig. 13 ist eine Ausführungsform, bei der eine strukturierte Begrenzungsschicht **CS** aus einem Phononischer-Kristall-Material auf die piezoelektrische Schicht **PL** einer SAW-Vorrichtung abgeschieden ist, um eine laterale Energiebegrenzung bereitzustellen, die bewirkt, dass die akustische Energie

auf den akustischen Pfad begrenzt wird. Obwohl eine Begrenzungsstruktur **CS** gezeigt ist, die den akustischen Pfad vollständig umgibt, ist es auch möglich, eine solche Struktur nur an der Lateralseite entlang den Sammelschienen der Elektrodenstrukturen **ES** oder an den Longitudinalenden des akustischen Pfads, die einen IDT und/oder Reflektor umfassen, zu platzieren. Bei einer komplexen Anordnung ist es möglich, die Reflektoren durch eine Begrenzungsstruktur aus einem Phononischer-Kristall-Material zu ersetzen.

[0055] Fig. 14 zeigt eine Ausführungsform einer mikroakustischen Vorrichtung mit einem phononischen Kristall. Ein BAW-Resonator umfasst eine untere Elektrode **BE**, eine piezoelektrische Schicht **PL** und eine obere Elektrode **TE**. Ein aktives Resonatorvolumen ist das Volumen, wo alle drei Schichten einander überlappen. Zum Bilden einer oberen Elektrodenverbindung wird die obere Elektrode **TE** lateral durch eine elektrisch leitende Begrenzungsstruktur **CS** verlängert, die durch ein Phononischer-Kristall-Material gebildet ist.

[0056] Fig. 15 zeigt eine ähnliche Ausführungsform einer mikroakustischen Vorrichtung. Auch hier umfasst der BAW-Resonator eine untere Elektrode **BE**, eine piezoelektrische Schicht **PL** und eine obere Elektrode **TE**. Ein aktives Resonatorvolumen ist das Volumen, wo alle drei Schichten einander überlappen. Die obere Elektrode **TE** ist verlängert, so dass sie sich lateral über das aktive Resonatorvolumen erstreckt, wodurch eine obere Elektrodenverbindung gebildet wird. Eine Begrenzungsstruktur **CS**, die aus einem dielektrischen Phononischer-Kristall-Material gebildet ist, ist unterhalb der oberen Elektrodenverbindung angeordnet. Die Begrenzungsstruktur verhindert, dass akustische Wellen aus der oberen Elektrodenverbindung **TEC** heraus lecken.

Bezugszeichenliste

	mikroakustische Vorrichtung
SU	Substrat obere Oberfläche des Substrats
PL	piezoelektrische Schicht
ES	Elektrodenstruktur Betriebsfrequenz akustischer Pfad aktives Volumen
CS	Begrenzungsstruktur Phononischer-Kristall-Material strukturiertes Muster periodisches Gitter
RU	sich wiederholende Einheit Spalt
M1	erstes festes Material, eingebettet in einem
M2	zweiten festen Material BAW-Resonator Anordnung von BAW-Resonatoren Rx-Filter Tx-Filter

TEC	obere Elektrodenverbindung
BE	untere Elektrodenverbindung akustischer Spiegel Dünnschicht-SAW-Vorrichtung
MB	Mikroperlen
RES	Resonator

der Resonatoren zwischen Resonator und Substrat angeordnet ist.

4. Mikroakustische Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die mikroakustische Vorrichtung eine Anordnung von BAW-Resonatoren umfasst, die aufeinander auf einem gemeinsamen Substrat gestapelt sind, wobei die Begrenzungsstruktur eine Schicht umfasst, die an der Grenzfläche zwischen zwei gestapelten BAW-Resonatoren angeordnet ist.

Patentansprüche

1. Mikroakustische Vorrichtung, die Folgendes umfasst:

- ein Substrat (SU)
- eine piezoelektrische Schicht (PL) auf einer oberen Oberfläche des Substrats,
- eine Elektrodenstruktur auf der piezoelektrischen Schicht zum Anregen akustischer Wellen mit einer Betriebsfrequenz, die entlang eines akustischen Pfades oder innerhalb eines aktiven Volumens der piezoelektrischen Schicht propagieren,
- eine Begrenzungsstruktur (CS), die dazu eingerichtet ist, eine Propagation von akustischen Wellen mit der Betriebsfrequenz zu verhindern, um die akustischen Wellen auf den akustischen Pfad oder das akustische Volumen zu begrenzen, wobei die Begrenzungsstruktur wie folgt angeordnet ist:
 - zwischen dem Substrat und der piezoelektrischen Schicht und/oder
 - auf der oberen Oberfläche der Elektrodenstruktur oder der piezoelektrischen Schicht.

2. Mikroakustische Vorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch,

wobei die Begrenzungsstruktur ein Phononischer-Kristall-Material umfasst, das ein strukturiertes Muster entlang wenigstens einer Abmessung gemäß einem periodischen Gitter aufweist, wobei das gitterartig strukturierte Muster sich wiederholende Einheiten (RU) eines ersten festen Materials (M1), das in einem zweiten festen Material (M2) eingebettet ist, umfasst, wobei sich das erste und zweite Material in wenigstens einem von Material, Dichte, akustischer Impedanz, Geschwindigkeit einer akustischen Welle, Steifigkeit, E-Modul und Härte unterscheiden, wobei die Größe und der Abstand der sich wiederholenden Einheiten so gewählt werden, dass eine phononische Bandlücke bei der gewünschten Betriebsfrequenz erzielt wird.

3. Mikroakustische Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei die mikroakustische Vorrichtung eine Anordnung von BAW-Resonatoren umfasst, die auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet sind, wobei eine akustische Kopplung zwischen unterschiedlichen BAW-Resonatoren vermieden wird, indem die Begrenzungsstruktur zwischen den unterschiedlichen BAW-Resonatoren und/oder unterhalb

5. Mikroakustische Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die mikroakustische Vorrichtung eine Dünnschicht-SAW-Vorrichtung umfasst, die einen akustischen Pfad innerhalb der piezoelektrischen Dünnschicht und auf dem Substrat angeordnet umfasst, wobei eine Schicht des Begrenzungsmaterials lateral angrenzend an den akustischen Pfad der SAW-Vorrichtung angeordnet ist.

6. Mikroakustische Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die Folgendes umfasst:

- ein Substrat mit einer Schicht eines Begrenzungsmaterials auf der oberen Oberfläche davon,
- unterschiedliche mikroakustische HF-Filter, die auf demselben Substrat oberhalb der Schicht des Begrenzungsmaterials angeordnet sind,
- wobei das HF-Filter ein Rx- und ein Tx-Filter umfasst, die jeweils durch eine Schicht eines Begrenzungsmaterials akustisch isoliert sind.

7. Mikroakustische Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die eine Anordnung aus verschalteten BAW-Resonatoren umfasst, die aneinander angrenzend auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet sind,

wobei die BAW-Resonatoren über eine obere Elektroden- oder eine untere Elektrodenverbindung verschaltet sind, wobei die obere Elektroden- oder eine untere Elektrodenverbindung aus einem elektrisch leitenden Phononischer-Kristall-Material gebildet sind.

8. Verfahren zum Herstellen der mikroakustischen Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das die folgenden Schritte umfasst:

- Bilden einer piezoelektrischen Schicht und einer Elektrodenstruktur der mikroakustischen Vorrichtung auf einem Substrat, die dazu eingerichtet ist, akustische Wellen bei einer Betriebsfrequenz in einem akustischen Pfad oder einem aktiven Volumen anzuregen,
- Bilden einer Begrenzungsstruktur in der Form eines Phononischer-Kristall-Materials, um eine Propagation von akustischen Wellen mit der Betriebsfrequenz zu verhindern, um die akustischen Wellen auf den akustischen Pfad oder das aktive Volumen zu begrenzen, wobei das Bilden der Begrenzungs-

struktur aus Phononischer-Kristall-Material Folgendes umfasst:

- a) Aufbringen einer ersten Schicht von sich wiederholenden Einheiten aus einem ersten festen Material gemäß einem periodischen Gitter auf das Substrat oder eine beliebige andere Vorrichtungsstruktur, die bereits auf dem Substrat gebildet ist,
- b) Füllen von Spalten zwischen den sich wiederholenden Einheiten mit einem flüssigen Material,
- c) Transformieren des flüssigen Materials in ein festes zweites Material durch Härten oder Verfestigen des flüssigen Materials, um sich wiederholende Einheiten des zweiten Materials zu erzielen,
- d) optional Planarisieren und Strukturieren der Schicht, um eine feste und ebene Schicht aus sich wiederholenden Einheiten aus alternierendem ersten und zweiten Material zu erhalten.

9. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei der Schritt a) Folgendes umfasst:

- a1) Aufbringen einer kontinuierlichen Schicht des ersten Materials,
- a2) Strukturieren der kontinuierlichen Schicht, um ein periodisches Gitter aus sich wiederholenden Einheiten aus dem ersten festen Material zu bewirken, wobei der Schritt b) Folgendes umfasst:
- b1) Füllen eines flüssigen Harzmaterials auf das Gitter, bis wenigstens alle Spalte zwischen den sich wiederholenden Einheiten gefüllt sind, wobei der Schritt c) Aushärten des Harzes durch Anwenden von Wärme auf die Anordnung umfasst, wobei der Schritt c) optional ein CMP-Verfahren umfasst.

10. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, das nach dem Planarisieren Folgendes umfasst:

Wiederholen der Schritte a) bis d), um eine dreidimensionale periodische Struktur aus dem phononischen Kristall zu erzielen.

11. Verfahren zum Herstellen der mikroakustischen Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, das die folgenden Schritte umfasst:

- Bilden einer piezoelektrischen Schicht und einer Elektrodenstruktur der mikroakustischen Vorrichtung auf einem Substrat, die dazu eingerichtet ist, akustische Wellen bei einer Betriebsfrequenz in einem akustischen Pfad oder einem aktiven Volumen anzuregen,
- Bilden einer Begrenzungsstruktur in der Form eines Phononischer-Kristall-Materials, um eine Propagation von akustischen Wellen mit der Betriebsfrequenz zu verhindern, um die akustischen Wellen auf den akustischen Pfad oder das aktive Volumen zu begrenzen, durch Drucken einer dreidimensionalen periodischen Struktur mit einer 3D-Druck-Technik, wobei die Struktur, sich wiederholende Einheiten aus einem ersten festen Material umfasst, die in einem zweiten festen Material eingebettet sind.

12. Verfahren zum Herstellen der mikroakustischen Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, das die folgenden Schritte umfasst:

- Bilden einer piezoelektrischen Schicht und einer Elektrodenstruktur der mikroakustischen Vorrichtung auf einem Substrat, die dazu eingerichtet ist, akustische Wellen mit einer Betriebsfrequenz in einem akustischen Pfad oder einem aktiven Volumen anzuregen,
- Bilden einer Begrenzungsstruktur in der Form eines Phononischer-Kristall-Materials, um eine Propagation von akustischen Wellen mit der Betriebsfrequenz zu verhindern, um die akustischen Wellen auf den akustischen Pfad oder das aktive Volumen zu begrenzen, wobei das Bilden der Begrenzungsstruktur Folgendes umfasst:
- Abscheiden von monodispersen sphärischen Mikroperlen auf dem Substrat in einem Selbstassemblierungsprozess,
- Füllen der Spalte zwischen den Mikroperlen mit einem flüssigen Polymermaterial,
- Härten des flüssigen Polymers, um es in ein festes zweites Material zu transformieren, wodurch eine Schicht aus einem phononischen 2D-Kristall erhalten wird,
- optional Planarisieren und Strukturieren der Schicht, um eine feste und ebene Schicht aus sich wiederholenden Einheiten aus alternierendem ersten und zweiten Material zu erhalten,
- optional Wiederholen der obigen Schritte, um wenigstens eine weitere Schicht aus einem phononischen 2D-Kristall zu bilden, wobei die sich wiederholenden Einheiten in der zweiten Schicht und optional weiteren Schichten jeweils zu der Schicht darunter versetzt sind.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

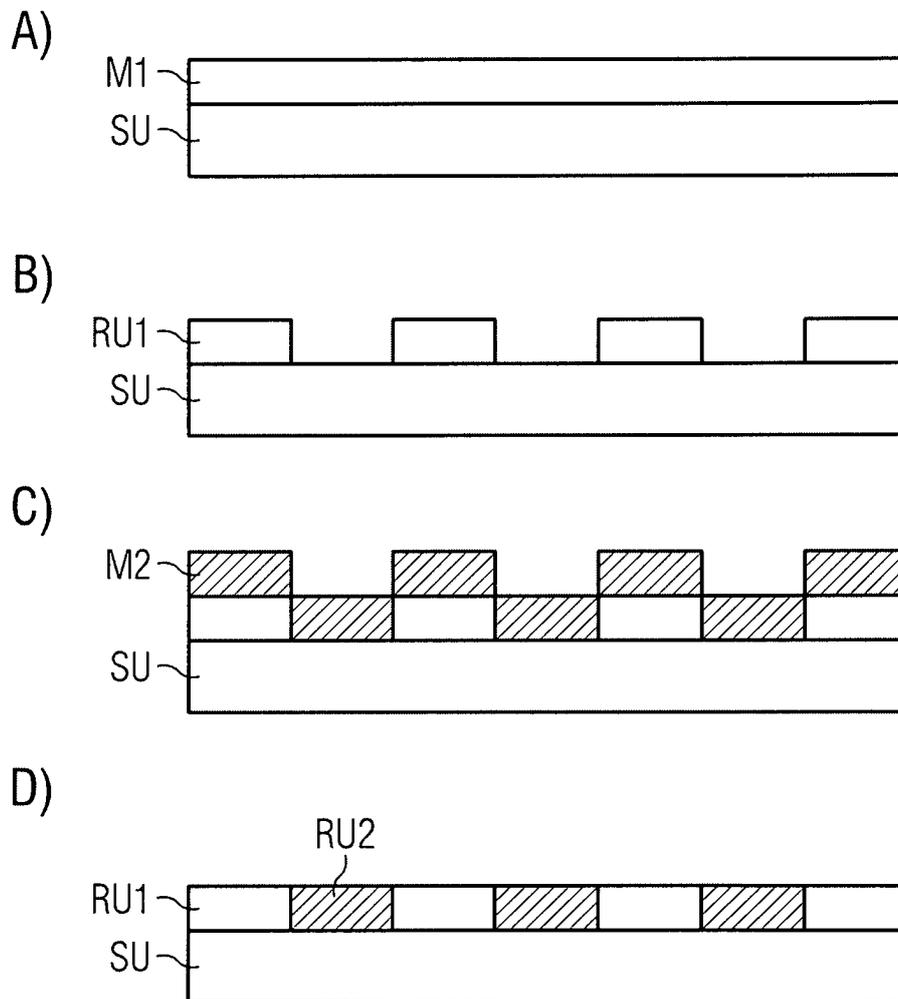
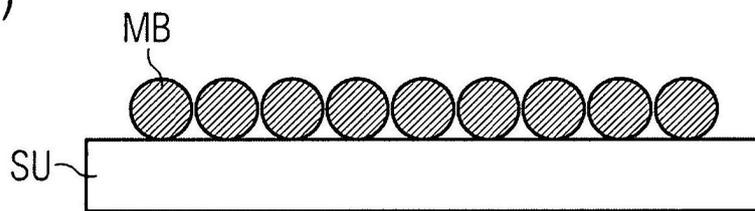


FIG 2

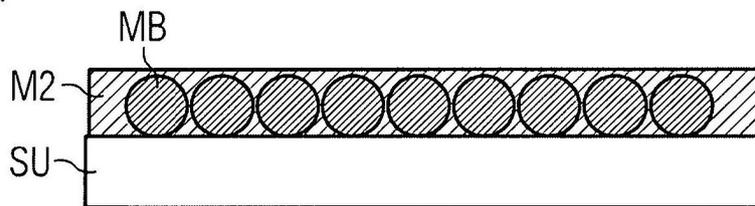
A)



B)



C)



D)

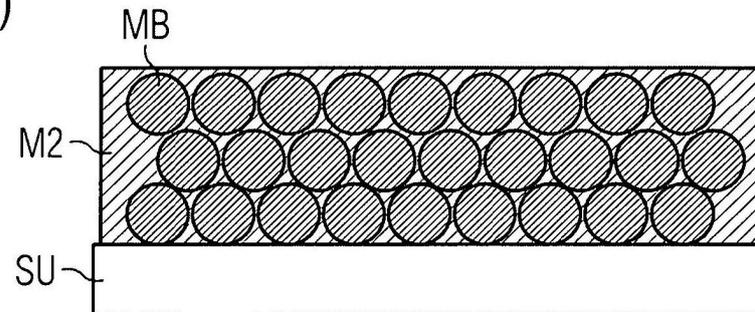
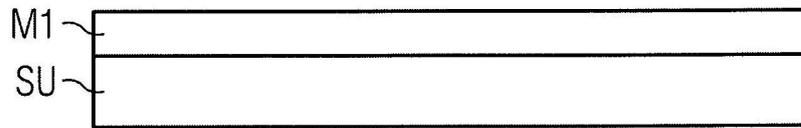
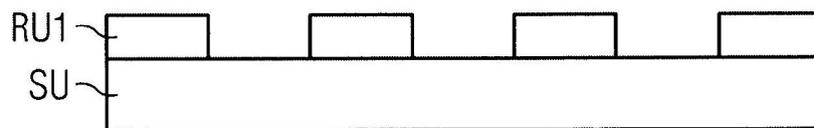


FIG 3

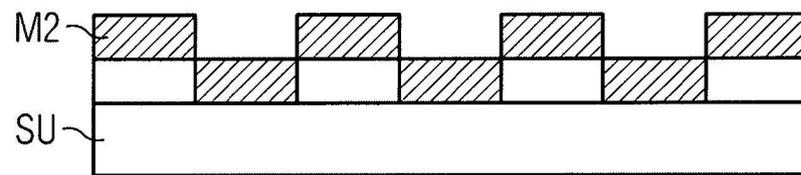
A)



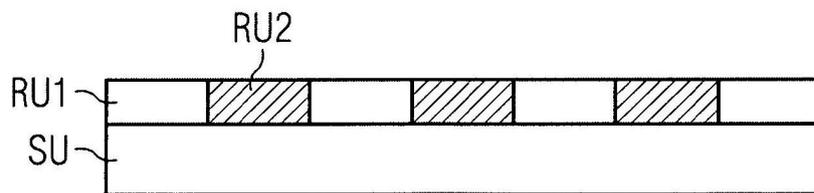
B)



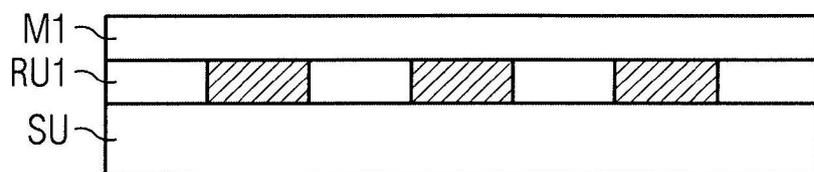
C)



D)



E)



F)

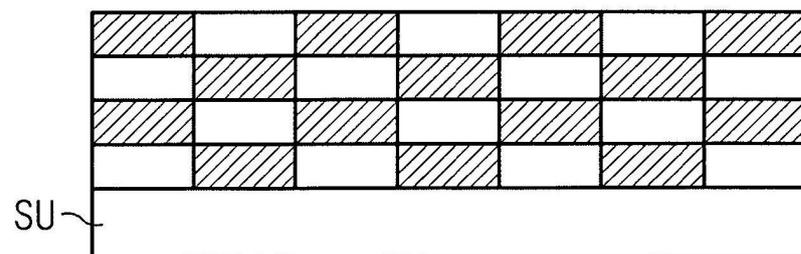
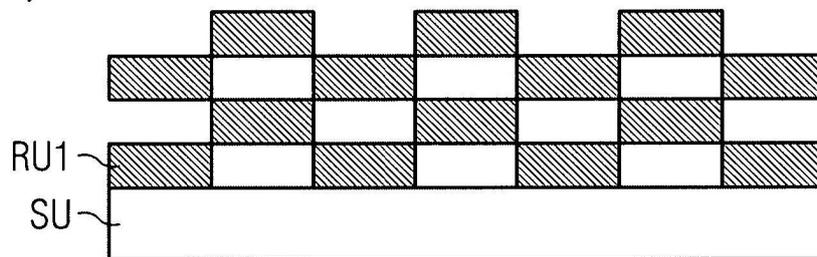


FIG 4

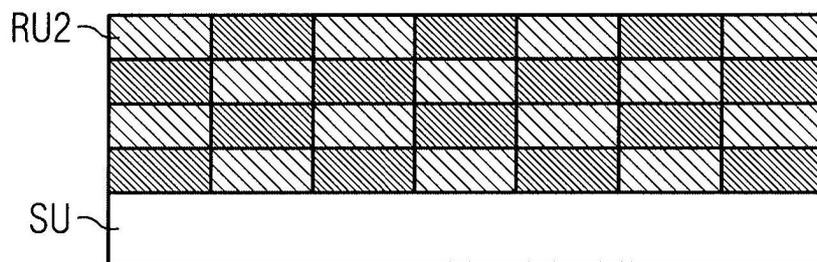
A)



B)



C)



D)

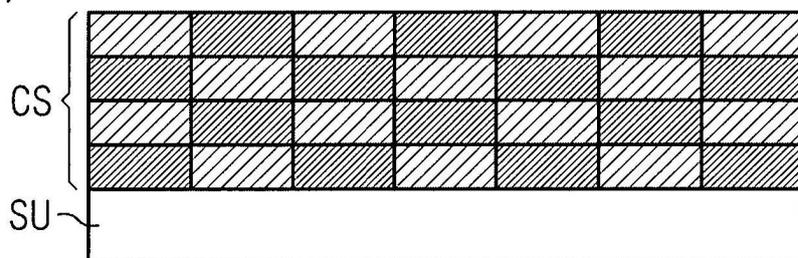


FIG 5

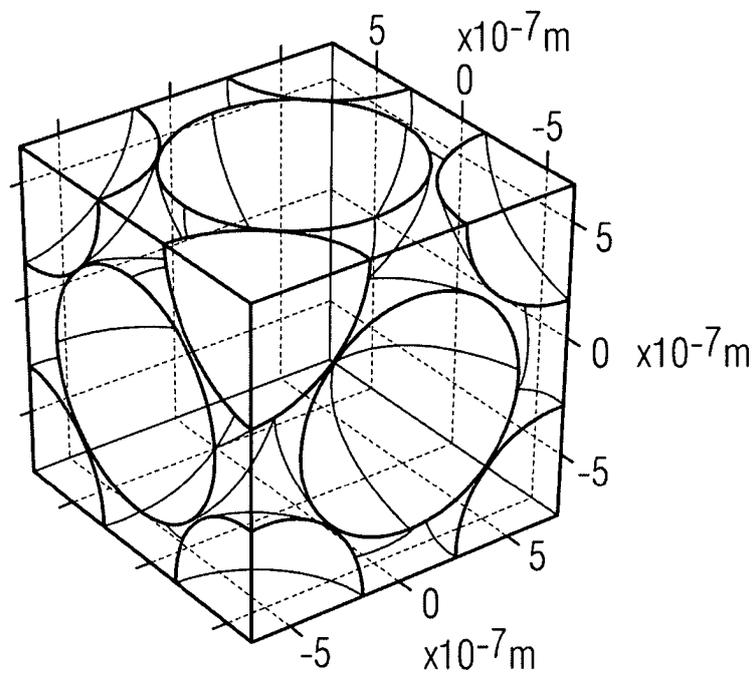


FIG 6

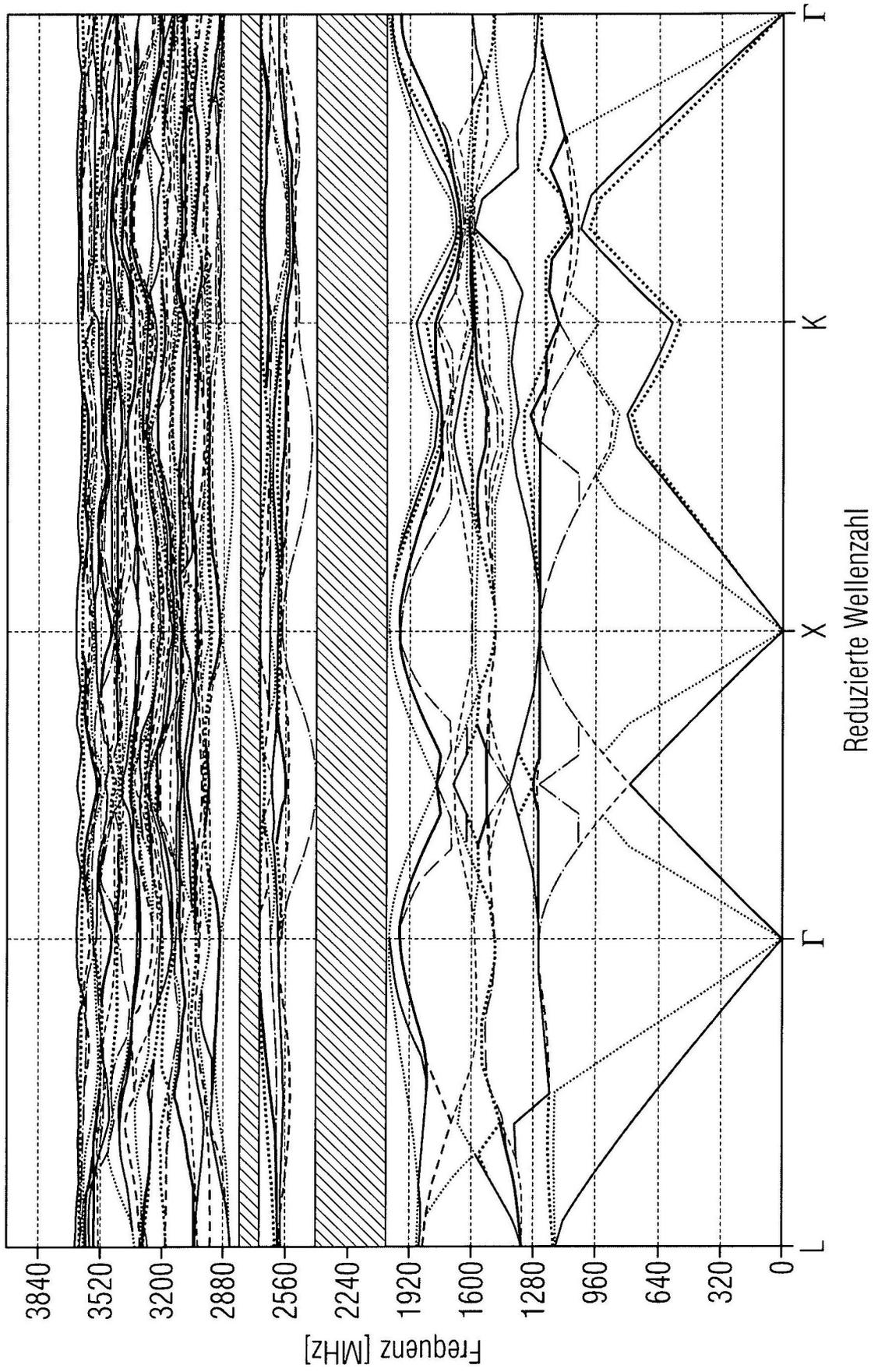


FIG 7

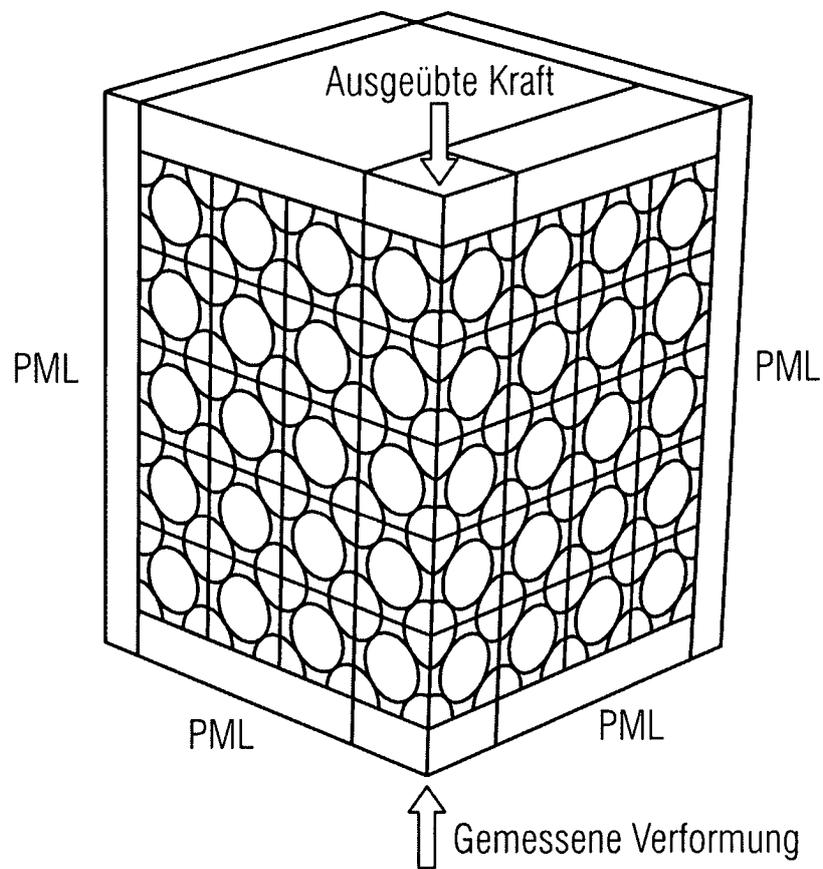


FIG 8

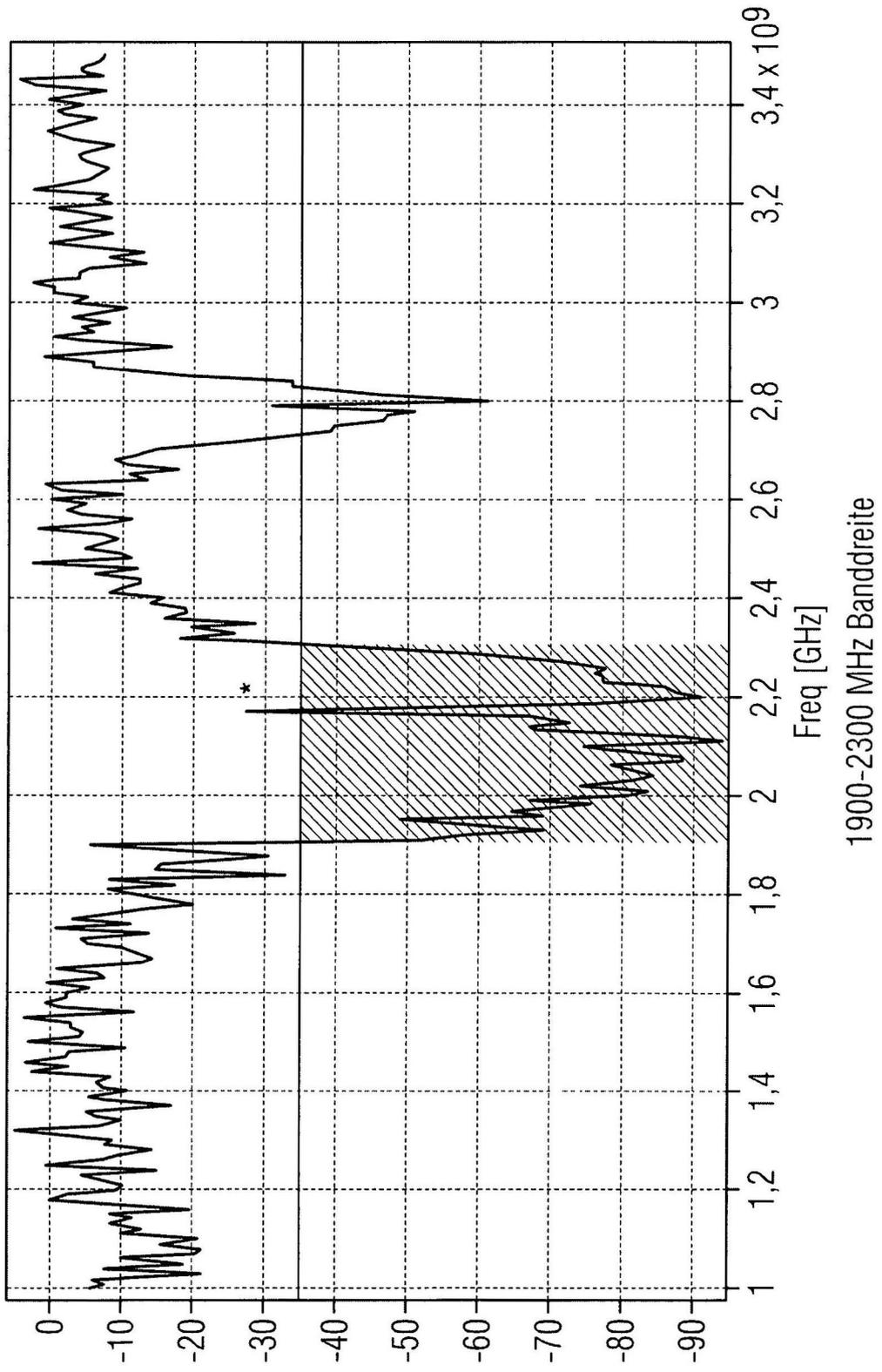


FIG 9

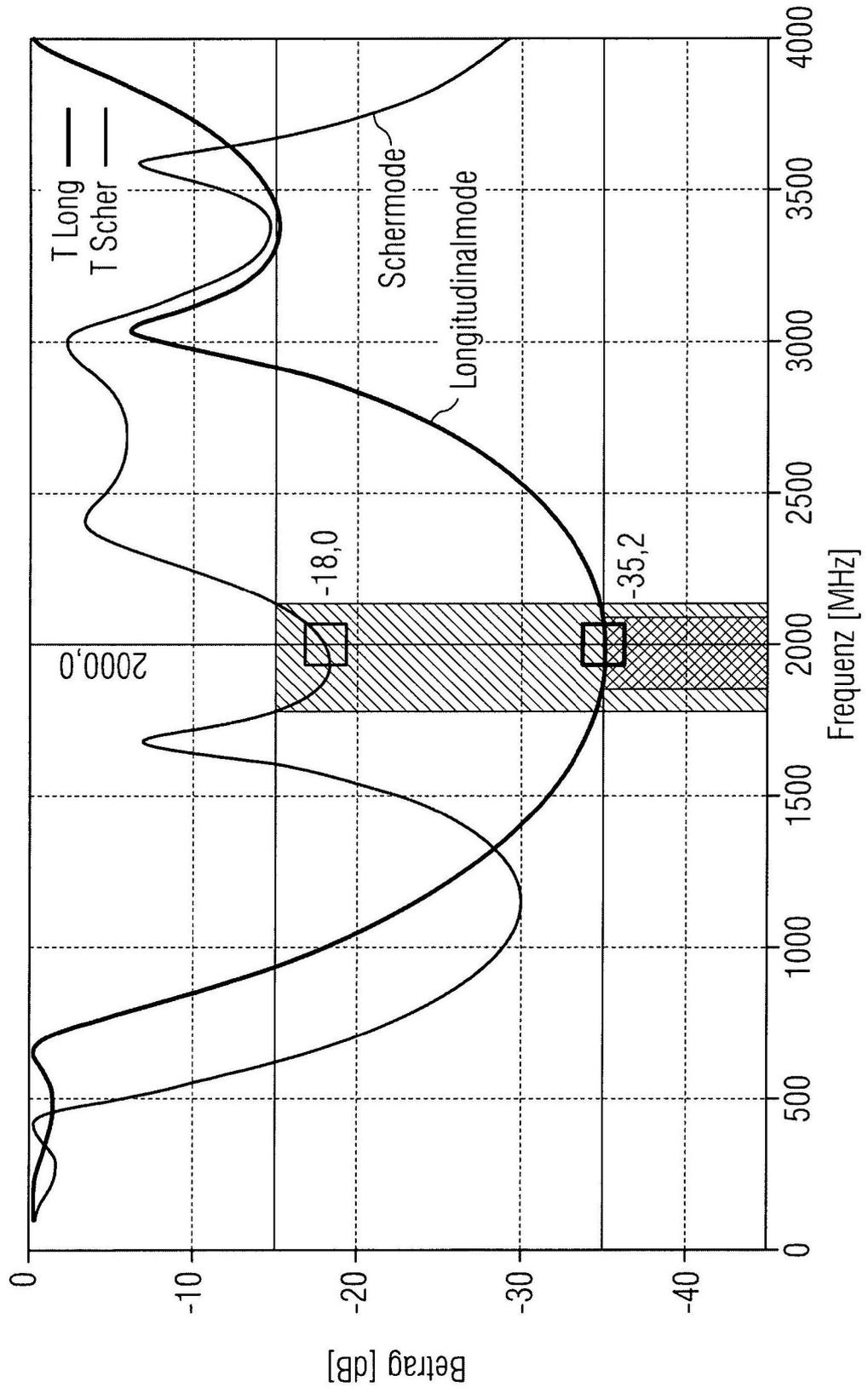


FIG 10

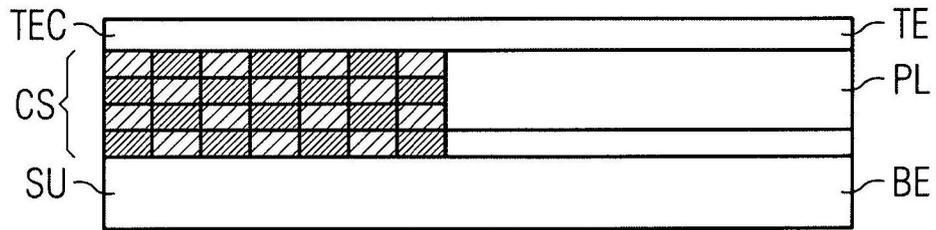


FIG 11

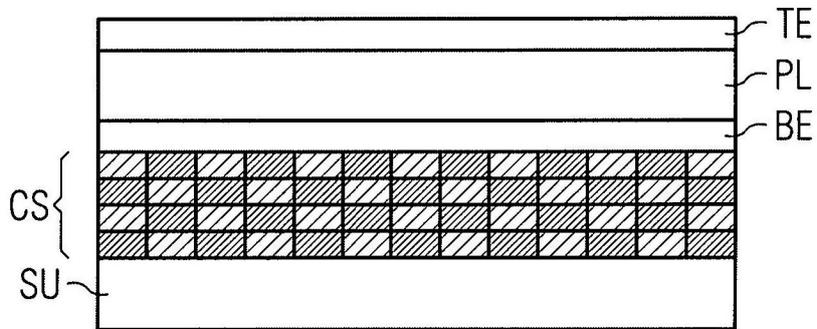


FIG 12

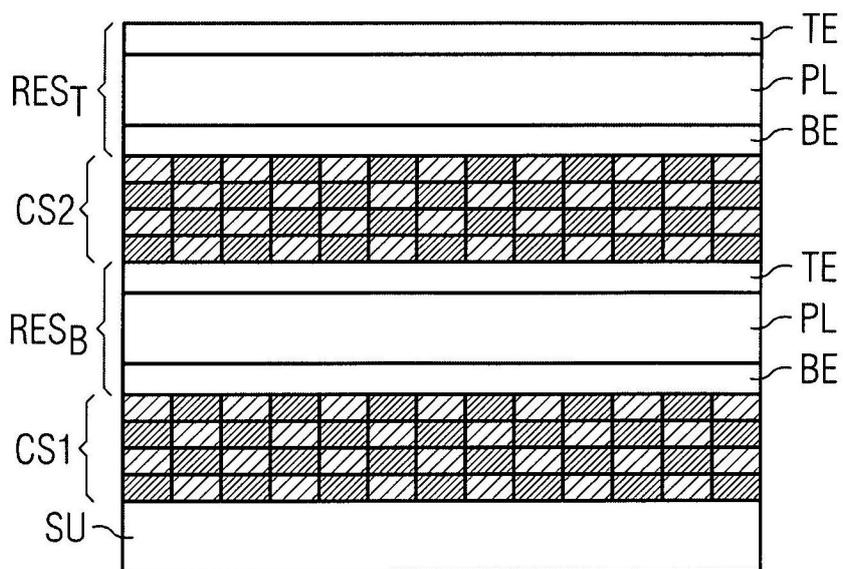


FIG 13

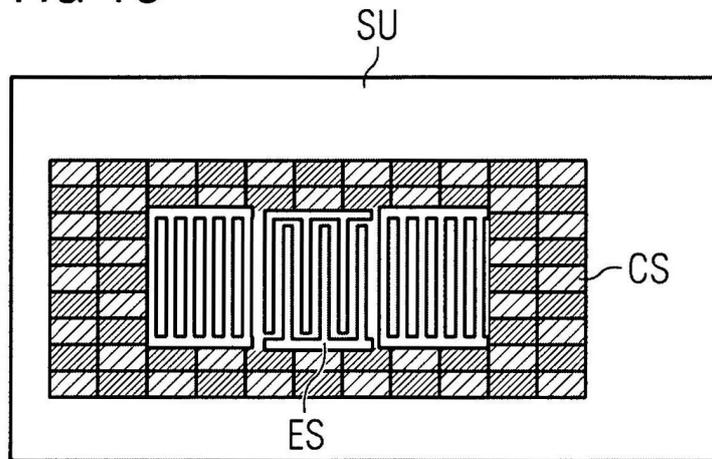


FIG 14

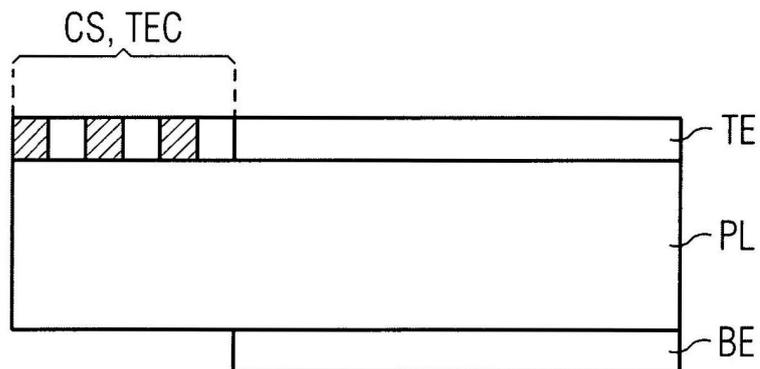


FIG 15

