



(10) **DE 10 2015 108 517 A1** 2015.12.03

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 108 517.8**

(22) Anmeldetag: **29.05.2015**

(43) Offenlegungstag: **03.12.2015**

(51) Int Cl.: **H03H 9/17 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:

14/290,777 **29.05.2014** **US**

(71) Anmelder:

**Avago Technologies General IP (Singapore) Pte.
Ltd., Singapore, SG**

(74) Vertreter:

**Dilg Haeusler Schindelmann
Patentanwalts-gesellschaft mbH, 80636 München,
DE**

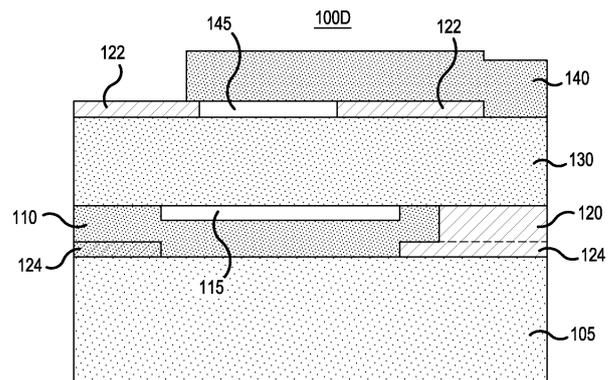
(72) Erfinder:

**Burak, Dariusz, Fort Collins, Col., US; Nikkel, Phil,
Loveland, Col., US**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Kapazitiv gekoppelte Resonatoreinrichtung mit Luftzwischenraum, der Elektrode und piezoelektrische Schicht trennt**

(57) Zusammenfassung: Ein akustischer Volumenwellen (BAW)-Resonator umfasst eine untere Elektrode, die auf einem Substrat angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht, die über der unteren Elektrode angeordnet ist, und eine obere Elektrode, die über der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist. Der BAW-Resonator umfasst ferner zumindest einen Luftzwischenraum und eine zugehörige Tragestruktur, wobei der zumindest eine Luftzwischenraum zumindest eine von der unteren Elektrode und der oberen Elektrode, respektive, von der piezoelektrischen Schicht trennt.



Beschreibung

HINTERGRUND

[0001] Akustische Resonatoren können verwendet werden, um Signalverarbeitungsfunktionen in verschiedenen elektronischen Anwendungen zu implementieren. Beispielsweise verwenden einige Mobiltelefone und andere Kommunikationsgeräte akustische Resonatoren, um Frequenzfilter für übertragene und/oder empfangene Signale zu implementieren. Gemäß verschiedener Anwendungen können mehrere verschiedene Arten von akustischen Resonatoren verwendet werden, wobei Beispiele die folgenden umfassen: akustische Volumenwellen(BAW, bulk acoustic wave)-Resonatoren, wie etwa akustische Dünnschichtvolumenresonatoren (FBARs, film bulk acoustic resonators), gekoppelte Resonatorfilter (CRFs, coupled resonator filters), gestapelte akustische Volumenresonatoren (SBARs, stacked bulk acoustic resonators), akustische Doppelvolumenresonatoren (DBARs, double bulk acoustic resonators), lateral gekoppelte Resonatorfilter (LCRFs, laterally coupled resonator filters) und festmontierte Resonatoren (SMRs, solidly mounted resonators). Ein FBAR beispielsweise umfasst eine piezoelektrische Schicht zwischen einer unteren (ersten) Elektrode und einer oberen (zweiten) Elektrode über einer Vertiefung. BAW-Resonatoren können in einer breiten Vielfalt von elektronischen Anwendungen und Geräten verwendet werden, wie etwa Mobiltelefonen, Mikrocomputer (PDAs, personal digital assistance), elektronische Spieleinrichtungen, Laptop-Computern und anderen tragbaren Kommunikationsgeräten. Beispielsweise können FBARs, die auf Frequenzen nahe bei ihrer fundamentalen Resonanzfrequenzen arbeiten, als eine Schlüsselkomponente von Radiofrequenz(RF)-Filtern und -Duplexern in mobilen Geräten verwendet werden.

[0002] Ein akustischer Resonator umfasst typischerweise eine Schicht eines piezoelektrischen Materials, die auf einer oberen Oberfläche einer unteren Elektrode aufgebracht ist, und eine obere flache (oder ebene (plate)) Elektrode, die auf einer oberen Oberfläche des piezoelektrischen Materials aufgebracht ist, was eine Struktur (oder einen Aufbau) ergibt, die (oder der) als ein akustischer Stapel bezeichnet wird. Wenn ein elektrisches Eingangssignal zwischen den Elektroden beaufschlagt wird, bewirkt der reziproke oder inverse piezoelektrische Effekt, dass der akustische Stapel sich in Abhängigkeit von der Polarisierung des piezoelektrischen Materials mechanisch ausdehnt oder zusammenzieht. Wenn das elektrische Eingangssignal sich mit der Zeit verändert, erzeugen die Ausdehnung und Zusammenziehung des akustischen Stapels akustische Wellen, die sich durch den akustischen Resonator in verschiedenen Richtungen ausbreiten und die über den piezoelektrischen Effekt in elektrische Ausgangssignale umgewandelt wer-

den. Einige der akustischen Wellen erzielen eine Resonanz über dem akustischen Stapel, wobei die Resonanzfrequenz durch Faktoren bestimmt ist, wie etwa die Materialien, Abmessungen und Betriebsbedingungen des akustischen Stapels. Diese und andere mechanische Eigenschaften des akustischen Resonators bestimmen seine Frequenzantwort.

[0003] Allgemein würde ein herkömmlicher FBAR, der dazu ausgelegt ist, beispielsweise auf näherungsweise 3,6 GHz, zu arbeiten, eine näherungsweise 1800Å dicke obere und untere Elektrode, die aus Wolfram (W) ausgebildet ist, und eine näherungsweise 2600Å dicke piezoelektrische Schicht aus Aluminiumnitrid (AlN) aufweisen. Die Dicke der piezoelektrischen Schicht ist in erster Linie durch die gewünschte Betriebsfrequenz bestimmt, jedoch auch durch den gewünschten elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 . Innerhalb anwendbarer Grenzwerte ist der elektromechanische Kopplungskoeffizient Kt^2 proportional zu der Dicke der piezoelektrischen Schicht und umgekehrt proportional zu den Dicken der unteren und der oberen Elektrode. Genauer gesagt, ist der elektromechanische Kopplungskoeffizient Kt^2 proportional zu dem Anteil der akustischen Energie, die in der piezoelektrischen Schicht gespeichert ist, und umgekehrt proportional zu dem Anteil der akustischen Energie, die in den Elektroden gespeichert ist. Dieser Entwurf, der einen vernünftigen elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 (z.B. näherungsweise 5,5%) erfordert, weist eine Anzahl von Problemen auf, wenn er bei höheren Frequenzen (z.B. größer als oder etwa 3,5 GHz) arbeitet. Beispielsweise wäre ein derartiger FBAR empfindlich auf Ausfälle durch elektrostatische Entladung (ESD, electrostatic discharge) aufgrund von hohen elektrischen Feldern, Ausfällen bei niedriger Leistung aufgrund der kleinen Fläche, einen großen Umfangs-zu-Flächenverlust aufgrund der kleinen Gerätefläche, und einen großen Serienwiderstand R_s aufgrund des Beiseins von relativ dünnen metallischen oberen und unteren Elektroden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0004] Die veranschaulichenden Ausführungsformen werden am besten aus der nachfolgenden ausführlichen Beschreibung verstanden, wenn diese zusammen mit den beigefügten Zeichnungen der Figuren gelesen wird. Es wird betont, dass die vielfältigen Merkmale nicht notwendigerweise maßstabsgetreu gezeichnet sind. Tatsächlich können die Abmessungen zur Klarheit der Besprechung willkürlich vergrößert oder verkleinert werden. Wo immer dies anwendbar und praktisch ist, bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente.

[0005] Fig. 1A ist eine Aufsicht von oben eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0006] Fig. 1B ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0007] Fig. 1C ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0008] Fig. 1D ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0009] Fig. 2A ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0010] Fig. 2B ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0011] Fig. 2C ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0012] Fig. 3A ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0013] Fig. 3B ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0014] Fig. 3C ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0015] Fig. 4A ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0016] Fig. 4B ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0017] Fig. 4C ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0018] Fig. 5A ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0019] Fig. 5B ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0020] Fig. 5C ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0021] Fig. 6A ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0022] Fig. 6B ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0023] Fig. 6C ist eine Schnittzeichnung eines akustischen Resonators gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0024] Fig. 7A ist eine Ansicht von oben eines Luftzwischenraum-Bereichs, der eine Tragesäule aufweist, gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0025] Fig. 7B ist eine Ansicht von oben eines Luftzwischenraumbereichs, der vier Tragesäulen aufweist, gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0026] Fig. 7C ist eine Ansicht von oben eines Luftzwischenraumbereichs, der fünf Tragesäulen aufweist, gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

[0027] Fig. 7D ist eine Ansicht von oben eines Luftzwischenraumbereichs, der neun Tragesäulen aufweist, gemäß einer repräsentativen Ausführungsform.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0028] In der nachfolgenden ausführlichen Beschreibung sind für Zwecke der Erklärung und nicht zur Beschränkung beispielhafte Ausführungsformen dargestellt, die spezifische Einzelheiten offenbaren, um ein gründliches Verständnis der vorliegenden Lehren bereitzustellen. Es wird jedoch für einen Fachmann, der den Vorteil der vorliegenden Offenbarung hat, offensichtlich, dass andere Ausführungsformen gemäß der vorliegenden Lehren, die von den hierin offenbarten spezifischen Einzelheiten abweichen, innerhalb des Schutzzumfangs der beigefügten Patentansprüche bleiben. Des Weiteren können Beschreibungen von wohl bekannten Vorrichtungen und Verfahren ausgelassen werden, um die Beschreibung der beispielhaften Ausführungsformen nicht zu verschleiern. Derartige Verfahren und Vorrichtungen sind offensichtlich innerhalb des Umfangs der vorliegenden Lehren.

[0029] Die hierin verwendete Terminologie ist lediglich für Zwecke des Beschreibens von bestimmten Ausführungsformen, und ist nicht dazu gedacht, beschränkend zu sein. Die definierten Ausdrücke sind zusätzlich zu der technischen, wissenschaftlichen oder gewöhnlichen Bedeutung der definierten Ausdrücke, so wie diese in dem relevanten Zusammen-

hang gemeinhin verstanden werden und akzeptiert sind.

[0030] Die Ausdrücke „ein“, „eine“ und „der/die/das“ umfassen sowohl einzelne als auch mehrere Objektverweise, außer wenn der Zusammenhang dies anderweitig vorgibt. So umfasst beispielsweise „eine Einrichtung“ eine Einrichtung und mehrere Einrichtungen. Die Ausdrücke „wesentlich“ oder „im Wesentlichen“ bedeuten, innerhalb von akzeptierbaren Begrenzungen oder einem Ausmaß zu sein. Der Ausdruck „näherungsweise“ bedeutet, für einen Fachmann innerhalb einer akzeptierbaren Begrenzung oder eines Ausmaßes zu sein. Relative Ausdrücke, wie etwa „über“, „unter“, „oben“, „unten“, „oberer“ und „unterer“ können verwendet werden, um die Beziehungen der verschiedenen Elemente zueinander zu beschreiben, so wie das in den beigefügten Zeichnungen veranschaulicht ist. Diese relativen Ausdrücke sind dazu gedacht, zusätzlich zu der in den Zeichnungen dargestellten Orientierung verschiedene Orientierungen der Einrichtung und/oder der Elemente zu umfassen. Wenn beispielsweise die Einrichtung im Hinblick auf die Ansicht in den Zeichnungen invertiert (oder umgedreht) wäre, dann wäre ein Element, das als „über“ einem anderen Element beschrieben ist, beispielsweise nun unterhalb dieses Elements. Wo ausgesagt ist, dass eine erste Einrichtung mit einer zweiten Einrichtung verbunden oder gekoppelt ist, umfasst dies Beispiele, wo eine oder mehrere zwischengeschaltete Einrichtungen verwendet werden können, um die zwei Einrichtungen miteinander zu verbinden. Im Gegensatz dazu, wo ausgesagt ist, dass eine erste Einrichtung mit einer zweiten Einrichtung direkt verbunden oder direkt gekoppelt ist, umfasst dies Beispiele, wo die zwei Einrichtungen ohne irgendwelche zwischengeschalteten Einrichtungen miteinander verbunden sind, mit Ausnahme von elektrischen Verbindungen (z.B. Drähten, Klebematerialien, usw.).

[0031] Die vorliegenden Lehren beziehen sich allgemein auf akustische Resonatoren, wie beispielsweise etwa akustische Schichtvolumenwellenresonatoren (FBARs, film bulk acoustic resonators) oder festmontierte Resonatoren (SMRs, solidly mounted resonators). Zur Vereinfachung der Erläuterung sind mehrere Ausführungsformen im Zusammenhang mit FBAR-Technologien beschrieben; jedoch können die beschriebenen Konzepte zur Verwendung in anderen Arten von akustischen Resonatoren angepasst werden. Bestimmte Einzelheiten von akustischen Resonatoren, einschließlich Materialien und Herstellungsverfahren, können in einer oder mehreren der folgenden, gemeinsam besessenen US-Patente und US-Patentanmeldungen gefunden werden: US-Patent Nr. 6,107,721 an Lakin; US-Patente Nrn. 5,587, 620, 5,873, 153, 6,507,983, 6,384,697, 7,275,292 und 7,629,865 an Ruby et al.; US-Patent Nr. 7,280,007 an Feng et al.; US-Patentanmeldungsoffenlegungs-

schrift Nr. 2007/0205850 an Jamneala et al.; US-Patent Nr. 7,388,454 an Ruby et al.; US-Patentanmeldung Nr. 13/658,024 an Nikkel et al.; US-Patentanmeldung Nr. 13/955,774 an Burak et al.; US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift Nrn. 2014/0118088 und 2014/0118091 an Burak et al.; US-Patentanmeldung Nr. 13/654,718 an Burak et al.; US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift Nr. 2008/0258842 an Ruby et al.; und US-Patent Nr. 6,548,943 an Kaitila et al. Die Offenbarungen dieser Patente und Patentanmeldungen werden hierin durch Verweis in ihren Gesamtheiten spezifisch aufgenommen. Es wird betont, dass die in diesen Patenten und Patentanmeldungen beschriebenen Komponenten, Materialien und Herstellungsverfahren repräsentativ sind, und dass andere Herstellungsverfahren und Materialien innerhalb des Überblicks (oder Kenntnisbereichs) eines Fachmanns in Betracht gezogen werden.

[0032] Verschiedene elektronische Einrichtungen arbeiten auf höheren Frequenzen, was die Aufnahme von akustischen Resonatoren (z.B. als Filter) mit höheren Resonanzfrequenzen (z.B. größer als oder gleich wie etwa 3,5 GHz) erfordert. Verschiedene Ausführungsformen der hierin beschriebenen akustischen Resonatoren richten sich auf Probleme, die mit hohen Resonanzfrequenzen zusammenhängen und von denen oben einige angesprochen worden sind, durch das Einfügen von einer oder mehreren relativ dünnen Luftzwischenräumen zwischen einer oder beiden Elektroden und der piezoelektrischen Schicht, respektive, wodurch eine elektrische Anregung von akustischer Ausbreitung entkoppelt wird. Derartige akustische Resonatoren können als kapazitiv gekoppelte Resonatoren (CCRs, capacitive coupled resonators) oder Hybrid-CCRs bezeichnet werden.

[0033] Ein herkömmlicher FBAR hat allgemein eine piezoelektrische Schicht und zwei „dicke“ Elektroden auf jeder Seite, um einen ausreichend niedrigen Serienwiderstand R_s bereitzustellen. Wenn jedoch die Frequenz, für die diese Resonatoren entworfen sind, hoch ist (beispielsweise oberhalb von 3, 5 GHz), können die Elektroden unerlaubt (oder unrealisierbar) dünn werden und der durch diese dünnen Elektroden bewirkte Serienwiderstand kann unerlaubt groß werden. Weil ein CCR Luftzwischenräume zwischen der piezoelektrischen Schicht und den Elektroden aufweist, können die Elektroden willkürliche Dicken aufweisen (z.B. dicker als herkömmliche Elektroden in Resonatoren, die für hohe Betriebsfrequenzen entworfen sind), ohne den Serienwiderstand nachteilig zu beeinflussen. Ein Hybrid-CCR hat auf beiden Seiten der piezoelektrischen Schicht beispielsweise „dünne“ Metallschichten, was bedeutet, dass diese Metallschichten alleine zu hohe Serienwiderstände R_s aufweisen, um als alleinstehende Elektroden verwendet zu werden, jedoch dick genug sind, um den elektromechanischen Kopplungskoeffizienten K_t^2 und die partielle Frequenztrennung

(FFS, Fractional Frequency Separation) zu verbessern, so wie das unten besprochen wird. Um in einem Hybrid-CCR einen geeigneten Serienwiderstand R_s aufzunehmen, werden dickere Elektroden (von willkürlicher Dicke) bereitgestellt, die von den dünnen Metallschichten durch Luftzwischenräume getrennt sind. Als eine praktische Tatsache kann eine dünne Elektrode beispielsweise weniger als etwa 1000Å sein. Die trennenden Luftzwischenräume beseitigen praktisch den Einfluss der Elektrodendicke auf den Serienwiderstand R_s . Auch kann die piezoelektrische Schicht durch kapazitive Durch-die-Luft-Kopplung (über die Luftzwischenräume) angeregt werden. Andere Vorteile umfassen das Bereitstellen von näherungsweise der doppelten Gerätefläche im Vergleich zu regulären BAW-Resonatoren (was zu geringeren Umfang-zu-Fläche-Verlusten führt) und eine Zunahme des Qualitätsfaktors Q (Q -Faktor) über (oder in) dem Durchlassband eines akustischen Resonatorfilters aufgrund einer natürlichen Anpassung der Abschneidefrequenzen in dem aktiven Bereich und dem Feldbereich, was analog zu einem Krageneffekt (oder Manschetteneffekt (collar effect)) ist, ohne dass tatsächlich ein Kragen (oder eine Manschette (collar)) ausgebildet werden muss. Beispiele von Kragen und verschiedenen Vorteilen davon sind in der US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift Nr. 2014/0118091 (veröffentlicht am 1. Mai 2014) an Burak et al., in der US-Patentanmeldung Nr. 13/781,491 (eingereicht am 28. Februar 2013) an Burak et al. und in der US-Patentanmeldungs-Nr. 13/955,774 (eingereicht am 31. Juli 2013) an Burak et al. dargelegt, die hierin in ihren Gesamtheiten durch Verweis aufgenommen werden.

[0034] Insbesondere neigen die Luftzwischenräume dazu, den elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 der piezoelektrischen Schicht zu verringern. Folglich kann gemäß verschiedener Ausführungsformen die piezoelektrische Schicht mit einem oder mehreren Seltenerd-Elementen dotiert werden (z.B. bis zu etwa 10 Atom-% Scandium), um den elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 zu erhöhen, so wie das unten besprochen wird. Die Dicke der piezoelektrischen Schicht kann vergrößert werden, was zu größeren, elektrisch robusteren, akustischen Resonator-Einrichtungen führt.

[0035] In repräsentativen Ausführungsformen umfasst ein akustischer Volumenwellen(BAW, bulk acoustic wave)-Resonator eine untere Elektrode, die auf einem Substrat angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht, die über der unteren Elektrode angeordnet ist, und eine obere Elektrode, die über der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist. Der BAW-Resonator umfasst ferner mindestens einen Luftzwischenraum (oder Luftspalt (air-gap)) und eine zugehörige (oder entsprechende) Tragestruktur (support structure), wobei der zumindest eine Luftzwischenraum zumindest eine von der unteren Elektro-

de und der oberen Elektrode, respektive, von der piezoelektrischen Schicht trennt. Der zumindest eine Luftzwischenraum kann eine einzelne, im Wesentlichen gleichförmige Höhe aufweisen, oder er kann gestuft sein, so dass er mehrere Höhen umfasst. Wenn er mehrere Höhen aufweist, kann der zumindest eine Luftzwischenraum in einem Mittenbereich dünner sein und an einem Randbereich dicker (oder höher) sein.

[0036] Fig. 1A ist eine Ansicht von oben auf einen akustischen Resonator **100A** gemäß einer repräsentativen Ausführungsform, und die Fig. 1B bis Fig. 1D sind Schnittzeichnungen des akustischen Resonators **100A**, geschnitten entlang einer Linie A-A' gemäß verschiedener Ausführungsformen. Die Schnittzeichnungen entsprechen verschiedenen Variationen des akustischen Resonators **100A**, respektive, als akustische Resonatoren **100B** bis **100D**, die als kapazitiv gekoppelte Resonatoren (CCR, capacitive coupled resonators) bezeichnet werden können. Die akustischen Resonatoren **100B** bis **100D** haben viele gleiche Merkmale, so dass in einer Bemühung, Redundanz zu vermeiden, eine wiederholte Beschreibung dieser Merkmale ausgelassen werden kann.

[0037] Mit Verweis auf Fig. 1A umfasst der akustische Resonator **100A** eine obere Elektrode **140**, die fünf (5) Seiten aufweist, mit einer Verbindungsseite **101**, die dazu ausgebildet ist, eine elektrische Verbindung mit einer Verbindung **102** bereitzustellen. Die Verbindung **102** leitet elektrische Signale zu der oberen Elektrode **140**, um gewünschte akustische Wellen in einer piezoelektrischen Schicht (in Fig. 1A nicht gezeigt) des akustischen Resonators **100A** anzuregen.

[0038] Die fünf Seiten der oberen Elektrode **140** können verschiedene Längen aufweisen, so dass eine apodisierte Pentagon-Form ausgebildet wird. In alternativen Ausführungsformen kann die obere Elektrode **140** eine unterschiedliche Anzahl von Seiten aufweisen. Obwohl dies in den Zeichnungen nicht gezeigt ist, können andere Ausführungsformen von akustischen Resonatoren, wie etwa diejenigen der Fig. 1B bis Fig. 6C ein Design vergleichbar zu demjenigen der Fig. 1A aufweisen, wenn sie von oben betrachtet werden.

[0039] Die Fig. 1B bis Fig. 1D sind Schnittzeichnungen, die akustische Resonatoren veranschaulichen, die Luftzwischenräume aufweisen, gemäß repräsentativen Ausführungsformen. In den in den Fig. 1B bis Fig. 1D (und ebenso in den unten besprochenen, in den Fig. 2A bis Fig. 6C gezeigten Beispielen) sind, zur Vereinfachung der Erklärung, die akustischen Resonatoren jeweils FBARs. Es wird jedoch verstanden, dass andere Arten von akustischen Resonatoren, wie etwa DBARs, CRFs und LCRFs, umfasst sein kön-

nen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0040] Mit Verweis auf **Fig. 1B** umfasst der akustische Resonator **100B** (z.B. ein FBAR) ein Substrat **105**, das eine Vertiefung **108** (z.B. Luftvertiefung) definiert und begrenzt, eine untere (erste) Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** über der Vertiefung **108** angeordnet ist, eine Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die (oder neben der) untere (n) Elektrode **110** auf dem Substrat **105** angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und eine obere (zweite) Elektrode **140**, die über der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist, wobei ein oberer Luftzwischenraum **145** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **140** (die daher als eine angehobene Elektrode bezeichnet werden kann) ausgebildet ist. Zusammengenommen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **140** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **100B**. Des Weiteren definieren überlappende Abschnitte der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130**, des oberen Luftraums **145** und der oberen Elektrode **140** über der Vertiefung **108** einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **100B**. Obwohl dies nicht gezeigt ist, kann auf der Oberseite der oberen Elektrode **140** (und in jeder hierin besprochenen Ausführungsform) eine Passivierungsschicht vorhanden sein, die eine Dicke aufweist, die ausreicht, um alle Schichten des akustischen Stapels von der Umgebung zu isolieren, einschließlich eines Schutzes vor Feuchtigkeit, Korrosionsmitteln, Verunreinigungen, Ablagerungen (oder Fremdkörpern) und dergleichen.

[0041] In der gezeigten Ausführungsform ist der obere Luftzwischenraum **145** ausgebildet, indem auf der piezoelektrischen Schicht **130** ein oberer Tragerahmen **122** aufgebracht ist, wobei der obere Tragerahmen **122** den oberen Luftraum **145** begrenzt. Beispielsweise kann eine obere Trageschicht, z.B. aus nicht-ätzbarem Borsilikatglas (NEBSG, non-etchable borosilicate glass) oder nicht-leitfähigem Siliziumcarbid (SiC) ausgebildet, auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** abgelagert werden, dann gemustert und geätzt werden, um den oberen Tragerahmen **122** mit einer Öffnung, die dem oberen Luftzwischenraum **145** entspricht, bereitzustellen. Der obere Luftzwischenraum **145** kann mit Opfermaterial, wie etwa Phosphorsilikatglas (PSG), gefüllt werden und zusammen mit dem oberen Tragerahmen **122** planarisiert werden, beispielsweise unter Verwendung eines chemisch-mechanischen Polier-(CMP, chemical-mechanical polishing)-Prozess. Die obere Elektrode **140** kann dann abgelagert werden auf der piezoelektrischen Schicht **130** und den planarisierten oberen Oberflächen des oberen Tragerahmens **122** und des Opfermaterials, das nachfolgend

entfernt wird, um den oberen Luftzwischenraum **145** zurückzulassen.

[0042] Es wird angemerkt, dass ein Verweis auf den oberen Luftzwischenraum **145** impliziert, dass dieser mit Luft „gefüllt“ ist. Diese Terminologie ist jedoch nur zum Zweck der Dienlichkeit verwendet und ist nicht dazu gedacht, beschränkt zu sein. Das heißt, es wird verstanden, dass der obere Luftzwischenraum **145** (ebenso wie die anderen hierin bezeichneten „Luftzwischenräume“) ein Vakuum bilden kann, mit einem oder mehreren Gasen verschieden von Luft gefüllt sein kann, oder mit einem Dielektrikum oder einem metallischen Material gefüllt sein kann, um die gewünschte, von der spezifischen Implementierung abhängende, große Diskontinuität der akustischen Impedanz bereitzustellen, ohne von dem Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen. Der obere Luftzwischenraum kann eine Höhe (in der vertikalen Richtung) von beispielsweise weniger als oder gleich wie etwa 500Å aufweisen. Jedoch kann ein dickerer Luftzwischenraum eingebaut werden oder ein Luftzwischenraum mit verschiedenen Höhen, so wie das unten mit Verweis auf die **Fig. 6A** bis **Fig. 6C** besprochen wird.

[0043] Das Substrat **105** kann aus einem Material ausgebildet werden, das mit Halbleiterprozessen kompatibel ist, wie beispielsweise etwa Silizium (Si), Galliumarsenid (GaAs), Indiumphosphid (InP), Glas, Saphir, Aluminium oder dergleichen. Die Vertiefung **108** kann ausgebildet werden durch Ätzen einer Vertiefung in dem Substrat **105** und Füllen der geätzten Vertiefung mit einem Opfermaterial, wie beispielsweise etwa PSG, welches anschließend entfernt wird, um einen Luftraum zurückzulassen. Verschiedene veranschaulichende Herstellungstechniken für einen Luftraum in einem Substrat sind in dem US-Patent Nr. 7,345,410 (18. März 2008) an Grannen et al. beschrieben, das hierin in seiner Gesamtheit durch Verweis aufgenommen wird.

[0044] Die untere Elektrode **110** kann aus einem oder mehreren elektrisch leitfähigen Materialien ausgebildet werden, wie etwa verschiedenen Metallen, die mit Halbleiterprozessen kompatibel sind, einschließlich beispielsweise Wolfram (W), Molybdän (Mo), Iridium (Ir), Aluminium (Al), Platin (Pt), Ruthenium (Ru), Niob (Nb) und/oder Hafnium (Hf). In verschiedenen Konfigurationen kann die untere Elektrode **110** aus zwei oder mehreren Schichten von elektrisch leitfähigen Materialien, die dieselben oder verschieden voneinander sein können, ausgebildet werden. Gleichmaßen kann die obere Elektrode **140** aus elektrisch leitfähigen Materialien ausgebildet werden, wie etwa verschiedenen Metallen, die mit Halbleiterprozessen kompatibel sind, einschließlich beispielsweise W, Mo, Ir, Al, Pt, Ru, Nb und/oder Hf. In verschiedenen Konfigurationen kann die obere Elektrode **140** aus zwei oder mehreren Schichten

von elektrisch leitfähigen Materialien, die dieselben oder verschieden voneinander sein können, ausgebildet werden. Auch können die Konfiguration und/oder das Material oder die Materialien, das/die die obere Elektrode **140** ausbilden, dieselben oder verschieden sein von der Konfiguration und/oder dem Material oder den Materialien, die die untere Elektrode **110** ausbilden.

[0045] Die piezoelektrische Schicht **130** kann aus irgendeinem piezoelektrischen Material ausgebildet sein, das mit Halbleiterprozessen kompatibel ist, wie beispielsweise etwa Aluminiumnitrid (AlN), Zinkoxid (ZnO) oder Zirkonattitanat (PZT). Selbstverständlich können andere Materialien in die obigen und anderen Merkmale des akustischen Resonators **100B** eingebaut werden (ebenso wie in den anderen hierin beschriebenen akustischen Resonatoren) ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen. Auch kann in verschiedenen Ausführungsformen die piezoelektrische Schicht **130** mit zumindest einem Seltenerd-Element „dotiert“ werden, wie etwa Scandium (Sc), Yttrium (Y), Lanthan (La) oder Erbium (Er), beispielsweise, um den piezoelektrischen Kopplungskoeffizienten e_{33} in der piezoelektrischen Schicht **130** zu erhöhen, wodurch zumindest ein Teil der durch den oberen Luftzwischenraum **145** verursachten Verschlechterung des elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 des akustischen Resonators ausgeglichen wird. Beispiele des Dotierens von piezoelektrischen Schichten mit einem oder mehreren Seltenerd-Elementen zum Verbessern des elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 sind bereitgestellt durch die US-Patentanmeldung Nr. 13/662,425 (eingereicht am 27. Oktober 2012) an Bradley et al. und die US-Patentanmeldung Nr. 13/662,460 (eingereicht am 27. Oktober 2012) an Grannen et al., die hierin in ihren Gesamtheiten durch Verweis aufgenommen werden. Selbstverständlich kann das Dotieren von piezoelektrischen Schichten mit einem oder mehreren Seltenerd-Elementen in irgendeiner der verschiedenen Ausführungsformen angewendet werden, einschließlich der unten mit Verweis auf die **Fig. 1C** bis **Fig. 6C** beschriebenen Ausführungsformen.

[0046] Die Planarisierungsschicht **120** kann beispielsweise aus NEBSG ausgebildet werden. In verschiedenen Ausführungsformen wird die Planarisierungsschicht **120** durch dasselbe Material ausgebildet wie der obere Tragerahmen **122**, um die Effizienz des Herstellungsprozesses zu vergrößern. Dies ist insbesondere der Fall, wenn ein Luftzwischenraum zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet wird, wie der untere Luftzwischenraum **115**, der unten mit Verweis auf die **Fig. 1C** und **Fig. 1D** besprochen wird, weil der untere Luftzwischenraum **115** und die Planarisierungsschicht **120** benachbart sind und in aufeinanderfolgenden Schritten ausgebildet werden können. Die Planarisierungsschicht **120** ist für das Funk-

tionieren des akustischen Resonators **100B** nicht streng erforderlich, jedoch kann ihr Vorhandensein verschiedene Vorteile bewirken. Beispielsweise neigt das Vorhandensein der Planarisierungsschicht **120** dazu, die strukturelle Stabilität des akustischen Resonators **100B** zu verbessern, kann die Qualität des Aufwachsens von nachfolgenden Schichten verbessern, und kann ermöglichen, dass die untere Elektrode **110** ausgebildet wird, ohne dass sich deren Ränder über die Vertiefung **108** hinaus erstrecken. Weitere Beispiele von möglichen Vorteilen der Planarisierung und/oder des Verfahrens zur Herstellung derselben sind dargelegt in der US-Patentanmeldung Nr. 2013/1016534 (veröffentlicht am 2. Mai 2013) an Burak et al. und in der US-Patentanmeldung Nr. 14/225,710 (eingereicht am 26. März 2014) an Nikkel et al., die hierin in ihren Gesamtheiten durch Verweis aufgenommen werden.

[0047] Allgemein hat ein herkömmlicher FBAR, der für hohe Frequenzen, z.B. größer als oder gleich wie näherungsweise 3,5 GHz, entworfen ist, einen relativ niedrigen Q-Faktor, der herrührt von einem hohen Serienwiderstand R_s (aufgrund dünner Elektroden) und einem niedrigen Parallelwiderstand R_p (aufgrund einer dünnen piezoelektrischen Schicht, die zu einer kleinen Fläche und einem großen Umfang-zu-Fläche-Strahlungsverlust führt). Im Gegensatz dazu kann der akustische Resonator **100B** (ebenso wie die unten mit Verweis auf die in den **Fig. 1C** bis **Fig. 6C** gezeigten Ausführungsformen besprochenen akustischen Resonatoren) durch eine Anzahl von Mitteln den Q-Faktor aufrechterhalten oder verbessern. Beispielsweise ist der Fluss von elektrischem Strom entkoppelt von einer Massebelastung des akustischen Resonators **110B**. Des Weiteren können angehobene untere und obere Elektroden **110** und **140** mit irgendeiner (oder nahezu beliebigen) Dicke entworfen werden, die das Beseitigen von elektrischen Serienwiderständen R_s und Beitragen zu viskosem Verlust (viscous loss contribution) ermöglicht. Die Dicke der piezoelektrischen Schicht **120** wird vergrößert, was zu einer vergrößerten Fläche der Resonatoreinrichtung führt (und damit zu einem niedrigeren Umfang-zu-Fläche-Verlust und einem größeren Parallelwiderstand R_p). Für ein 3,5 GHz-Signal beispielsweise wäre die Dicke der piezoelektrischen Schicht (z.B. ausgebildet aus AlN) näherungsweise 15kÅ. Die Dicke oder Höhe (vertikale Richtung in **Fig. 1B**) des oberen Luftzwischenraums **145** kann beispielsweise etwa 100Å betragen. Mit schmalen Randtragebereichen (z.B. näherungsweise 0,1 µm bis näherungsweise 0,2µm) für die obere Elektrode **140** wird eine akustische Streuung an dem Rand der oberen Elektrode **140** beseitigt, indem Abschneidefrequenzen in dem Hauptmembranbereich und dem von dem oberen Tragerahmen **122** abgedeckten Bereich (sogenannter Feldbereich) im Wesentlichen angepasst werden. Des Weiteren kann eine schwache Massebelastung des Feldbereichs, die durch den dünnen

oberen Tragerahmen **122** bereitgestellt wird, zu einer gleichzeitigen Verbesserung der Energiebegrenzung (energy confinement) (verbessertes Qualitätsfaktor Q) über dem gesamten Durchlassband des akustischen Resonators, einschließlich spektraler Bereiche von wesentlich unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s bis oberhalb der Parallelresonanzfrequenz F_p , führen.

[0048] Während eines veranschaulichenden Betriebs des akustischen Resonators **100B** (z.B. als ein Teil eines Leiterfilters) wird ein elektrisches Eingangssignal an einem Eingangsanschluss der unteren Elektrode **110** angelegt und die obere Elektrode **140** wird mit einem Ausgangsanschluss verbunden. Das elektrische Eingangssignal umfasst typischerweise eine mit der Zeit variierende Spannung, die eine Vibration in dem Hauptmembranbereich bewirkt. Diese Vibration wiederum erzeugt an einem Ausgangsanschluss der oberen Elektrode **140** ein elektrisches Ausgangssignal. Der Eingangs- und der Ausgangsanschluss können mit der oberen und der unteren Elektrode **110** und **140**, respektive, über Verbindungsränder, die sich aus dem Hauptmembranbereich weg erstrecken, verbunden werden. Der Eingangs- und der Ausgangsanschluss des akustischen Resonators **100B** können mit geeigneten Anschlüssen von anderen akustischen Resonatoren verbunden werden, beispielsweise um den Leiterfilter auszubilden.

[0049] In alternativen Konfigurationen kann anstelle der Vertiefung **108** ein akustischer Reflektor oder akustischer Spiegel, wie etwa ein verteilter Bragg-Reflektor (DBR, distributed Bragg reflector) auf dem Substrat **105** ausgebildet werden, was den akustischen Resonator **100B** zu einem SMR macht. Alternativ kann ein DBR auf dem Substrat zusätzlich zu der Vertiefung ausgebildet werden, um spezifische Ziele der Performanz des Resonators zu erreichen. Verschiedene veranschaulichende Herstellungstechniken von akustischen Spiegeln sind in dem US-Patent Nr. 7,358,831 (15. April 2008) an Larson III et al. beschrieben, dass hierin in seiner Gesamtheit durch Verweis aufgenommen wird. Es wird verstanden, dass dieselben allgemeinen Konfigurationen in akustischen Resonatoren umfasst sein können, die an verschiedenen Stellen dünne Luftzwischenräume aufweisen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0050] Mit Verweis auf **Fig. 1C** ist ein akustischer Resonator **100C** ähnlich wie der akustische Resonator **100B**, außer der Ausbildung eines unteren Luftzwischenraums **115** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** anstelle des oberen Luftzwischenraums **145** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **140**. Des Weiteren umfasst das Substrat **150** des akustischen Resonators **100C** keine Vertiefung

(wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 1B**), so wie das unten besprochen wird.

[0051] Genauer gesagt, wird der untere Luftzwischenraum **115** ausgebildet, indem ein unterer Tragerahmen **124** auf dem Substrat **105** ausgebildet wird und die untere Elektrode **110** auf dem unteren Tragerahmen aufgebracht wird, so dass die untere Elektrode **110** den unteren Luftzwischenraum **115** definiert (oder begrenzt) mit Abmessungen, die einer Öffnung in dem unteren Tragerahmen **124** entsprechen. In einer Ausführungsform beispielsweise kann eine untere Trageschicht, z.B. aus NEBSG ausgebildet, auf der oberen Oberfläche des Substrats **105** abgelagert werden, dann gemustert und geätzt werden, um den unteren Tragerahmen **124** mit einer Öffnung, die dem unteren Luftzwischenraum **115** entspricht, bereitzustellen. Dann kann die untere Elektrode **110** auf dem unteren Tragerahmen **124** und einem Abschnitt des Substrats **105**, der durch die Öffnung des unteren Tragerahmens **124** bloßliegt, ausgebildet werden. Die Form der Öffnung in dem unteren Tragerahmen **124** überträgt sich auf die obere Oberfläche der unteren Elektrode **110**, wodurch der untere Luftzwischenraum **115** definiert (oder begrenzt) wird. Die Planarisierungsschicht **120** wird auf dem unteren Tragerahmen **124** (angedeutet durch eine gestrichelte Linie), angrenzend an die untere Elektrode **110** ausgebildet. Der untere Luftzwischenraum **115** kann mit einem Opfermaterial, wie etwa PSG, gefüllt werden, und dann zusammen mit der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** planarisiert werden, beispielsweise unter Verwendung eines CMP-Prozesses. Die piezoelektrische Schicht **130** kann dann ausgebildet werden auf den planarisierten oberen Oberflächen der unteren Elektrode **110**, der Planarisierungsschicht **120** und des Opfermaterials, das anschließend entfernt wird, um den unteren Luftzwischenraum **115** zurückzulassen. Der untere Luftzwischenraum kann eine Dicke (in der vertikalen Richtung) aufweisen, die beispielsweise kleiner als oder gleich etwa 500\AA ist. Jedoch kann ein dickerer Luftzwischenraum (z.B. weniger als oder gleich wie etwa 1000\AA) und/oder ein Luftzwischenraum, der mehrere Dicken aufweist, aufgenommen werden, so wie das unten mit Verweis auf die **Fig. 6A** bis **Fig. 6C** besprochen wird.

[0052] Demgemäß umfasst der akustische Resonator **100C** das Substrat **105**, die untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** und dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die Planarisierungsschicht **120**, die neben der unteren Elektrode **110** auf dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und die obere Elektrode **140**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **140** einen akus-

tischen Stapel des akustischen Resonators **100C**, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **140** über dem unteren Luftzwischenraum **115** definiert einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **100C**. Die Funktionalität und entsprechende Materialien der verschiedenen Komponenten des akustischen Resonators **100C** sind im Wesentlichen dieselben wie die, die oben mit Verweis auf den akustischen Resonator **100B** besprochen worden sind.

[0053] So wie das oben erwähnt ist, umfasst der akustische Resonator **100C** keine Vertiefung (wie die Vertiefung **108**) in dem Substrat **105** unterhalb des akustischen Stapels. Dies ist, weil die Luft (oder ein anderes Gas oder andere Gase oder ein Vakuum, in bestimmten Konfigurationen) in dem unteren Luftzwischenraum **115** mechanische Energie nicht von der vibrierenden piezoelektrischen Schicht **130** auf die untere Elektrode **110** übertragen werden. Mit anderen Worten, die Reflexion von der unteren Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** ist im Wesentlichen vollständig. Somit besteht kein Erfordernis, die untere Elektrode **110** von dem Substrat **105** zu isolieren, z.B. durch die zusätzliche Vertiefung **105**, weil die untere Elektrode **110** nicht vibriert.

[0054] Mit Verweis auf Fig. 1D ist der akustische Resonator **100D** ähnlich wie die akustischen Resonatoren **100B** und **100C**, außer dass er sowohl den oberen Luftzwischenraum **145** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **140** (und den zugehörigen oberen Tragerahmen **122**) als auch den unteren Luftzwischenraum **115** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** (und den zugehörigen unteren Tragerahmen **124**) umfasst. So wie das oben besprochen ist, weil der akustische Resonator **100D** den unteren Luftzwischenraum **115** umfasst, besteht kein Erfordernis für eine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in Fig. 1B), die in dem Substrat **105** ausgebildet ist, oder einen DBR, der auf dem Substrat **105** ausgebildet ist. Der obere und der untere Luftzwischenraum **145** und **115** können näherungsweise dieselben Höhen aufweisen, oder können verschiedene Höhen aufweisen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0055] In dem akustischen Resonator **100B** überlappt die obere Elektrode **140** die piezoelektrische Schicht **130** und die untere Elektrode **110** überall bis zum Rand der Vertiefung **108**, und in den akustischen Resonatoren **100C** und **100D** überlappt die obere Elektrode **140** die piezoelektrische Schicht **130** und die untere Elektrode **110** überall bis zum Rand des unteren Luftzwischenraums **115**, was einen Strahlungsverlust aufgrund des „Tod-FBAR“-Effekts („dead-FBAR“ effect) vergrößern kann. Allgemein umfasst der Tod-FBAR-Effekt Strahlungsver-

luste, die durch eine Anregung von Mason-Pseudo-Moden überall (oder ganz) bis zum Rand der Vertiefung **108** (oder dem unteren Luftzwischenraum **115**) und durch einen Transducer-Effekt über dem Substrat **105** verursacht werden. Diese für die Performanz nachteiligen (oder verschlechternden) Effekte können durch Erzeugen einer Luftbrücke unter der oberen Elektrode **240**, die den Rand verbindet, angegangen werden, so wie das unten in den Fig. 2A bis Fig. 2C gezeigt ist.

[0056] Die Fig. 2A bis Fig. 2C sind Schnittzeichnungen, die akustische Resonatoren veranschaulichen, die Luftzwischenräume und Luftbrücken/Luftflügel aufweisen, gemäß repräsentativer Ausführungsformen.

[0057] Mit Verweis auf Fig. 2A umfasst ein akustischer Resonator **200A** ein Substrat **105**, das eine Vertiefung **108** definiert (oder begrenzt), eine untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** über der Vertiefung **108** angeordnet ist, eine Planarisierungsschicht **120**, die neben der unteren Elektrode **110** auf dem Substrat **105** angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und eine obere Elektrode **240**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **240** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **200A**. Auch definiert eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130**, dem oberen Luftzwischenraum **145** und der oberen Elektrode **240** über der Vertiefung **140** einen Hauptmembranabschnitt des akustischen Resonators **200A**. Zusätzlich ist eine Luftbrücke **244** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **240** ausgebildet, wobei ein innerer Rand der Luftbrücke **244** eine äußere Begrenzung des Hauptmembranbereichs definiert. Obwohl dies nicht gezeigt ist, kann auf der Oberseite der oberen Elektrode **240** eine Passivierungsschicht vorhanden sein, so wie das oben erwähnt ist.

[0058] Der obere Luftzwischenraum **145** ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **240** ausgebildet. In der gezeigten Ausführungsform wird der obere Luftzwischenraum **145** ausgebildet, indem auf der piezoelektrischen Schicht **130** ein oberer Tragerahmen **122** aufgebracht wird, wobei der obere Tragerahmen **122** eine Öffnung definiert, die dem oberen Luftzwischenraum **145** entspricht, und zwar durch einen Musterbildungs- und Ätzprozess, wie oben erwähnt. Dann können die obere Elektrode **240** und zumindest ein Teil der Luftbrücke **244** über der piezoelektrischen Schicht **130** und dem oberen Tragerahmen **122** ausgebildet werden, was den oberen Luftzwischenraum **145** zurückklässt. In der gezeigten Ausführungsform erstreckt sich die

Luftbrücke **244** nicht bis über den oberen Luftzwischenraum **145** selbst, obwohl die Luftbrücke **244** dies in alternativen Ausführungsformen tun kann, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0059] Die Luftbrücke **244** ist auf der Verbindungsseite **101** (in **Fig. 1A**) der oberen Elektrode **240** angeordnet, und wird folglich von der oberen Elektrode **240** umgeben. Obwohl die Luftbrücke **244** mit einem rechteckförmigen Querschnitt gezeigt ist, kann diese Struktur (und andere Luftbrücken oder Luftflügel, die hierin beschrieben sind) andere Formen aufweisen, wie etwa trapezförmige Querschnittsformen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen. Beispiele von Ausbildungen, Konfigurationen, Abmessungen, alternativen Formen und dergleichen im Hinblick auf Luftbrücken und/oder Luftflügel sind beschrieben und veranschaulicht in der US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift Nr. 2012/0218057 (veröffentlicht am 30. August 2012) an Burak et al., in der US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift Nr. 2010/0327697 (veröffentlicht am 30. Dezember 2010) an Choy et al. und in der US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift Nr. 2010/0327994 (veröffentlicht am 30. Dezember 2010) an Choy et al., deren Offenbarungen hierin in ihren Gesamtheiten durch Verweis aufgenommen werden.

[0060] In bestimmten Ausführungsformen erstreckt sich die Luftbrücke **244** (und andere Luftbrücken, die im Zusammenhang mit repräsentativen Ausführungsformen unten beschrieben sind) über die Vertiefung **108** um eine Vertiefungsüberlappung, die als Entkopplungsbereich **241** bezeichnet wird, die eine Trennung des äußeren Rands des Hauptmembranbereichs von den Rand des Substrats **105** bestimmt. Auch erstreckt sich die Luftbrücke **244** über der piezoelektrischen Schicht **130** um einen Luftbrücken-Erstreckungsbereich **242**. Beispielsweise kann der Entkopplungsbereich **241** eine Breite (x-Abmessung) von näherungsweise 0,0 μm (d.h. keine Überlappung mit der Vertiefung **108**) bis näherungsweise 10,0 μm aufweisen, und kann der Luftbrücken-Erstreckungsbereich **242** eine Breite von näherungsweise 0,0 μm (d.h. keine Luftbrücke) bis näherungsweise 50,0 μm aufweisen. Auch erstreckt sich in der gezeigten Ausführungsform die Luftbrücke **244** insgesamt über einem Abschnitt des oberen Tragerahmens **122**. In alternativen Ausführungsformen kann die Luftbrücke **244** sich jedoch vollständig oder teilweise über einer oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** erstrecken, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0061] Allgemein hängen die optimalen Breiten des Entkopplungsbereichs **241** und des Luftbrücken-Erstreckungsbereichs **242** der Luftbrücke **244** (und anderer Luftbrücken, die im Zusammenhang mit repräsentativen Ausführungsformen unten besprochen

werden) von der Reflexion und Unterdrückung von Eigen-Moden an der Begrenzung des Hauptmembranbereichs und des Entkopplungsbereichs **241** ab. Aufgrund einer wesentlich vergrößerten Abschneidefrequenz des aus der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** gebildeten, kombinierten Stapels in dem Entkopplungsbereich **241** können nur komplexe verschwindende Moden (evanescent modes) (für die Bewegung in der Dickenausdehnung) und sich ausbreitende Biege- und Dehnungsmoden (flexural and dilatational modes) bei der Betriebsfrequenz des akustischen Resonators **200A** existieren. Auch können aufgrund der wesentlich erhöhten Abschneidefrequenz der oberen Elektrode **240** in dem Luftbrücken-Erstreckungsbereich **242** nur komplexe verschwindende Moden (für die Bewegung in der Dickenrichtung) und sich ausbreitende Biege- und Dehnungsmoden bei der Betriebsfrequenz des akustischen Resonators **200A** existieren. Die komplexen verschwindenden Moden in dem Entkopplungsbereich **241** und dem Luftbrücken-Erstreckungsbereich **242** sind durch eine charakteristische Zerfallslänge und durch eine spezifische Ausbreitungskonstante gekennzeichnet. Folglich muss die Luftbrücke **244** beispielsweise breit genug sein, um einen geeigneten Zerfall der komplexen abklingenden Wellen, die an der Grenze des Hauptmembranbereichs und des Entkopplungsbereichs **241** und des Luftbrücken-Erstreckungsbereichs **242** angeregt werden, sicherzustellen. Beschreibungen im Hinblick auf Abmessungen, Eigenschaften und Funktionalitäten von Luftbrücken sind in der US-Patentanmeldung Nr. 14/192,599 (eingereicht am 27. Februar 2014) an Burak et al., die in ihrer Gesamtheit hierin durch Verweis aufgenommen wird, bereitgestellt.

[0062] Die Luftbrücke **244** (und andere Brücken, die im Zusammenhang mit repräsentativen Ausführungsformen unten beschrieben werden) hat eine Höhe (vertikale Richtung in **Fig. 2A**) von näherungsweise 500Å oder mehr, bis zu näherungsweise 5000Å. Auch kann für eine Struktur, die eine reguläre obere Elektrode **240** (d.h. keine Luftbrücke) aufweist, ein Luftflügel erzeugt werden, um eine Streuung an dem Verbindungsrand der oberen Elektrode **240** weiter zu minimieren und die Performanz zu verbessern, so wie das unten mit Verweis auf **Fig. 2B** besprochen wird. Insbesondere ist die untere Begrenzung der Höhe bestimmt durch die Grenzen des Prozesses des Freilassens von Opfermaterial beim Ausbilden der Luftbrücke **244** (und anderer Brücken, die im Zusammenhang mit repräsentativen Ausführungsformen unten beschrieben werden), und ist die obere Grenze der Höhe bestimmt durch die Qualität der Schichten, die über der Luftbrücke **244** (und anderen Brücken, die im Zusammenhang mit repräsentativen Ausführungsformen beschrieben werden) abgelagert werden, und durch die Qualität der nachfolgenden Bearbeitung von möglichen nicht-planare Strukturen. Des Weiteren, obwohl auf eine „Luftbrücke“

verwiesen wird, wird diese Terminologie zum Zweck der Dienlichkeit verwendet und sie ist nicht dazu gedacht, begrenzend zu sein. Das heißt, es wird verstanden, dass die Luftbrücke **244** (ebenso wie die anderen „Luftbrücken“ und/oder „Luftflügel“, die hierin identifiziert werden) ein Vakuum ausbilden oder mit einem oder mehreren von Luft verschiedenen Gasen gefüllt sein können, in Abhängigkeit von der spezifischen Implementierung, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0063] Mit Verweis auf **Fig. 2B** ist der akustische Resonator **200B** ähnlich wie der akustische Resonator **200A**, ausgenommen der Ausbildung eines unteren Luftzwischenraums **115** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** anstelle des oberen Luftzwischenraums **145** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **240'**. Auch umfasst das Substrat **105** des akustischen Resonators **200B** keine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 2A**). Dies ist weil die Luft (oder ein anderes Gas oder andere Gase oder ein Vakuum, in bestimmten Konfigurationen) in dem unteren Luftzwischenraum **115** keine mechanische Energie von der vibrierenden piezoelektrischen Schicht **130** zu der unteren Elektrode **110** überträgt, so wie das oben besprochen ist, so dass keine Notwendigkeit für die Vertiefung oder einen akustischen Reflektor besteht. Der untere Luftzwischenraum **115** wird ausgebildet, so wie das oben mit Verweis auf **Fig. 1C** beschrieben ist, und folglich wird die Beschreibung nicht wiederholt.

[0064] Des Weiteren sind zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **240'** sowohl die Luftbrücke **244** als auch ein Luftflügel **246** ausgebildet. Die entsprechenden inneren Ränder der Luftbrücke **244** und des Luftflügels **246** definieren die äußeren Begrenzungen des Hauptmembranbereichs. Der Luftflügel **246** minimiert weiter eine Streuung an dem Verbindungsrand der oberen Elektrode **240** und verbessert die Performanz. Die Luftbrücke **244** minimiert im Wesentlichen den verschlechternden oder schädlichen Einfluss des sogenannten „Tod-FBAR“-Bereichs („dead-FBAR“ region), wie oben besprochen. Der Luftflügel **246** stellt eine resonante Unterdrückung der gesamten Bewegung am Rand des Hauptmembranbereichs bereit, was zu einer Unterdrückung von Biege-, Dehnungs- und komplexen verschwindenden Moden, die von dem äußeren Bereich getragen (oder geführt werden) führen, was der Bereich ist, wo die untere Elektrode **110** und die piezoelektrische Schicht **130** durch Luft von unten und oben umgeben sind. Die Breite (horizontale Richtung in **Fig. 2B**) der Luftbrücke **244** definiert den Luftbrücken-Erstreckungsbereich **242** und die Breite des Luftflügels **246** definiert einen Luftflügelbereich **243**, die beide für eine beste Performanz des akustischen Resonators **200B** optimiert sind.

[0065] Es wird angemerkt, dass ein Verweis auf die Luftbrücke **244** und auf den Luftflügel **246** impliziert, dass diese mit Luft „gefüllt“ sind. Jedoch wird diese Terminologie nur zum Zweck der Vereinfachung verwendet und sie ist nicht dazu gedacht, beschränkend zu sein. Das heißt, es wird verstanden, dass der Zwischenraum aufgrund der Luftbrücke **244** und/oder der Zwischenraum aufgrund des Luftflügels **246** (ebenso die anderen „Luftbrücken“ und „Luftzwischenräume“ die hierin identifiziert werden), ein Vakuum ausbilden können, mit einem oder mehreren, von Luft verschiedenen Gasen gefüllt sein können oder mit einem Dielektrikum oder einem metallischen Material gefüllt sein können, um die gewünschte Diskontinuität der akustischen Impedanz, die von der spezifischen Implementierung abhängt, bereitzustellen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen. Es wird auch angemerkt, dass sich die beschriebenen Strukturen nicht notwendigerweise ganz bis zu den Rändern der akustischen Resonatoren **200A** bis **200C** erstrecken müssen. Beispielsweise können sie nur auf einer Teilmenge (oder in einem Teilbereich) des fünfseitigen akustischen Resonators **100A**, der in **Fig. 1A** gezeigt ist, bereitgestellt werden. Auch kann in alternativen Ausführungsformen ein Luftflügel, wie etwa ein Luftflügel **246**, in dem akustischen Resonator **200A** in **Fig. 2A** und dem akustischen Resonator **200C** in **Fig. 2C** (ebenso wie in irgendeinem anderen hierin offenbarten akustischen Resonator, der nicht ausdrücklich einen Luftflügel zeigt) umfasst sein. Die Aufnahme eines Luftflügels kann die Energiebegrenzung verbessern, z.B. weil die untere Elektrode **110** mit der piezoelektrischen Schicht **130** durch eine Überlappung mit dem oberen Tragerahmen **122** verbunden ist.

[0066] Die durch die Luftbrücke **244** und den Luftflügel **246** bereitgestellte Fehlanpassung der akustischen Impedanz bewirkt eine Reflexion und Unterdrückung von akustischen Wellen an der Grenze, die sich andernfalls aus dem Hauptmembranbereich heraus ausbreiten könnten, was zu einem Energieverlust führt. Folglich können die Luftbrücke **244** und der Luftflügel **246** dazu dienen, die Anregung von unerwünschten, sich ausbreitenden Moden in dem Hauptmembranbereich und äußeren Bereichen zu unterdrücken, was zu einer besseren Energiebegrenzung innerhalb des Hauptmembranbereichs und zu einer Verringerung von Energieverlusten zu (oder in) akustische Strahlung in dem akustischen Resonator **200B** führt. Das Verringern von derartigen Verlusten erhöht den Q-Faktor des akustischen Resonators **200B**. In Anwendungen des akustischen Resonators **200B** als Filter beispielsweise, kann als ein Ergebnis des verringerten Energieverlusts der Einfügungsverlust (insertion loss) (S_{21}) in vorteilhafter Weise verbessert werden.

[0067] Mit Verweis auf **Fig. 2C** ist ein akustischer Resonator **200C** ähnlich wie die akustischen Resona-

toren **200A** und **200B**, außer dass er sowohl den Luftzwischenraum **145** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **240** (und den zugehörigen oberen Tragerahmen **122**) als auch den unteren Luftzwischenraum **115** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** (und den entsprechenden unteren Tragerahmen **124**) umfasst.

[0068] Allgemein sollten, um die Größe eines Luftzwischenraums (z.B. der obere Luftzwischenraum **145**, der untere Luftzwischenraum **115**) in dem akustischen Resonator zu steuern, alle Schichten des akustischen Resonators einzeln und unter Zugspannung (tensile stress) wachsen gelassen werden. Jedoch können zum Bereitstellen einer größeren Kontrolle und Steuerung der Größe des Luftzwischenraums eine oder mehrere Tragesäulen innerhalb eines Luftzwischenraums implementiert werden, um eine strukturelle Abstützung bereitzustellen.

[0069] Die **Fig. 3A** bis **Fig. 3C** sind Schnittzeichnungen, die akustische Resonatoren veranschaulichen, die Luftzwischenräume und entsprechende Tragesäulen aufweisen, gemäß repräsentativen Ausführungsformen.

[0070] Mit Verweis auf **Fig. 3A** umfasst ein akustischer Resonator **300A** ein Substrat **105**, das eine Vertiefung **108** definiert, eine untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** über der Vertiefung **108** angeordnet ist, eine Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die untere Elektrode **110** auf dem Substrat **105** angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und eine obere Elektrode **340**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **340** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **300A**. Auch definiert eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **340** über der Vertiefung **108** einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **300A**. Obwohl dies nicht gezeigt ist, kann auf der Oberseite der oberen Elektrode **240** eine Passivierungsschicht vorhanden sein, wie oben erwähnt.

[0071] Des Weiteren ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **340** ein oberer Luftzwischenraum **345** ausgebildet. Im Gegensatz zu vorher besprochenen Ausführungsformen ist der obere Luftzwischenraum **340** nicht von einem oberen Tragerahmen, wie etwa dem in den **Fig. 1B**, **Fig. 1C**, **Fig. 2A** und **Fig. 2C** gezeigten oberen Tragerahmen **122**, abgestützt. Vielmehr ist in dem oberen Luftzwischenraum **345** eine obere Tragesäule **348** ausgebildet, um eine strukturelle Abstützung zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der o-

bernen Elektrode **340** in einem Bereich über dem oberen Luftzwischenraum **345** bereitzustellen.

[0072] In einer Ausführungsform ist die obere Tragesäule **348** Teil des Materials, das die obere Elektrode **340** ausbildet. Beispielsweise können der obere Luftzwischenraum **345** und die entsprechende obere Tragesäule **348** aus einem oder mehreren (z.B. etwa $1 \mu\text{m}^2$) Öffnungen in einem Muster des Luftzwischenraums ausgebildet werden. Genauer gesagt, kann eine obere Luftzwischenraumschicht auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** abgelagert werden, wobei die obere Luftzwischenraumschicht aus einem Opfermaterial, wie etwa PSG, für ein nachfolgendes nasses Auslösen ausgebildet wird. Die obere Luftzwischenraumschicht kann dann gemustert und geätzt werden, um ein oberes Luftzwischenraummuster bereitzustellen, wobei das Ätzen einen Abschnitt der oberen Luftzwischenraumschicht entfernt, wobei die nachfolgend aufgebrauchte obere Elektrode **340** die piezoelektrische Schicht **130** berührt (z.B. die rechte Seite des akustischen Resonators **300A**, der in **Fig. 3A** gezeigt ist) und eine Öffnung definiert, die der oberen Tragesäule **348** entspricht. Die obere Elektrode **340** kann dann auf dem bloßliegenden Abschnitt der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Oberfläche des oberen Luftzwischenraumusters abgelagert werden, wobei ein Abschnitt des Materials, das die obere Elektrode **340** ausbildet, die Öffnung in dem Opfermaterial, die der oberen Tragesäule **348** entspricht, ausfüllt. Das Opfermaterial wird entfernt, was den oberen Luftzwischenraum **345** und die obere Tragesäule **348** zurücklässt, so dass die obere Tragesäule **348** das Material der oberen Elektrode **340** umfasst, das sich durch den oberen Luftzwischenraum **345** erstreckt und mit der piezoelektrischen Schicht **130** verbunden ist.

[0073] Die gezeigte Ausführungsform zeigt eine einzelne obere Tragesäule **348**, die im Wesentlichen in der Mitte des oberen Luftzwischenraums **345** angeordnet ist. Es wird jedoch verstanden, dass in alternativen Ausführungsformen mehrere obere Tragesäulen **348** in dem oberen Luftzwischenraum **345** ausgebildet werden können, und zwar angeordnet in verschiedenen Mustern, um eine zusätzliche strukturelle Abstützung bereitzustellen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen. Beispielsweise zeigen die unten besprochenen **Fig. 7A** bis **Fig. 7D** repräsentative Anordnungen von Tragesäulen **778** in repräsentativen vierseitigen Luftzwischenraumbereichen **771** bis **774**. Es wird verstanden werden, dass die Tragesäule oder die Tragesäulen **778** der Tragesäule oder den Tragesäulen **348** (und den anderen oberen Tragesäulen in hierin beschriebenen Ausführungsformen) entsprechen können, und dass die vierseitigen Luftzwischenraumbereiche **771** bis **774** dem oberen Luftzwischenraum **345** (ebenso wie anderen Luftzwischenräumen in hierin beschriebenen Ausführungsformen) entsprechen können.

[0074] Mit Verweis auf **Fig. 3B** ist ein akustischer Resonator **300B** ähnlich wie der akustische Resonator **300A**, ausgenommen der Ausbildung eines unteren Luftzwischenraums **315** und einer entsprechenden unteren Tragesäule **318** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** anstelle des oberen Luftzwischenraums **345** und der entsprechenden oberen Tragesäule **348** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **340**. Auch umfasst das Substrat **105** des akustischen Resonators **300B** keine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 3A**), weil die Luft (oder ein anderes Gas oder andere Gase oder ein Vakuum, in bestimmten Ausführungsformen) in dem unteren Luftzwischenraum **315** keine mechanische Energie von der vibrierenden piezoelektrischen Schicht **130** zu der unteren Elektrode **110** übertragen werden, wie oben besprochen, so dass keine Notwendigkeit für eine Vertiefung oder einen akustischen Reflektor besteht.

[0075] Genauer gesagt, wird der untere Luftzwischenraum **315** ausgebildet, indem auf dem Substrat **105** ein unterer Tragerahmen **124** aufgebracht wird und auf dem unteren Tragerahmen die untere Elektrode **110** aufgebracht wird, so dass die untere Elektrode **110** den unteren Luftzwischenraum **115** definiert, mit Abmessungen, die einer Öffnung in dem unteren Tragerahmen **124** entsprechen. Beispielsweise kann in einer Ausführungsform eine untere Trageschicht, z.B. aus NBESG, ausgebildet, auf der oberen Oberfläche des Substrats **105** abgelagert, dann gemustert und geätzt werden, um in dem unteren Tragerahmen **124** eine Öffnung, die dem unteren Luftzwischenraum **115** entspricht, bereitzustellen. Die untere Elektrode **110** kann dann auf dem unteren Tragerahmen **124** und einem Abschnitt des Substrats **105**, der durch die Öffnung des unteren Tragerahmens **124** bloßliegt, ausgebildet werden. Die Form der Öffnung in dem unteren Tragerahmen **124** überträgt sich auf die obere Oberfläche der unteren Elektrode **110**, wodurch der untere Luftzwischenraum **315** definiert wird. Die Planarisierungsschicht **120** wird auf dem unteren Tragerahmen **124** angrenzend an die untere Elektrode **110** ausgebildet (angedeutet durch eine gestrichelte Linie).

[0076] Der untere Luftzwischenraum **315** kann gefüllt werden mit Opfermaterial, wie etwa PSG, das geätzt wird, um eine Öffnung auszubilden, die der unteren Tragesäule **318** entspricht, die sich von der Unterseite der piezoelektrischen Schicht erstreckt. Genauer gesagt, kann auf den oberen Oberflächen der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** eine untere Luftzwischenraumschicht abgelagert werden, wobei die untere Luftzwischenraumschicht aus einem Opfermaterial, wie etwa PSG, für ein nachfolgendes nasses Auslösen, ausgebildet wird. Die untere Luftzwischenraumschicht kann dann gemustert und geätzt werden, um ein unteres Luftzwi-

schenraummuster bereitzustellen, wobei das Ätzen Abschnitte der unteren Luftzwischenraumschicht von der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** entfernt und eine Öffnung, die der unteren Tragesäule **318** entspricht, in dem Opfermaterial, das den unteren Luftzwischenraum **315** ausfüllt, definiert. Die untere Elektrode **110**, die Planarisierungsschicht **120** und das Opfermaterial werden planarisiert, beispielsweise unter Verwendung eines CMP-Prozesses. Die piezoelektrische Schicht **130** kann dann auf den planarisierten oberen Oberflächen der unteren Elektrode **110**, der Planarisierungsschicht **120** und des Opfermaterials abgelagert werden, wobei ein Teil des Materials, das die piezoelektrische Schicht **130** ausbildet, die Öffnung in dem Opfermaterial, die der unteren Tragesäule **318** entspricht, ausfüllt. Das Opfermaterial wird entfernt, was den unteren Luftzwischenraum **315** und die untere Tragesäule **318** zurücklässt. Die untere Tragesäule **318** umfasst folglich das Material der piezoelektrischen Schicht **130**, das sich durch den Luftzwischenraum **315** erstreckt und mit der unteren Elektrode **110** verbunden ist.

[0077] Die dargestellte Ausführungsform zeigt eine einzelne untere Tragesäule **318**, die etwa in der Mitte des unteren Luftzwischenraums **315** angeordnet ist. Es wird jedoch verstanden, dass in alternativen Ausführungsformen in dem unteren Luftzwischenraum **315** mehrere untere Tragesäulen **318** angeordnet werden können, und zwar in verschiedenartigen Mustern angeordnet, um eine zusätzliche strukturelle Abstützung bereitzustellen, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen. Beispielsweise zeigen die **Fig. 7A** bis **Fig. 7D**, die unten besprochen werden, repräsentative Anordnungen von einer Tragesäule oder Tragesäulen **778** in repräsentativen vierseitigen Luftzwischenraumbereichen **771** bis **774**. Es wird verstanden, dass die Tragesäule(n) **778** den unteren Tragesäule(n) **318** (ebenso wie anderen unteren Tragesäule(n) in hierin beschriebenen Ausführungsformen) entsprechen können, und dass die vierseitigen Luftzwischenraumbereiche **771** bis **774** dem unteren Luftzwischenraum **315** (ebenso wie anderen unteren Luftzwischenräumen in hierin besprochenen Ausführungsformen) entsprechen können.

[0078] Folglich umfasst der akustische Resonator **300B** das Substrat **105**, die untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** und dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die Planarisierungsschicht **120**, die neben der unteren Elektrode **110** auf dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und die obere Elektrode **340**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **340** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **300B**, und eine

Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **340** über der im unteren Luftzwischenraum **315** definiert einen Hauptmembranbereich. Wie oben besprochen, weil der akustische Resonator **300B** den unteren Luftzwischenraum **315** umfasst, besteht kein Erfordernis für eine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 3A**), die in dem Substrat **105** ausgebildet ist, oder für einen DBR, der auf dem Substrat **105** ausgebildet ist. Die Funktionalitäten und entsprechenden Materialien von verschiedenen Komponenten des akustischen Resonators **300B** sind im Wesentlichen dieselben wie die, die oben mit Verweis auf den akustischen Resonator **100B** beschrieben worden sind.

[0079] Mit Verweis auf **Fig. 3C** ist ein akustischer Resonator **300C** ähnlich wie die akustischen Resonatoren **300A** und **300B**, mit der Ausnahme, dass er sowohl einen oberen Luftzwischenraum **345** und eine entsprechende obere Tragesäule **348** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **340** als auch einen unteren Luftzwischenraum **315** und eine entsprechende untere Tragesäule **318** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** umfasst.

[0080] Insbesondere und mit Verweis auf die **Fig. 3A** bis **Fig. 3C** kann eine zunehmende Anzahl und Größe von oberen und unteren Tragesäulen **348** und **318** die Performanz der akustischen Resonatoren **300A–300C**, respektive, nachteilig beeinflussen, indem akustische Streuung am Umkreis von jeder oberen Tragesäule **348** und/oder jeder unteren Tragesäule **318** zunimmt. Auch können insbesondere die unteren Tragesäulen **318** aufgrund der direkten Verbindung mit dem Substrat **105** zu nachteiligen Transducer-Verlusten führen. In vorteilhafter Weise jedoch kann die Anwesenheit der oberen und/oder unteren Tragesäulen **348** und **318** eine zusätzliche Flexibilität ermöglichen beim Entwerfen der Dicke der Massebelastung der Tragerahmen, wie etwa dem oberen Tragerahmen **122**, der in den **Fig. 1A**, **Fig. 1C**, **Fig. 2A** und **Fig. 2C** gezeigt ist, und dem unteren Tragerahmen **124**, der in den **Fig. 1B**, **Fig. 1C**, **Fig. 2B** und **Fig. 2C** gezeigt ist, wodurch der Parallelwiderstand R_p und eine Performanz des Breitband-Qualitätsfaktors Q optimiert werden. Tatsächlich können ein oberer und/oder ein unterer Tragerahmen vollständig beseitigt (oder ausgelassen) werden, wenn eine obere und/oder eine untere Tragesäule **348** und **318**, respektive, in die akustischen Resonatoren eingebaut werden, wie in den **Fig. 3A** bis **Fig. 3C** angedeutet (die für Zwecke der Darstellung keine oberen oder unteren Tragerahmen umfassen).

[0081] Wie oben besprochen, insbesondere im Hinblick auf die **Fig. 2A** bis **Fig. 2C**, wenn eine obere Elektrode die piezoelektrische Schicht und die untere Elektrode überall bis zum Rand der Sub-

stratvertiefung überlappt, kann ein Strahlungsverlust vergrößert werden aufgrund des „Tod-FBAR“-Effekts (d.h. Strahlungsverluste, die durch die Anregung der Mason-Pseudo-Moden überall am Rand der Substratvertiefung und durch den Transducer-Effekt über dem Substrat bewirkt werden). Luftbrücken (und Luftflügel) unter den verbindenden Rand der oberen Elektrode werden beispielsweise zum Minimieren dieser Quellen von Strahlungsverlust und zum Verbessern der Performanz bei der Parallelresonanzfrequenz F_p verwendet. Des Weiteren können die oben besprochenen Tragesäulen, die mit einer Luftbrücke und/oder einem Luftflügel unter dem Verbindungsrand der oberen Elektrode umfasst sind, eine zusätzliche Flexibilität beim Entwerfen der Dicke Massebelastung des Randtragebereichs erlauben, in welchem Fall sie nicht für die Tragefunktion benötigt werden würden, um die Breitband-Performanz zu optimieren, d.h. sowohl oberhalb der Serienresonanzfrequenz F_s (z.B. bei der Parallelresonanzfrequenz F_p) als auch unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s (z.B. durch Minimieren des sogenannten „Geknatters“ (rattles) in einem Südwestbereich eines Smith-Diagramms).

[0082] Allgemein wird Geknatter (rattles) durch Anregung einer sich ausbreitenden Erstreckungsmoden $pTE1$ in der Dickenrichtung bewirkt, beispielsweise am Rand der oberen Elektrode (z.B. obere Elektrode **340**), um Frequenzen unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s zu treiben. Für akustische Stapel vom sogenannten Typ II (wie in der vorliegenden Lehre betrachtet), entspricht die verschwindende $eTE1$ -Mode oberhalb der Serienresonanzfrequenz F_s der sich ausbreitenden $pTE1$ -Mode unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s . In einem regulären FBAR (d.h. einem FBAR, wo die piezoelektrische Schicht auf der Oberseite der unteren Elektrode gestapelt ist und die obere Elektrode auf der Oberseite der piezoelektrischen Schicht gestapelt ist, ohne Luftzwischenräume zwischen den Schichten), wird die gesamte Bewegung am Rand der oberen Elektrode unterdrückt aufgrund der Tatsache, dass der Feldbereich (außerhalb der oberen Elektrode) im Vergleich zu dem Hauptmembranbereich weit weg von der Resonanz ist. Für eine treibende Frequenz unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s wird diese Unterdrückung der gesamten Bewegung des Rands der oberen Elektrode durch die Anregung der $pTE1$ -Mode mit entgegengesetzter Phase zu der Mason-Pseudo-Mode erzielt.

[0083] Weil jedoch $pTE1$ -Eigen-Moden sowohl Längs-(longitudinale) als auch Scherkomponenten unterstützen und die Mason-Pseudo-Mode rein longitudinal ist, kann allgemein nur eine teilweise Unterdrückung der gesamten Bewegung des Rands der Elektrode erzielt werden. Wenn beispielsweise die Scher-Komponente von $pTE1$ -Moden Knoten (NulLEN) an den Rändern der oberen Elektrode ausbildet (so wie das durch die laterale Ausdehnung des aktiven Bereichs und das Dispersionsdiagramm

für gestapelte Eigen-Moden bestimmt ist), kann eine nahezu vollständige Unterdrückung der gesamten Bewegung auftreten und der Strahlungsverlust minimiert werden. Wenn jedoch Scher-Komponenten von pTE1-Moden an den Rändern der oberen Elektrode Anti-Knoten ausbilden (Maximalwerte annehmen) kann eine Unterdrückung der Gesamtbewegung nicht auftreten und der Strahlungsverlust wird durch eine Anregung von zusätzlichen sich ausbreitenden Moden, die durch die Stapel an beiden Seiten des Rands der oberen Elektrode unterstützt oder getragen werden, maximiert. Bei der Frequenz, die dem maximalen Strahlungsverlust (oder den Anti-Knoten der Scher-Komponenten der pTE1-Mode an den Rändern der oberen Elektrode) entspricht, wird das sogenannte Geknatter in dem Smith-Diagramm ausgebildet, das einen verstärkten Strahlungsverlust und einen signifikant erniedrigten Qualitätsfaktor Q des Resonators bei dieser Frequenz anzeigt. Mit anderen Worten, ein Geknatter in dem Smith-Diagramm ist manifestiert als eine Schleife oder eine Einbuchtung, wo der Streuparameter S signifikant von dem Einheitskreis abweicht, so wie das von einem Fachmann gewertschätzt werden sollte.

[0084] Die Ausbildung des Geknatters kann jedoch in FBARs, die in den **Fig. 3A** und **Fig. 3C** gezeigt sind, minimiert werden, indem eine schwache Massebelastung unter Verwendung der Tragerahmen (z.B. der oberen Tragerahmen **122**) bereitgestellt wird. In solchen Fällen koppeln in dem elektrisch angeregten Hauptmembranbereich die Mason-Pseudo-Moden akustisch mit der eTE1-Mode des tragenden Rahmenbereichs, wodurch ein ungewünschtes Streuen von akustischer Energie am Rand der oberen Elektrode minimiert wird und der Qualitätsfaktor Q über dem gesamten Durchlassband maximiert wird. Mit anderen Worten, das Vorhandensein des Tragerahmens (nicht mit dem Rand der oberen Elektrode verbunden) kann ermöglichen, dass die Kolben-Mode (piston mode) in dem Hauptmembranbereich vornehmlich mit eTE1-Moden in dem Tragerahmen koppelt anstatt mit pTE1-Moden des Hauptmembranbereichs, vorausgesetzt, dass die ausgelegte Abschneidefrequenz des Tragerahmens ein wenig oberhalb der minimalen treibenden Frequenz, für die der FBAR entwickelt ist, liegt. Infolgedessen wird Geknatter (rattles) unterhalb der Serienresonanzfrequenz f_s unterdrückt.

[0085] Demgemäß optimiert das Kombinieren von Luftbrücken und/oder Luftflügeln, die mit Verweis auf die **Fig. 2A** bis **Fig. 2C** beschrieben sind, mit den oberen und/oder unteren Tragesäulen, die oben mit Verweis auf die **Fig. 3A** bis **Fig. 3C** beschrieben sind, und mit allein stehenden Tragerahmen, die oben mit Verweis auf die **Fig. 1A** bis **Fig. 1C** beschrieben sind, die Performanz von akustischen Resonatoren noch weiter.

[0086] Die **Fig. 4A** bis **Fig. 4C** sind Schnittzeichnungen, die akustische Resonatoren veranschaulichen, die Luftzwischenräume und entsprechende Tragesäulen ebenso wie Luftbrücken und/oder Luftflügel aufweisen, gemäß repräsentativer Ausführungsformen.

[0087] Mit Verweis auf **Fig. 4A** umfasst ein akustischer Resonator **400A** ein Substrat **105**, das eine Vertiefung **108** definiert, eine untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** über der Vertiefung **108** angeordnet ist, eine Planarisierungsschicht **120**, die neben der unteren Elektrode **110** auf dem Substrat **105** angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und eine obere Elektrode **440**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Ein oberer Luftzwischenraum **445** ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440** ausgebildet.

[0088] Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **440** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **400A**, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130**, des oberen Luftzwischenraums **445** und der oberen Elektrode **440** über der Vertiefung **108** definieren einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **400A**. Des Weiteren ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440** eine Luftbrücke **444** ausgebildet, wobei ein innerer Rand der Luftbrücke **444** eine äußere Grenze des Hauptmembranbereichs definiert. Obwohl dies nicht gezeigt ist, kann auf der Oberseite der oberen Elektrode **440** eine Passivierungsschicht vorhanden sein, wie oben erwähnt.

[0089] In der gezeigten Ausführungsform ist der obere Luftzwischenraum **445** ausgebildet, indem ein oberer Tragerahmen **122** auf der piezoelektrischen Schicht **130** aufgebracht ist, wobei der obere Tragerahmen **122** eine Öffnung definiert, die dem oberen Luftzwischenraum **445** entspricht, und zwar über einen Musterbildungs- und Ätzprozess, so wie das oben im Hinblick auf den oberen Luftzwischenraum **145** besprochen worden ist. Die obere Elektrode **440** und zumindest ein Abschnitt der Luftbrücke **444** können dann über der piezoelektrischen Schicht **130** und dem oberen Tragerahmen **122** ausgebildet werden, wodurch der obere Luftzwischenraum **445** zurückbleibt. In der gezeigten Ausführungsform erstreckt sich die Luftbrücke **444** nicht über den oberen Luftzwischenraum **445** selbst, obwohl die Luftbrücke **444** dies in alternativen Ausführungsformen tun könnte, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0090] Des Weiteren ist in dem oberen Luftzwischenraum **445** eine obere Tragesäule **448** ausgebil-

det, um eine strukturelle Unterstützung zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440** in einem Bereich über dem oberen Luftzwischenraum **445** bereitzustellen. In einer Ausführungsform kann die obere Tragesäule **448** eine strukturelle Abstützung bieten zusätzlich zu der strukturellen Abstützung, die durch den oberen Tragerahmen **122** bereitgestellt wird, um den oberen Luftzwischenraum **445** aufrechtzuerhalten. In einer alternativen Ausführungsform kann die obere Tragesäule **448** die strukturelle Abstützung ohne die Hilfe des oberen Tragerahmens **122** bereitstellen, was die in **Fig. 4A** gezeigte Konfiguration ist. In diesem Fall kann ein Zwischenraum (oder Spalt) zwischen der oberen Elektrode **440** und dem oberen Tragerahmen **122** in der Nähe des oberen Luftzwischenraums **445** bestehen. In einer Ausführungsform ist die obere Tragesäule **448** ein Teil des Materials, das die obere Elektrode **440** ausbildet, und kann ausgebildet werden, so wie das oben für die obere Tragesäule **348** besprochen worden ist.

[0091] Mit Verweis auf **Fig. 4B** ist ein akustischer Resonator **400B** ähnlich wie der akustische Resonator **400A**, ausgenommen der Ausbildung eines unteren Luftzwischenraums **315** und einer entsprechenden unteren Tragesäule **318** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** anstelle des oberen Luftzwischenraums **445** und der entsprechenden Tragesäule **448** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440**. Auch gibt es keinen oberen Tragerahmen **120** auf der piezoelektrischen Schicht **130**, so dass die obere Elektrode **440'** (die die Luftbrücke **444** definiert) direkt auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet ist. Das Substrat **105** des akustischen Resonators **400B** umfasst keine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 4A**), weil die Luft (oder das andere Gas oder andere Gase oder das Vakuum, in bestimmten Konfigurationen) in dem unteren Luftzwischenraum **315** keine mechanische Energie von der vibrierenden piezoelektrischen Schicht **130** auf die untere Elektrode **110** überträgt, wie oben besprochen. Die Ausbildung und Funktionalität des unteren Luftzwischenraums **315** und der entsprechenden unteren Tragesäule **318** sind im Wesentlichen dieselben, wie die mit Verweis auf **Fig. 3C** besprochenen, und daher wird deren Beschreibung nicht wiederholt.

[0092] Des Weiteren sind zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440'** sowohl die Luftbrücke **444** als auch ein Luftflügel **446** ausgebildet. Die entsprechenden inneren Ränder der Luftbrücke **444** und des Luftflügels **446** definieren die äußeren Begrenzungen des Hauptmembranbereichs. Die Ausbildung und Funktionalität der Luftbrücke **444** und des Luftflügels **446** sind im Wesentlichen dieselben wie für die Luftbrücke **244** und den Luftflügel **246**, die oben mit Verweis auf **Fig. 2B** besprochen

worden sind, und folglich wird deren Beschreibung nicht wiederholt.

[0093] Mit Verweis auf **Fig. 4C** ist ein akustischer Resonator **400C** ähnlich wie die akustischen Resonatoren **400A** und **400B**, mit der Ausnahme, dass er sowohl den oberen Luftzwischenraum **445** und die entsprechende obere Tragesäule **448** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440** und ebenso den unteren Luftzwischenraum **315** und die entsprechende untere Tragesäule **318** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** aufweist. Ebenfalls umfasst ist ein oberer Tragerahmen **122**, der auf der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet ist, und die Luftbrücke **444**, die durch die obere Elektrode **440** definiert (oder begrenzt) ist.

[0094] Aus dem Blickwinkel der Physik der Vorrichtung eines CCR, wie etwa den oben besprochenen akustischen Resonatoren **100B** bis **400C**, es können durch den oberen und den unteren Luftzwischenraum relativ kleine Serienkapazitäten vorhanden sein, was zu einem relativ niedrigen elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 führt. Auch kann der Unterschied zwischen einer Schermode **TS2** und einer fundamentalen Dehnungsmode **TE1** in Dickenrichtung (**TS2-TE1**), oder partielle Frequenztrennung (**FFS**, Fractional Frequency Separation) der piezoelektrischen Schicht, relativ niedrig sein, was zu einem großen akustischen Verlust pro Einheits-Umfangslänge, der durch die Diskontinuität des E-Feldes am Rand der oberen Elektrode getrieben wird. Diese Probleme können in verschiedenen Ausführungsformen angegangen werden, indem Massenbelastungsschichten aus dünnem Metall (z.B. **Mo** oder **W**) an einer oder beiden Seiten der piezoelektrischen Schicht hinzugefügt werden, wie das unten in den **Fig. 5A** bis **Fig. 5C** gezeigt ist.

[0095] Durch elektrisches Kurzschließen der dünnen Metallschicht(en) mit der Tragesäule (oder den Tragesäulen) kann der Einfluss der Serienkapazität in einem großen Ausmaß beseitigt werden, in Abhängigkeit von der Anzahl, den Größen und den Positionen der Tragesäulen. Auch verringert das elektrische Kurzschließen der dünnen Metallschicht(en) den Spannungsabfall über dem Luftzwischenraum und vergrößert den elektromechanischen Kopplungskoeffizienten Kt^2 . Dünne Metallschichten mit hoher akustischer Impedanz ermöglichen auch, dass der elektromechanische Kopplungskoeffizient Kt^2 vergrößert wird durch eine Verbesserung der Energiebegrenzung in der Mitte des akustischen Stapels. Des Weiteren kann in Abhängigkeit von der Dicke der dünnen Metallschicht(en) der **FFS** der piezoelektrischen Schicht von etwa 15% auf mehr als 50% erhöht werden.

[0096] Die Fig. 5A sind Fig. 5C sind Schnittzeichnungen, die hybride, kapazitiv gekoppelte Resonatoren (hybrid-CCRs, capacitive coupled resonators), wie oben erwähnt, veranschaulichen, die Luftzwischenräume und entsprechende Tragesäulen, dünne Metallschichten sowie Luftbrücken und/oder Luftflügel aufweisen, gemäß repräsentativen Ausführungsformen.

[0097] Mit Verweis auf Fig. 5A umfasst ein akustischer Resonator **500A** ein Substrat **105**, das eine Vertiefung **108** definiert, eine untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** über der Vertiefung **108** angeordnet ist, eine Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die untere Elektrode **110** auf dem Substrat **105** angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und eine obere Elektrode **540**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **540** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **500A**, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **540** über der Vertiefung **108** definiert einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **500A**. Des Weiteren ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **540** eine Luftbrücke **544** ausgebildet, wobei ein innerer Rand der Luftbrücke **544** eine äußere Grenze des Hauptmembranbereichs definiert. Obwohl dies nicht gezeigt ist, kann auf der Oberseite der oberen Elektrode **540** eine Passivierungsschicht vorhanden sein, wie oben besprochen.

[0098] In der gezeigten Ausführungsform ist auf der piezoelektrischen Schicht **130** eine obere dünne Metallschicht **551** ausgebildet. Die obere dünne Metallschicht **551** kann aus Wolfram (W) oder Molybdän (Mo) ausgebildet werden und beispielsweise eine Dicke aufweisen, die von etwa 50Å bis etwa 1000Å reicht. Zwischen der oberen dünnen Metallschicht **551** und der oberen Elektrode **540** ist ein oberer Luftzwischenraum **545** ausgebildet, wobei in dem oberen Luftzwischenraum **545** eine obere Tragesäule **548** ausgebildet ist, um eine strukturelle Abstützung zwischen der oberen dünnen Metallschicht **551** und der oberen Elektrode **540** bereitzustellen. In einer Ausführungsform ist die obere Tragesäule **548** Teil eines Materials, das die obere Elektrode **540** ausbildet, und sie kann ausgebildet werden, so wie das oben für die obere Tragesäule **348** besprochen worden ist. Auch erstreckt sich in der gezeigten Ausführungsform die Luftbrücke **544** nicht über dem oberen Luftzwischenraum **545** oder die obere dünne Metallschicht **551**, obwohl die Luftbrücke **544** dies in anderen Ausführungsformen tun könnte, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0099] Um die obere dünne Metallschicht **554** auszubilden, kann eine obere Metallschicht auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** abgeschieden werden. Die obere Metallschicht kann dann gemustert und geätzt werden, um die obere dünne Metallschicht **554** bereitzustellen. Eine obere Luftzwischenraumschicht wird auf der oberen dünnen Metallschicht **551** und bloßliegenden Abschnitten der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet, wobei die obere Luftzwischenraumschicht aus einem Opfermaterial, wie etwa PSG, ausgebildet wird, und zwar für ein nachfolgendes nasses Auslösen. Die obere Luftzwischenraumschicht kann dann gemustert und geätzt werden, um ein oberes Luftzwischenraummuster bereitzustellen, wobei das Ätzen einen Teil der oberen Luftzwischenraumschicht entfernt, wobei die nachfolgend aufgebrauchte obere Elektrode **540** die piezoelektrische Schicht **130** berührt (z.B. an der rechten Seite des in Fig. 5A gezeigten akustischen Resonators **500A**) und eine Öffnung, die der oberen Tragesäule **548** entspricht, definiert. Das Mustern und Ätzen kann ein Zweistufenprozess sein, so dass das verbleibende Opfermaterial über der oberen dünnen Metallschicht **551** dünner ist als das verbleibende Opfermaterial über der piezoelektrischen Schicht **130** an der Stelle der Luftbrücke **544**. Die obere Elektrode **540** kann dann auf dem bloßliegenden Abschnitt der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Oberfläche des oberen Luftzwischenraumusters abgeschieden werden, wobei ein Teil des Materials, das die obere Elektrode **540** ausbildet, die Öffnung in dem Opfermaterial, die der oberen Tragesäule **548** entspricht, ausfüllt. Das Opfermaterial wird entfernt, wodurch der obere Luftzwischenraum **545** und die obere Tragesäule **348** zurückbleiben, so dass die obere Tragesäule **548** Material der oberen Elektrode **540** umfasst, das sich durch den oberen Luftzwischenraum **545** hindurcherstreckt und mit der piezoelektrischen Schicht **130** verbunden ist. Das Entfernen des Opfermaterials stellt auch die Luftbrücke **544** zwischen der oberen Elektrode **540** und der piezoelektrischen Schicht **130** bereit.

[0100] Mit Verweis auf Fig. 5B ist ein akustischer Resonator **500D** ähnlich wie der akustische Resonator **500A**, ausgenommen der Ausbildung eines unteren Luftzwischenraums **515** und einer entsprechenden unteren Tragesäule **518** zwischen der unteren Elektrode **110** und einer unteren dünnen Metallschicht **553**, die zwischen der unteren Elektrode **515** und der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet ist, anstelle des oberen Luftzwischenraums **545** und der entsprechenden oberen dünnen Metallschicht **551** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **540**. Weil es keine obere dünne Metallschicht **551** gibt, ist die obere Elektrode **540** (die die Luftbrücke **544** definiert) direkt auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet. Das Substrat **105** des akustischen Resonators **500B** umfasst keine Vertiefung (wie etwa die Vertie-

fung **108** in **Fig. 4A**), weil die Luft (oder das Gas oder die Gase oder das Vakuum, in bestimmten Konfigurationen) in dem unteren Luftzwischenraum **515** keine mechanische Energie von der vibrierenden piezoelektrischen Schicht **130** auf die untere Elektrode **110** überträgt, wie oben besprochen. Die Ausbildung und Funktionalität des unteren Luftzwischenraums **515** ist im Wesentlichen dieselbe wie für den unteren Luftzwischenraum **315**, wie oben mit Verweis auf **Fig. 3C** besprochen, und folglich wird die Beschreibung nicht wiederholt.

[0101] Des Weiteren können sowohl die Luftbrücke **544** als auch der Luftflügel **546** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440'** ausgebildet werden. Die entsprechenden inneren Ränder der Luftbrücke **544** und des Luftflügels **546** definieren die äußeren Grenzen des Hauptmembranbereichs. Die Ausbildung und Funktionalität der Luftbrücke **544** und des Luftflügels **546** sind im Wesentlichen dieselben wie diejenigen der Luftbrücke **244** und des Luftflügels **246**, die oben mit Verweis auf **Fig. 2B** besprochen wurden, und daher wird die Beschreibung nicht wiederholt.

[0102] Die untere dünne Metallschicht **553** wird nach dem Ausbilden des unteren Luftzwischenraums **515** und vor dem Aufbringen der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet. Insbesondere und wie oben besprochen, kann der untere Luftzwischenraum **515** ausgebildet werden, indem der untere Tragerahmen **124** auf dem Substrat **105** aufgebracht wird und die untere Elektrode **110** auf dem unteren Tragerahmen aufgebracht wird, so dass die untere Elektrode **110** den unteren Luftzwischenraum **515** definiert, der Abmessungen aufweist, die einer Öffnung in dem unteren Tragerahmen **124** entsprechen. Das heißt, die Form der Öffnung in dem unteren Tragerahmen **124** überträgt sich auf die obere Oberfläche der unteren Elektrode **110**, wodurch der untere Luftzwischenraum **515** definiert wird. Die Planarisierungsschicht **120** wird auf dem unteren Tragerahmen **124** ausgebildet (angedeutet durch eine gestrichelte Linie), angrenzend an die untere Elektrode **110**. Der untere Luftzwischenraum **515** kann mit einem Opfermaterial, wie etwa PSG, gefüllt werden und kann zusammen mit der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** planarisiert werden, beispielsweise unter Verwendung eines CMP-Prozesses. Die untere Elektrode **110** und das Opfermaterial können dann gemustert und geätzt werden, um Material zu entfernen gemäß der Dicke der nachfolgend aufgetragenen, unteren dünnen Metallschicht **553**, und um ein Muster für einen unteren Luftzwischenraum bereitzustellen, wobei das Ätzen die Teile des Opfermaterials entfernt, um eine Öffnung, die der unteren Tragesäule **518** entspricht, zu definieren. Auf der unteren Elektrode **110** und dem Opfermaterial (beispielsweise nach einem Maskieren der Planarisierungsschicht **120**) wird eine Metallschicht abgeschieden,

um die untere dünne Metallschicht **553**, einschließlich der unteren Tragesäule **518**, die sich aus der unteren dünnen Metallschicht **553** herauserstreckt, bereitzustellen. Die piezoelektrische Schicht **130** wird auf den oberen Oberflächen der unteren dünnen Metallschicht **553** und der Planarisierungsschicht **120** ausgebildet, und die obere Elektrode **540'** (die die Luftbrücke **544** und den Luftflügel **546** definiert, oder begrenzt) wird auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet. An einem Punkt nach dem Ausbilden der unteren dünnen Metallschicht **553** wird das Opfermaterial aus dem unteren Luftzwischenraum **515** entfernt.

[0103] Demgemäß umfasst der akustische Resonator **500B** das Substrat **105**, die untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** und dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die untere dünne Metallschicht **553**, die auf der unteren Elektrode **110** über dem unteren Luftzwischenraum **515** (einschließlich der unteren Tragesäule **518**, die sich durch den unteren Luftzwischenraum **515** erstreckt) angeordnet ist, die Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die untere Elektrode **110** und die untere dünne Metallschicht **553** auf dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren dünnen Metallschicht **553** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und die obere Elektrode **540'**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **540** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **500B** aus, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der unteren dünnen Metallschicht **553**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **540'** über dem unteren Luftzwischenraum **515** definiert einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **500B**. Die Funktionalität und entsprechenden Materialien der verschiedenen Komponenten des akustischen Resonators **500B** sind im Wesentlichen dieselben, wie die, die oben mit Verweis auf den akustischen Resonator **100B** beschrieben worden sind.

[0104] Mit Verweis auf **Fig. 5C** ist ein akustischer Resonator **500C** im Wesentlichen gleich wie die akustischen Resonatoren **500A** und **500B**, mit der Ausnahme, dass er sowohl den oberen Luftzwischenraum **545** und eine entsprechende obere Tragesäule **548** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **440** als auch einen unteren Luftzwischenraum **515** und eine entsprechende untere Tragesäule **518** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** umfasst. Der akustische Resonator **500C** umfasst auch sowohl die obere dünne Metallschicht **551** als auch die untere dünne Metallschicht **553** sowie die durch die obere Elektrode **540** definierte Luftbrücke **544**.

[0105] Im Hinblick auf einen normalen FBAR (im Gegensatz zu einem CCR, wie hierin offenbart), können Rahmen verwendet werden, um die Stärke der Anregung der Mason-Mode an dem Rand des akustischen Resonators auszugestalten und den Q-Faktor in entsprechenden Frequenzbereichen zu verbessern. Im Hinblick auf einen CCR, kann die Anregungsstärke einer Mason-Mode eingestellt werden, indem die Höhe(n) des oberen und/oder unteren Luftzwischenraums an den Umkreis des akustischen Resonators eingestellt oder gesteuert wird. Im Allgemeinen ist die durch ein E-Feld angeregte Amplitude einer akustischen Bewegung einer piezoelektrischen Schicht (d.h. die Amplitude der akustischen Verschiebung in vertikaler Richtung) proportional zu der angelegten Spannung dividiert durch die Differenz zwischen dem Quadrat der das E-Feld treibenden Frequenz F und dem Quadrat der Serienresonanzfrequenz F_s (d.h. $\text{Spannung}/(F^2 - F_s^2)$). Das Hinzufügen von Rahmen zu einem FBAR, beispielsweise, neigt dazu, die Serienresonanzfrequenz F_s von der das E-Feld treibenden Frequenz F in dem entsprechenden Umfangs-(Rahmen)-Bereich weg zu verschieben, wodurch die Amplitude der akustischen Verschiebung verringert wird.

[0106] Im Hinblick auf CCRs, weil die dielektrische Konstante von Luft etwa 10 Mal niedriger ist als die von piezoelektrischen Materialien, führen kleine Änderungen oder Schritte in der Höhe eines Luftzwischenraums in dem CCR, wie in den **Fig. 6A** bis **Fig. 6C** gezeigt, zu großen Änderungen in der an der piezoelektrischen Schicht angelegten, effektiven Spannung. Mehrere Höhen eines Luftzwischenraums können unter Verwendung von mehreren PSG-Schichten entlang des Umfangs des akustischen Resonators relativ leicht hergestellt werden. In einem CCR ist die Hauptursache der Anregung von parasitären Moden eine Diskontinuität des E-Feldes am Rand der oberen Elektrode. Mit mehreren Höhen des Luftzwischenraums in einem Luftzwischenraum kann ein langsamer Abfall des E-Feldes in Richtung zum Rand der Elektrode eingestellt werden, was die Anregung von unechten Moden, sowohl oberhalb als auch unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s beseitigt. Mit anderen Worten, das Vergrößern der Höhe eines Luftzwischenraums am Rand des Luftzwischenraums ermöglicht ein graduelles Erniedrigen der angelegten Spannung entlang des Umkreises und verringert daher die Amplitude der akustischen Verschiebung entlang des Umkreisrandes in einer Weise analog zu den regulären Rahmen in standardmäßigen FBARs. Ein vorteilhafter Unterschied zwischen Luftzwischenräumen, die in CCRs profilieren, und Rahmen in standardmäßigen FBARs ist, dass ein vergrößerter Luftzwischenraum zwischen dem Umkreis eines CCR die Amplitude der angeregten Bewegung entlang des Umkreises des akustischen Resonators für alle Frequenzen um denselben Anteil erniedrigt. Derweil sind in standardmäßigen FBARs

dünnere Rahmen (als die Dicke der Hauptmembran) erforderlich, um die Performanz unterhalb der Serienresonanzfrequenz F_s zu verbessern, und dickere Rahmen (als die Dicke der Hauptmembran) sind erforderlich, um die Performanz oberhalb der Serienresonanzfrequenz F_s zu verbessern.

[0107] Die **Fig. 6A–Fig. 6C** sind Schnittzeichnungen, die akustische Resonatoren veranschaulichen, die Luftzwischenräume mit mehreren Höhen und entsprechenden Tragesäulen sowie Luftbrücken und/oder Luftflügel aufweisen, gemäß repräsentativer Ausführungsformen.

[0108] Mit Verweis auf **Fig. 6A** umfasst ein akustischer Resonator **600A** ein Substrat **105**, das eine Vertiefung **108** definiert, eine untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** über der Vertiefung **108** angeordnet ist, eine Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die untere Elektrode **110** auf dem Substrat **105** angeordnet ist, eine piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und eine obere Elektrode **640**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **640** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **600A**, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640** über der Vertiefung **108** definiert einen Hauptmembranbereich des akustischen Resonators **600A**. Des Weiteren ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640** eine Luftbrücke **644** ausgebildet, wobei ein innerer Rand der Luftbrücke **644** eine äußere Grenze des Hauptmembranbereichs definiert. Obwohl dies nicht gezeigt ist, kann auf der Oberseite der oberen Elektrode **640** eine Passivierungsschicht vorhanden sein, wie oben erwähnt.

[0109] Ein mit mehreren Höhen versehener (oder gestufter) oberer Luftzwischenraum **645** ist zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640** ausgebildet. So wie das oben mit Verweis auf **Fig. 3A** besprochen wurde, wird der obere Luftzwischenraum **645** nicht durch einen oberen Tragerahmen abgestützt, sondern stattdessen durch eine obere Tragesäule **648**, die in dem oberen Luftzwischenraum **645** ausgebildet ist, um eine strukturelle Abstützung zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640** in einem Bereich über dem oberen Luftzwischenraum **645** bereitzustellen. Der obere Luftzwischenraum **645** weist mehrere Höhen auf, die als eine erste Höhe **645a** in dem Mittbereich des oberen Luftzwischenraums **645** und eine zweite Höhe **645b** an einem Randbereich des oberen Luftzwischenraums **645** (oder einem Umkreis des Hauptmembranbereichs des akustischen Resonators **600A**) dargestellt ist. Die zweite Höhe **645b** ist

größer als die erste Höhe **645a**, was zu einer Verringerung der Amplitude der akustischen Verschiebung entlang des Randes des oberen Luftzwischenraums **645** führt, wie oben besprochen. In verschiedenen Ausführungsformen können zusätzliche Höhen (oder Stufen) des oberen Luftzwischenraums **645**, die progressiv in Richtung zum Rand des oberen Luftzwischenraums **645** zunehmen, eingebaut sein, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0110] In der gezeigten Ausführungsform ist die obere Tragesäule **648** ein Teil des Materials, das die obere Elektrode **640** ausbildet, und kann im Wesentlichen in derselben Weise ausgebildet werden, wie die obere Tragesäule **348** aus der **Fig. 3A**, außer dass mehrere Schichten des Opfermaterials aufgebracht werden können, um die Höhe des oberen Luftzwischenraums **645** (z.B. am Randbereich) zu vergrößern. Insbesondere können auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** nacheinander mehrere obere Luftzwischenraumschichten abgeschieden werden, wobei jede der oberen Luftzwischenraumschichten aus einem Opfermaterial, wie etwa PSG, ausgebildet ist, für ein nachfolgendes nasses Auslösen beispielsweise unter Verwendung von Fluorwasserstoffsäure (HF). Die mehreren oberen Luftzwischenraumschichten können gemustert und geätzt werden, um entsprechende obere Luftzwischenraummuster bereitzustellen, wobei das Ätzen Teile der oberen Luftzwischenraumschichten entfernt, wobei die nachfolgend aufgebrauchte obere Elektrode **640** die piezoelektrische Schicht **130** (z.B. an der rechten Seite des in **Fig. 6A** gezeigten akustischen Resonators **600A**) berührt und vertikal ausgerichtete Öffnungen entsprechend den oberen Tragesäulen **648** definiert. Die obere Elektrode **640** kann dann auf dem bloßliegenden Abschnitt der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Oberfläche des obersten oberen Luftzwischenraumusters abgeschieden werden, wobei ein Teil des Materials, das die obere Elektrode **640** ausbildet, die vertikal ausgerichteten Öffnungen in den Schichten des Opfermaterials, die den oberen Tragesäulen **648** entsprechen, ausfüllt. Die Schichten des Opfermaterials werden ausgelöst, wodurch der obere Luftzwischenraum **645** zurückbleibt mit Stufen, die der ersten und der zweiten Höhe **645a** und **645b** und der oberen Tragesäule **648** entsprechen, so dass die obere Tragesäule **648** Material der oberen Elektrode **640**, das sich durch den schmaleren Abschnitt des oberen Luftzwischenraums **645** erstreckt und die piezoelektrische Schicht **130** berührt, umfasst.

[0111] Mit Verweis auf **Fig. 6B** ist ein akustischer Resonator **600B** ähnlich wie der akustische Resonator **600A**, außer der Ausbildung eines unteren Luftzwischenraums **315** und einer entsprechenden unteren Tragesäule **318** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** zusätzlich zu dem oberen Luftzwischenraum **645** und der entspre-

chenden oberen Tragesäule **648** zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640**. Auch umfasst das Substrat **105** des akustischen Resonators **600B** keine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 6A**). Die Ausbildung und Funktionalität des unteren Luftzwischenraums **315** und der entsprechenden unteren Tragesäule **318** sind im Wesentlichen dieselben, wie die, die oben mit Verweis auf **Fig. 3** beschrieben worden sind, und folglich wird deren Beschreibung nicht wiederholt.

[0112] Folglich umfasst der akustische Resonator **600B** das Substrat **105**, die untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** und dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die untere Elektrode **110** auf dem unteren Tragerahmen **124** angeordnet ist, die piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und die obere Elektrode **640**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **640** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **600B**, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640** über dem unteren Luftzwischenraum **315** definiert einen Hauptmembranbereich. Wie oben besprochen, weil der akustische Resonator **600B** den unteren Luftzwischenraum **315** umfasst, gibt es kein Erfordernis für eine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 6A**), die in dem Substrat **105** ausgebildet ist, oder für einen DBR, der auf dem Substrat **105** ausgebildet ist. Die Funktionalitäten und entsprechenden Materialien der verschiedenen Komponenten des akustischen Resonators **600B** sind im Wesentlichen dieselben, wie die, die oben mit Verweis auf den akustischen Resonator **100B** besprochen worden sind.

[0113] Mit Verweis auf **Fig. 6C** ist ein akustischer Resonator **600C** ähnlich wie der akustische Resonator **600B**, außer dass er einen mit mehreren Höhen versehenen (oder gestuften) unteren Luftzwischenraum **615** und eine entsprechende untere Tragesäule **618** zwischen der unteren Elektrode **110** und der piezoelektrischen Schicht **130** umfasst, im Gegensatz zu dem unteren Luftzwischenraum **315** und der entsprechenden unteren Tragesäule **318**. In der gezeigten Ausführungsform umfasst der akustische Resonator **600C** eine Luftbrücke **644** und einen Luftflügel **646**, die zwischen der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640** ausgebildet sind, umfasst jedoch nicht einen mit mehreren Höhen versehenen, oberen Luftzwischenraum **645** und die entsprechende obere Tragesäule **648**. Jedoch kann in alternativen Ausführungsformen der mit mehreren Höhen versehene obere Luftzwischenraum **645** und die entsprechende obere Tragesäule **648** in einem akustischen Resonator zusammen mit dem mit mehreren

Höhen versehenen, unteren Luftzwischenraum **615** umfasst sein, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0114] In der gezeigten Ausführungsform sind die mehreren Höhen (oder Stufen) des unteren Luftzwischenraums **615** durch einen erhöhten Mittenabschnitt **111** der unteren Elektrode **110** ermöglicht, was dickere Luftzwischenräume auf beiden Seiten des erhöhten Mittenabschnitts **111** liefert. Das heißt, der untere Luftzwischenraum **615** hat mehrere Höhen, die als eine erste Höhe **615a** im Mittenbereich des unteren Luftzwischenraums **615** (entsprechend dem erhöhten Mittenabschnitt **111**) und einer zweiten Höhe **615b** an einem Randbereich des unteren Luftzwischenraums **615** (oder an einem Umkreis des Hauptmembranbereichs des akustischen Resonators **600A**) dargestellt sind. Die zweite Höhe **615b** ist größer als die erste Höhe **615a**, was zu einer Verringerung der Amplitude der akustischen Verschiebung entlang des Randes des unteren Luftzwischenraums **615** führt, wie oben besprochen. In verschiedenen Ausführungsformen können zusätzliche Höhen (oder Stufen) des unteren Luftzwischenraums **615**, die in Richtung zum Rand des unteren Luftzwischenraums **615** progressiv zunehmen, aufgenommen werden, ohne vom Umfang der vorliegenden Lehren abzuweichen.

[0115] Genauer gesagt, kann der untere Luftzwischenraum **615** ausgebildet werden, indem eine erste untere Trageschicht (entsprechend einem ersten unteren Tragerahmen **124a**) auf dem Substrat **105** und eine zweite untere Trageschicht (entsprechend einem zweiten unteren Tragerahmen **124b**) auf dem ersten unteren Tragerahmen aufgebracht werden, wie durch eine gestrichelte Linie angezeigt. Die aufeinandergestapelte erste und zweite untere Trageschicht werden gemustert und geätzt in zwei Schritten. Der erste Schritt entfernt einen Mittenabschnitt der zweiten unteren Trageschicht, um den zweiten unteren Tragerahmen **124b** bereitzustellen, der eine Öffnung definiert, die den äußeren Rändern des unteren Luftzwischenraums **615** entspricht. Der zweite Schritt entfernt Abschnitte der ersten unteren Trageschicht, die einen Mittenabschnitt derselben umringen, um den ersten unteren Tragerahmen **124a** bereitzustellen. Der erste untere Tragerahmen **124a** definiert auch die Öffnung, die den äußeren Rändern des unteren Luftzwischenraums **615** entspricht, und stellt ferner einen Mittenabschnitt **124a'**, der dem erhöhten Mittenabschnitt **111** der unteren Elektrode **110** entspricht, bereit. Das Material, das die untere Elektrode **110** ausbildet, wird dann auf dem ersten und dem zweiten unteren Tragerahmen **124a** und **124b** und auf einem Abschnitt des Substrats **105**, der durch die Öffnung des ersten und des zweiten unteren Tragerahmens **124a** und **124b** bloßliegt, aufgebracht, so dass die resultierende untere Elektrode **110** den unteren Luftzwischenraum **615** definiert (oder begrenzt).

Das heißt, die Form des äußeren Randes der Öffnung in dem ersten und dem zweiten unteren Tragerahmen **124a** und **124b** überträgt sich auf die obere Oberfläche der unteren Elektrode **110**, wodurch die äußeren Ränder des unteren Luftzwischenraums **615** definiert werden, und die Form des Mittenabschnitts **124a'** überträgt sich auf die obere Oberfläche der unteren Elektrode **110** als der erhöhte Mittenabschnitt **111**.

[0116] Die Planarisierungsschicht **120** wird auf dem zweiten unteren Tragerahmen **124b** (angedeutet durch eine andere gestrichelte Linie), angrenzend an die untere Elektrode **110**, ausgebildet. Eine untere Luftzwischenraumschicht kann auf den oberen Oberflächen der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** abgeschieden werden, wobei die untere Luftzwischenraumschicht aus einem Opfermaterial, wie etwa PSG, ausgebildet ist für ein nachfolgendes nasses Auslösen. Die untere Luftzwischenraumschicht kann dann gemustert und geätzt werden, um ein unteres Luftzwischenraummuster bereitzustellen, wobei das Ätzen Teile der unteren Luftzwischenraumschicht aus der unteren Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** entfernt und eine Öffnung entsprechend der unteren Tragesäule **618** in dem Opfermaterial, das den unteren Luftzwischenraum **615** ausfüllt, definiert. Die untere Elektrode **110**, die Planarisierungsschicht **120** und das Opfermaterial werden planarisiert, beispielsweise unter Verwendung eines CMP-Prozesses. Die piezoelektrische Schicht **130** kann dann auf den planarisierten oberen Oberflächen der unteren Elektrode **110**, der Planarisierungsschicht **120** und dem Opfermaterial abgeschieden werden, wobei ein Abschnitt des Materials, das die piezoelektrische Schicht **130** ausbildet, die Öffnung in dem Opfermaterial entsprechend der unteren Tragesäule **618** ausfüllt. Die obere Elektrode **640'** (die die Luftbrücke **644** und den Luftflügel **646** definiert) wird auf der oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht **130** ausgebildet. An einem Punkt nach der Ausbildung der piezoelektrischen Schicht **130** wird das Opfermaterial gelöst, wodurch der untere Luftzwischenraum **615** zurückbleibt mit Stufen, die der ersten und der zweiten Höhe **615a** und **615b** und der unteren Tragesäule **618** entsprechen, so dass die untere Tragesäule **618** Material der piezoelektrischen Schicht **130**, das sich durch den schmaleren Abschnitt des unteren Luftzwischenraums **615** erstreckt und die untere Elektrode **110** berührt, umfasst.

[0117] Demgemäß umfasst der akustische Resonator **600C** das Substrat **105**, die untere Elektrode **110**, die auf dem Substrat **105** und dem ersten und dem zweiten unteren Tragerahmen **124a** und **124b** angeordnet ist, die Planarisierungsschicht **120**, die angrenzend an die untere Elektrode **110** auf dem zweiten unteren Tragerahmen **124b** angeordnet ist, die piezoelektrische Schicht **130**, die auf der unteren

Elektrode **110** und der Planarisierungsschicht **120** angeordnet ist, und die obere Elektrode **640'**, die auf der piezoelektrischen Schicht **130** angeordnet ist. Zusammen bilden die untere Elektrode **110**, die piezoelektrische Schicht **130** und die obere Elektrode **640'** einen akustischen Stapel des akustischen Resonators **600C**, und eine Überlappung von der unteren Elektrode **110**, der piezoelektrischen Schicht **130** und der oberen Elektrode **640'** über dem unteren Luftzwischenraum **615** definieren einen Hauptmembranbereich. Wie oben besprochen, weil der akustische Resonator **600C** den unteren Luftzwischenraum **615** umfasst, besteht kein Erfordernis für eine Vertiefung (wie etwa die Vertiefung **108** in **Fig. 6A**), die in dem Substrat **105** ausgebildet ist, oder für einen DBR, der auf dem Substrat **105** ausgebildet ist. Die Funktionalitäten und die entsprechenden Materialien der verschiedenen Komponenten des akustischen Resonators **600C** sind im Wesentlichen dieselben, wie die, die oben mit Verweis auf den akustischen Resonator **100B** besprochen worden sind.

[0118] Die **Fig. 7A** bis **Fig. 7D** sind Ansichten von oben von Bereichen von Luftzwischenräumen, die verschiedene Anzahlen und Anordnungen von Tragesäulen aufweisen, gemäß repräsentativer Ausführungsformen. Die Luftzwischenraumbereiche **771** bis **774** können Bereichen von irgendeiner der gemusterten, oberen oder unteren Luftzwischenräume, die oben besprochen worden sind, entsprechen. Gleichmaßen können die Tragesäulen **778** irgendeiner der Tragesäulen in dem oberen oder unteren Luftzwischenraum, die oben besprochen wurden, entsprechen.

[0119] **Fig. 7A** zeigt einen Luftzwischenraumbereich **771**, der eine einzelne Tragesäule **778** aufweist, die im Wesentlichen in der Mitte des Luftzwischenraumbereichs **771** angeordnet ist. Beispiele dieser Konfiguration sind in **Fig. 3C** gezeigt, in der eine einzige obere Tragesäule **348** etwa in der Mitte des oberen Luftzwischenraums **345** bereitgestellt ist, und eine einzige untere Tragesäule **318** etwa in der Mitte des unteren Luftzwischenraums **315** bereitgestellt ist. **Fig. 7B** zeigt einen Luftzwischenraumbereich **772**, der vier Tragesäulen **778** aufweist, von denen jede bei etwa einem Drittel des Abstands zwischen der Ecke des entsprechenden Musters (das den Luftzwischenraum definiert) und dem Mittelpunkt des Luftzwischenraumbereichs **772** angeordnet ist, obwohl andere anteilmäßige Abstände eingebaut sein können. **Fig. 7C** zeigt einen Luftzwischenraumbereich **773**, der fünf Tragesäulen aufweist, was im Wesentlichen die Anordnungen der in den **Fig. 7A** und **Fig. 7B** gezeigten Tragesäulen kombiniert. **Fig. 7D** zeigt einen Luftzwischenraumbereich **774**, der neun Tragesäulen **778** aufweist, die im Wesentlichen symmetrisch in drei Zeilen und drei Spalten angeordnet sind, einschließlich einer Tragesäule **778** am Mittelpunkt des Luftzwischenraumbereichs **774**.

[0120] Allgemein und wie oben besprochen, verbessert das Vergrößern der Anzahl der Tragesäulen **778** die Robustheit des Aufbaus, erhöht jedoch auch die Streuung an den Rändern der Tragesäulen **778**. Des Weiteren, obwohl die Tragesäule(n) **778** in den **Fig. 7A** bis **Fig. 7D** kreisförmige Querschnitte aufweisen, können die Formen der Querschnitte variieren. Beispielsweise können die Querschnittsformen der Tragesäule(n) **778** quadratisch, rechteckförmig, oval, dreieckförmig sein oder irgendeine andere Form haben. Des Weiteren, wenn es mehr als eine gibt, können die Tragesäulen **778** dieselbe oder voneinander verschiedene Formen aufweisen. Selbstverständlich können die Anzahl, die Größe, die Form und die Anordnung der Tragesäule(n) **778** variieren, um einzigartige Vorteile für irgendeine bestimmte Situation bereitzustellen oder um anwendungsspezifische Entwurfserfordernisse von verschiedenartigen Implementierungen zu erfüllen, so wie das für einen Fachmann offensichtlich wäre.

[0121] Allgemein können dünne Luftzwischenräume und entsprechende Tragestrukturen in verschiedenen alternativen Stellen und Konfigurationen über und/oder unter der piezoelektrischen Schicht eines akustischen Resonators angeordnet werden, um verschiedene CCR-Einrichtungen bereitzustellen. Gleichmaßen können Luftbrücken und/oder Luftflügel in verschiedenen alternativen Positionen und Konfigurationen umfasst sein. Die entsprechenden Abmessungen, Materialien, relativen Positionen usw. können eingestellt werden, um bestimmte Entwurfsziele zu erzielen, wie etwa Sollwerte für eine Resonanzfrequenz, einen Serienwiderstand R_s , einen Parallelwiderstand R_p oder einen elektromechanischen Kopplungskoeffizienten K_t^2 . Obwohl die obige Beschreibung mehrere Ausführungsformen in der Form von FBAR-Einrichtungen vorstellt, könnten die beschriebenen Konzepte in anderen Arten von akustischen Resonatoren, wie beispielsweise etwa SMRs, implementiert werden.

[0122] Während hierin beispielhafte Ausführungsformen offenbart sind, schätzen Fachleute, dass viele Variationen, die gemäß den obigen Lehren sind, möglich sind und im Schutzbereich der beigefügten Patentansprüche bleiben. Beispielsweise und wie oben angedeutet, können die Positionen, Abmessungen, Materialien und sogar die Anzahlen von Rahmen in vielfältiger Weise verändert werden. Des Weiteren können andere Merkmale hinzugefügt und/oder entfernt werden, um verschiedenartige Performanzmerkmale der beschriebenen Einrichtungen zu verbessern. Diese und andere Variationen würden für einen Fachmann nach der Durchsicht der Beschreibung, der Zeichnungen und der Patentansprüche hierin offensichtlich. Die Erfindung ist daher nicht beschränkt außer innerhalb des Geists und des Schutzbereichs der beigefügten Patentansprüche.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 6107721 [0031]
- US 5587620 [0031]
- US 5873153 [0031]
- US 6507983 [0031]
- US 6384697 [0031]
- US 7275292 [0031]
- US 7629865 [0031]
- US 7280007 [0031]
- US 7388454 [0031]
- US 6548943 [0031]
- US 7345410 [0043]
- US 7358831 [0049]

Patentansprüche

1. Ein akustischer Volumenwellen(BAW, bulk acoustic wave)-Resonator, der folgendes aufweist:
eine untere Elektrode, die auf einem Substrat angeordnet ist,
eine piezoelektrische Schicht, die über der unteren Elektrode angeordnet ist,
eine obere Elektrode, die über der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist, und
zumindest ein Luftzwischenraum und eine zugehörige Tragestruktur, wobei der zumindest eine Luftzwischenraum die zumindest eine von der unteren Elektrode und der oberen Elektrode von der piezoelektrischen Schicht, respektive, trennt.

2. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 1, wobei der zumindest eine Luftzwischenraum eine Höhe aufweist, die weniger als oder gleich wie näherungsweise 500Å ist.

3. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei ein Hauptmembranbereich des BAW-Resonators durch überlappende Abschnitte von der unteren Elektrode, der piezoelektrischen Schicht, der oberen Elektrode und dem zumindest einen Luftzwischenraum definiert ist.

4. Der BAW-Resonator gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, ferner aufweisend:
eine Vertiefung, die in dem Substrat ausgebildet ist, wobei die obere Elektrode durch einen oberen Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist und die untere Elektrode auf einer oberen Oberfläche des Substrats über der Vertiefung ausgebildet ist.

5. Der BAW-Resonator gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die obere Elektrode durch einen oberen Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist und die untere Elektrode durch einen unteren Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist.

6. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 5, wobei die obere und der untere Luftzwischenraum näherungsweise dieselben Höhen aufweisen.

7. Der BAW-Resonator gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die untere Elektrode durch einen unteren Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist und die obere Elektrode auf einer oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht ausgebildet ist.

8. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 7, ferner aufweisend:
eine Luftbrücke und einen Luftflügel, die zwischen der piezoelektrischen Schicht und der oberen Elektrode ausgebildet sind.

9. Der BAW-Resonator gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die zugehörige Tragestruktur einen Tragerahmen umfasst, der eine Öffnung definiert, die dem zumindest einen Luftzwischenraum entspricht, wobei die zumindest eine von der unteren Elektrode und der oberen Elektrode auf dem Tragerahmen ausgebildet ist.

10. Der BAW-Resonator gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die entsprechende Tragestruktur eine Tragesäule umfasst, die in dem zumindest einen Luftzwischenraum ausgebildet ist, um eine strukturelle Abstützung für die entsprechende zumindest eine von der oberen Elektrode und der unteren Elektrode, respektive, bereitzustellen.

11. Ein akustischer Volumenwellen(BAW)-Resonator, der folgendes aufweist:
eine untere Elektrode, die auf einem Substrat angeordnet ist,
eine piezoelektrische Schicht, die über der unteren Elektrode angeordnet ist,
eine obere Elektrode, die über der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist, und
zumindest eine Tragesäule, die in zumindest einem von einem unteren Luftzwischenraum und einem oberen Luftzwischenraum angeordnet ist und dazu ausgebildet ist, eine Höhe des entsprechenden zumindest einem von dem unteren Luftzwischenraum und dem oberen Luftzwischenraum aufrechtzuerhalten,
wobei zumindest eine von der unteren Elektrode und der oberen Elektrode durch einen entsprechenden zumindest einen von dem unteren Luftzwischenraum und dem oberen Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht, getrennt ist, respektive, und von der zumindest einen Tragesäule abgestützt wird.

12. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 11, ferner aufweisend:
eine Vertiefung, die in dem Substrat ausgebildet ist, wobei die obere Elektrode durch einen entsprechenden Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist und von der zumindest einen Tragesäule abgestützt ist, und die untere Elektrode auf einer oberen Oberfläche des Substrats über der Vertiefung ausgebildet ist.

13. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 11, wobei sowohl die obere Elektrode als auch die untere Elektrode durch den oberen Luftzwischenraum und den unteren Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt sind, respektive, und von zumindest einer oberen Tragesäule und zumindest einer unteren Tragesäule, respektive, abgestützt werden.

14. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 11 oder 13, wobei die zumindest eine von der unteren Elektrode und der oberen Elektrode durch den entsprechen-

den zumindest einen von dem unteren Luftzwischenraum und dem oberen Luftzwischenraum, respektive, von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist und von einer Mehrzahl von Tragesäulen abgestützt wird.

15. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 11, wobei die untere Elektrode durch den entsprechenden unteren Luftzwischenraum von der piezoelektrischen Schicht getrennt ist und von der zumindest einen Tragesäule abgestützt ist, und die obere Elektrode auf einer oberen Oberfläche der piezoelektrischen Schicht ausgebildet ist.

16. Der BAW-Resonator gemäß einem der Ansprüche 11 bis 15, wobei der zumindest eine von dem unteren Luftzwischenraum und dem oberen Luftzwischenraum ein Luftzwischenraum mit mehreren Höhen ist, der zumindest eine erste Höhe in einem Mittbereich und eine zweite Höhe in einem Randbereich des entsprechenden einen von zumindest dem unteren Luftzwischenraum und dem oberen Luftzwischenraum aufweist.

17. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 16, wobei die erste Höhe kleiner als die zweite Höhe von jedem von dem zumindest einen Luftzwischenraum mit mehreren Höhen ist.

18. Ein akustischer Volumenwellen(BAW)-Resonator, der folgendes aufweist:
eine untere Elektrode, die auf einem Substrat angeordnet ist,
eine piezoelektrische Schicht, die über der unteren Elektrode angeordnet ist,
eine obere Elektrode, die über der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist, und
zumindest eine dünne Metallschicht, die angrenzend an die (oder neben der) piezoelektrischen Schicht ausgebildet ist,
wobei zumindest eine von der unteren Elektrode und der oberen Elektrode von der zumindest einen dünnen Metallschicht durch einen entsprechenden zumindest einen von einem unteren Luftzwischenraum und einem oberen Luftzwischenraum, respektive, getrennt ist.

19. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 18, ferner aufweisend:
eine Mehrzahl von Tragesäulen, die in dem zumindest einen von dem unteren Luftzwischenraum und dem oberen Luftzwischenraum ausgebildet ist, wobei die Mehrzahl der Tragesäulen die zumindest eine dünne Metallschicht elektrisch kurzschließt, wodurch ein Spannungsabfall über den Luftzwischenraum verringert wird und der elektromechanische Kopplungskoeffizient Kt^2 vergrößert wird.

20. Der BAW-Resonator gemäß Anspruch 18 oder 19, wobei sowohl die obere Elektrode als auch die untere Elektrode durch den oberen Luftzwischen-

raum und den unteren Luftzwischenraum, respektive, von der piezoelektrischen Schicht getrennt sind, und von zumindest einer oberen Tragesäule und zumindest einer unteren Tragesäule, respektive, abgestützt werden.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

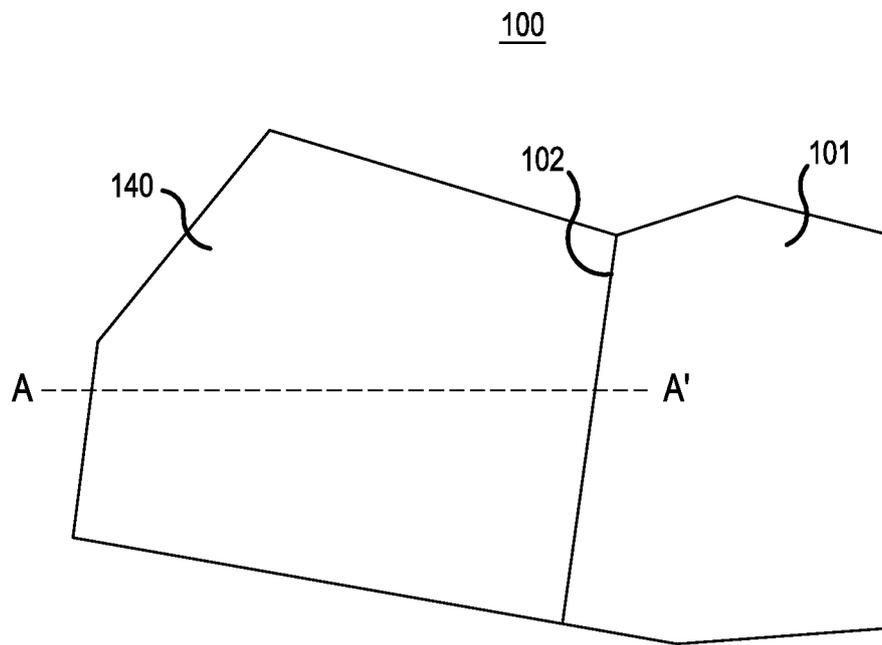


FIG.1A

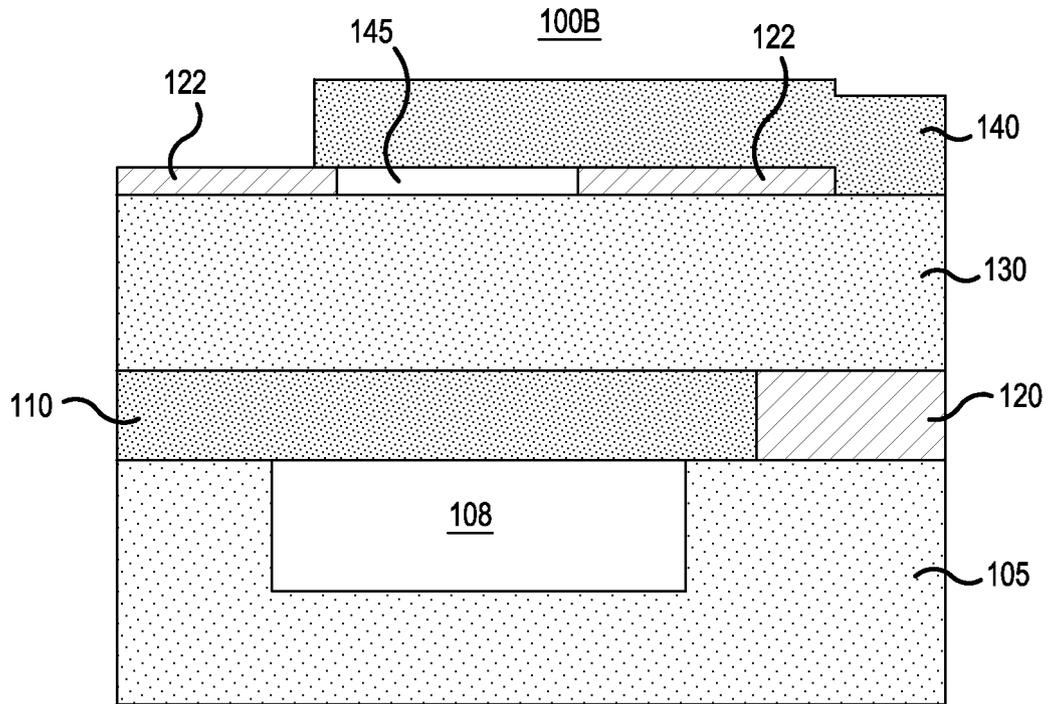


FIG.1B

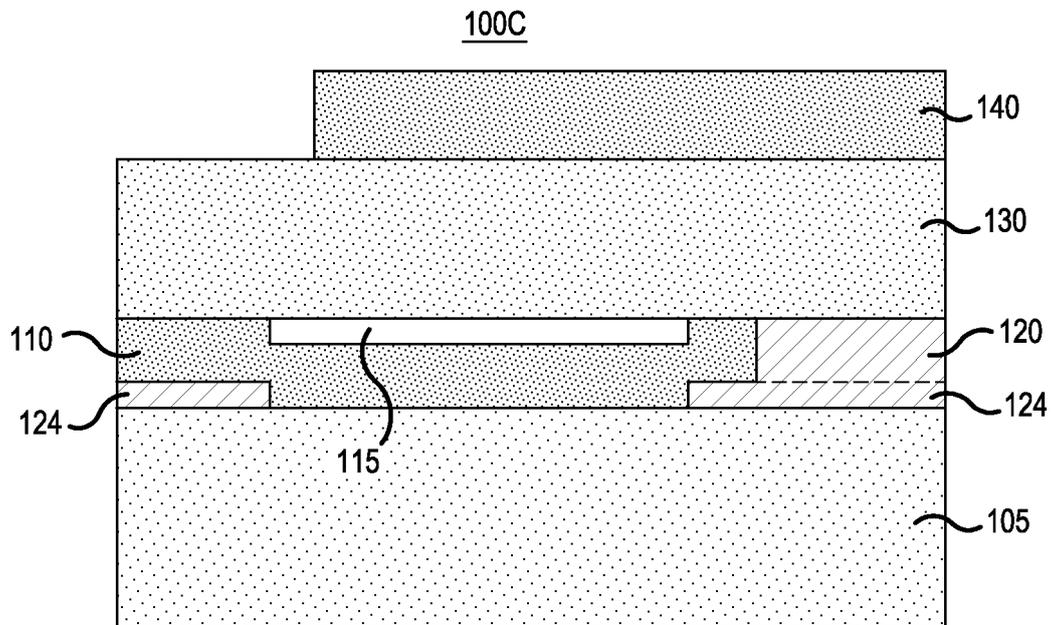


FIG.1C

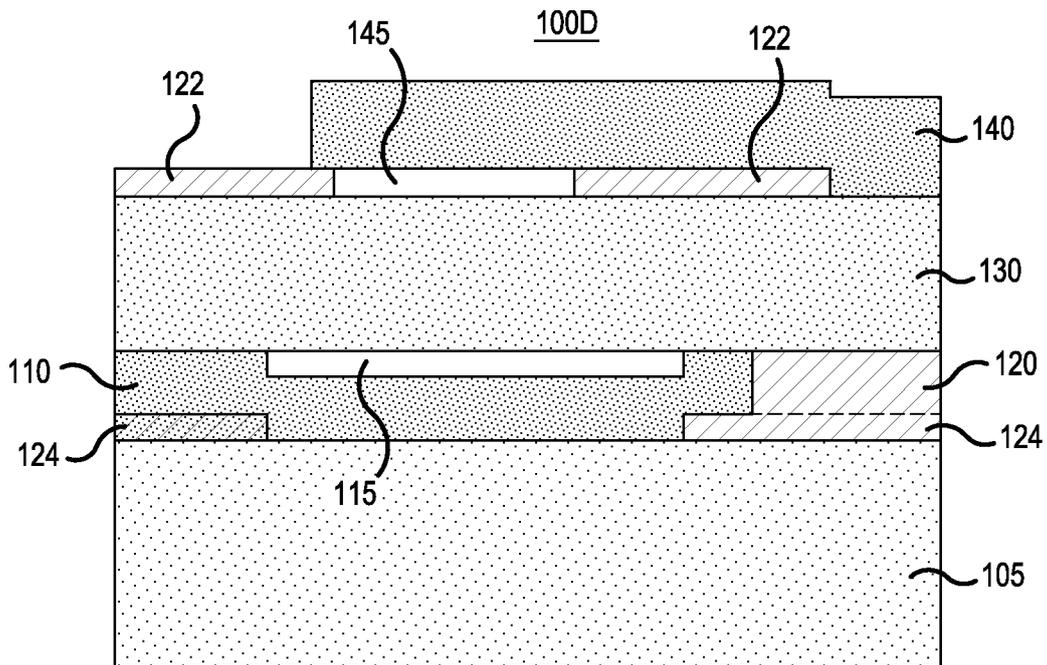


FIG.1D

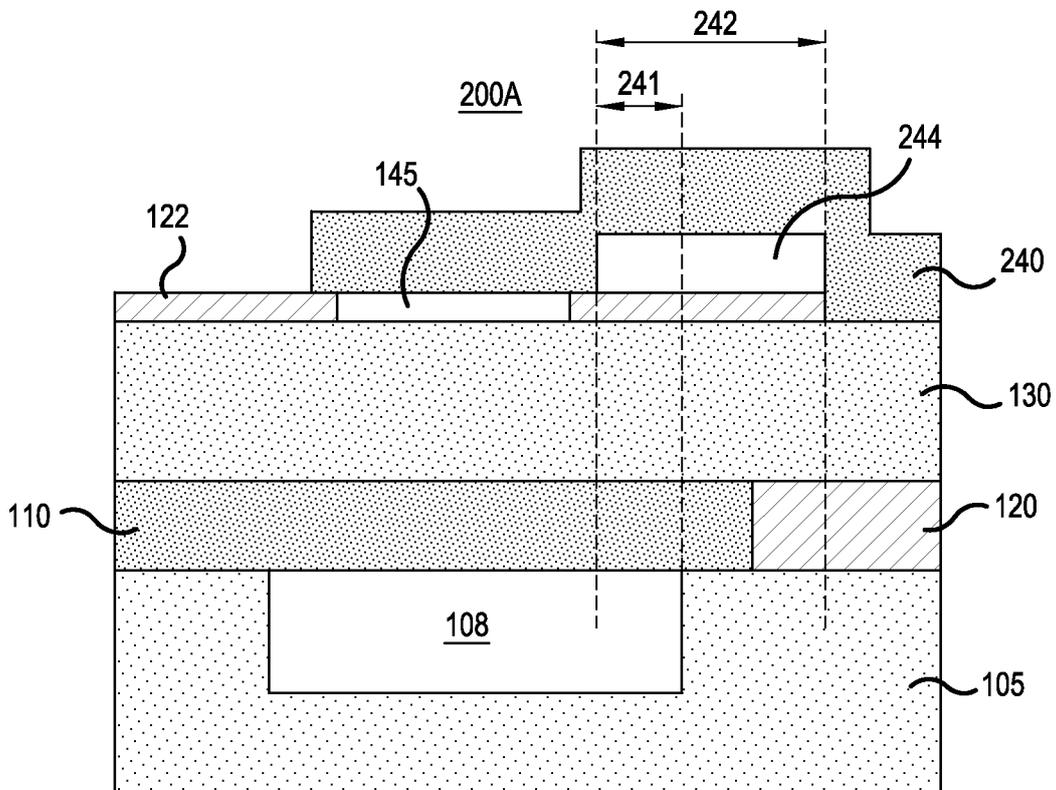


FIG.2A

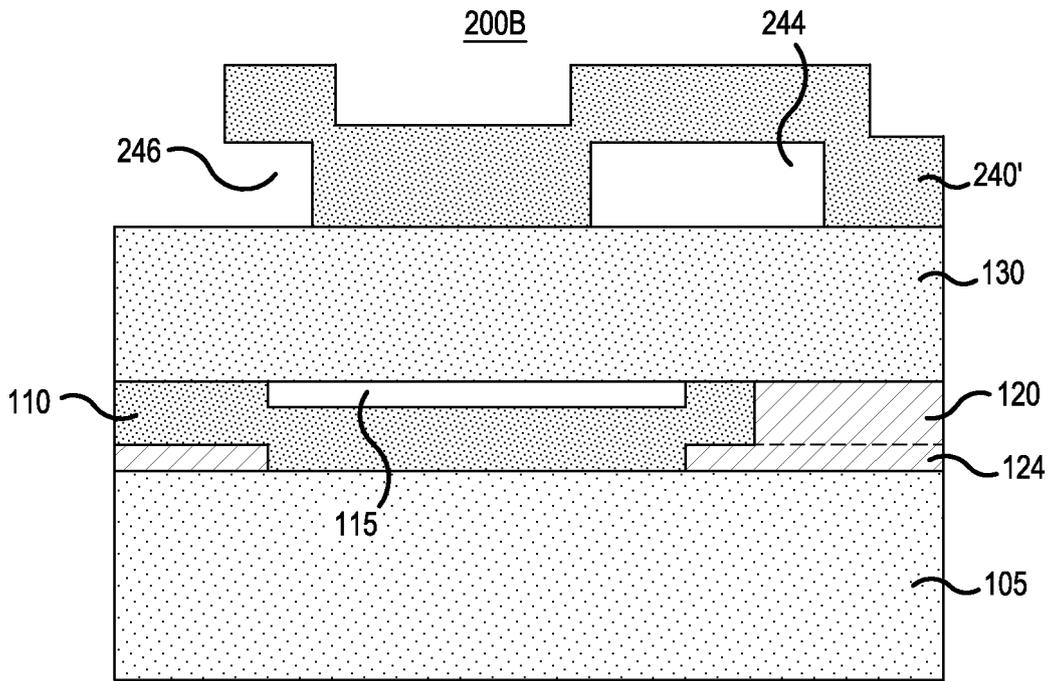


FIG.2B

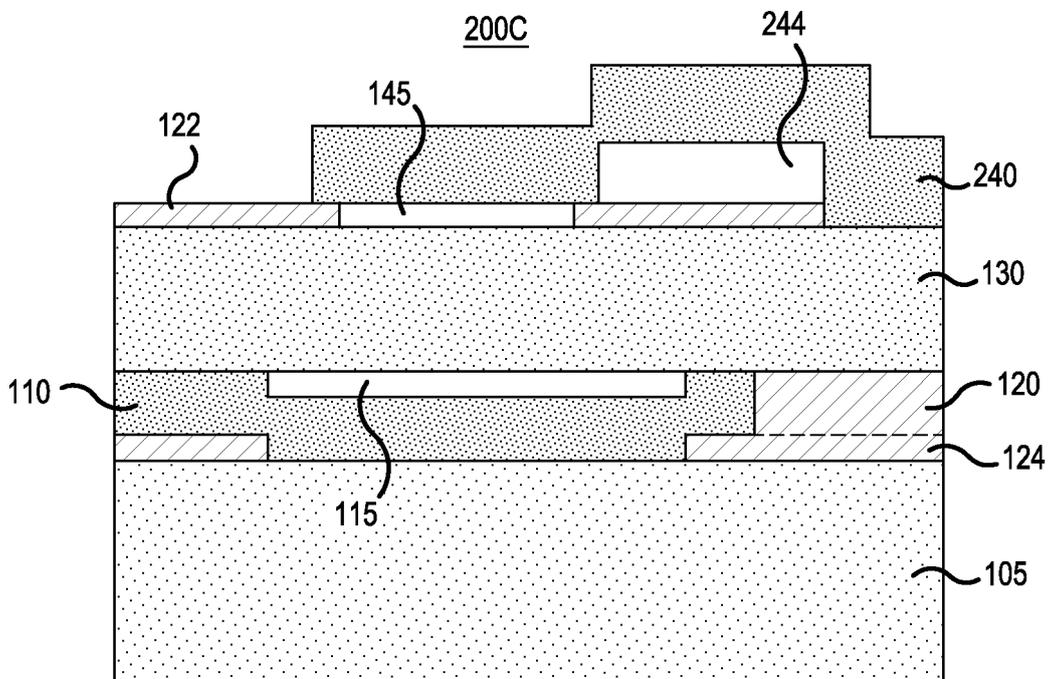


FIG.2C

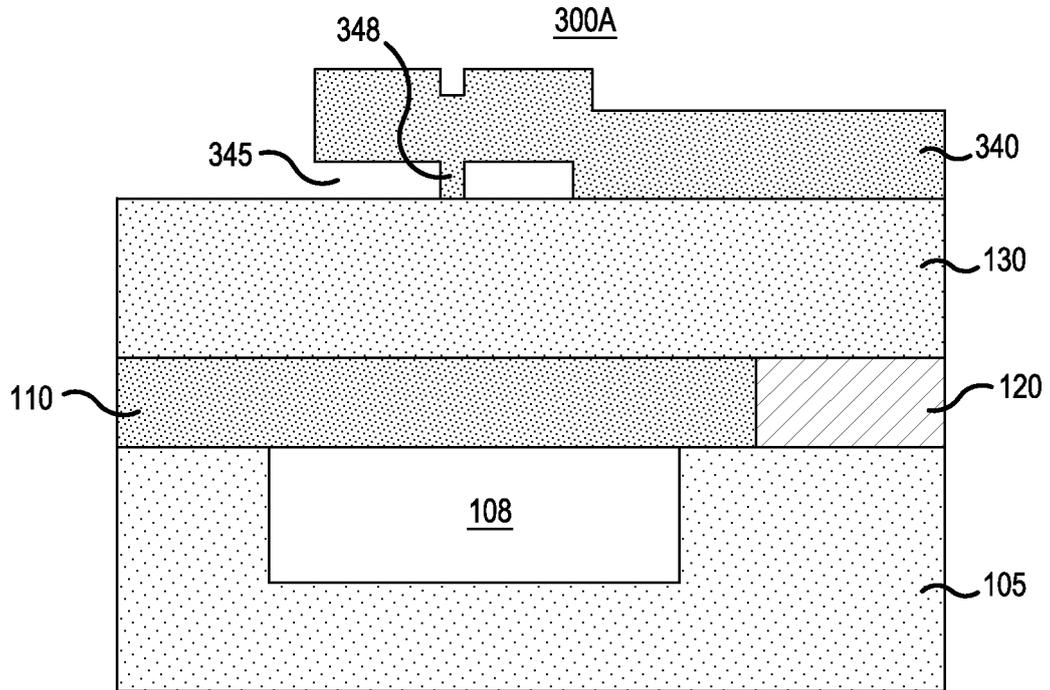


FIG.3A

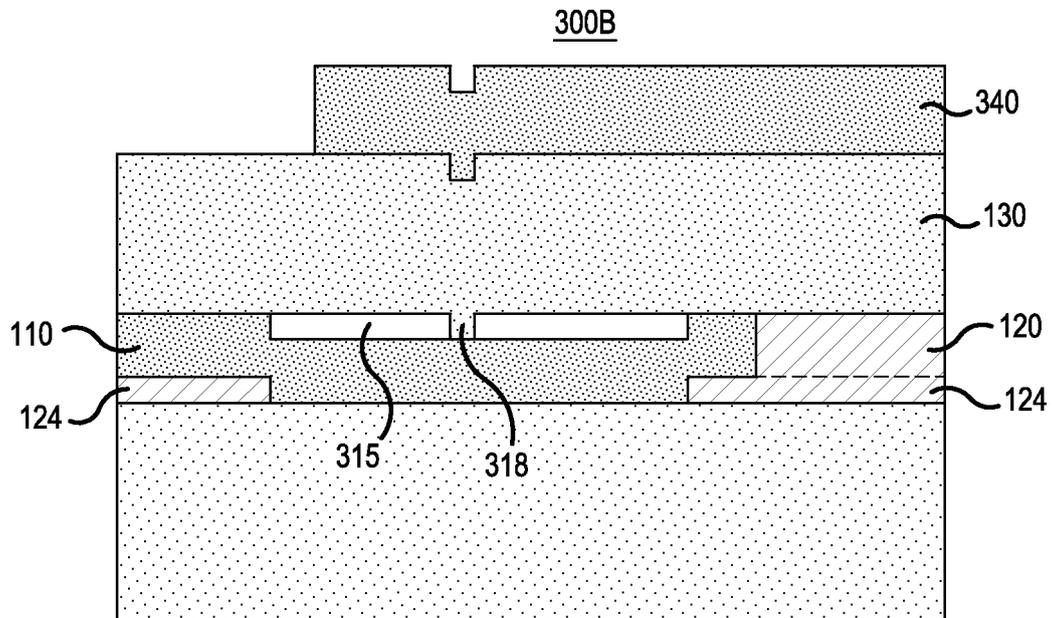


FIG.3B

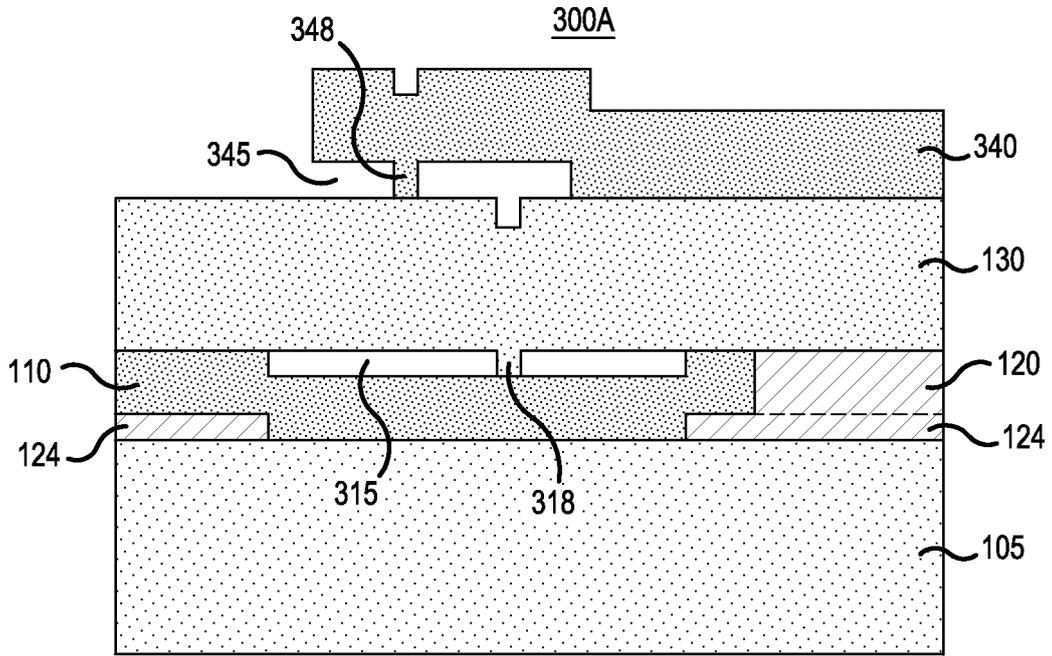


FIG.3C

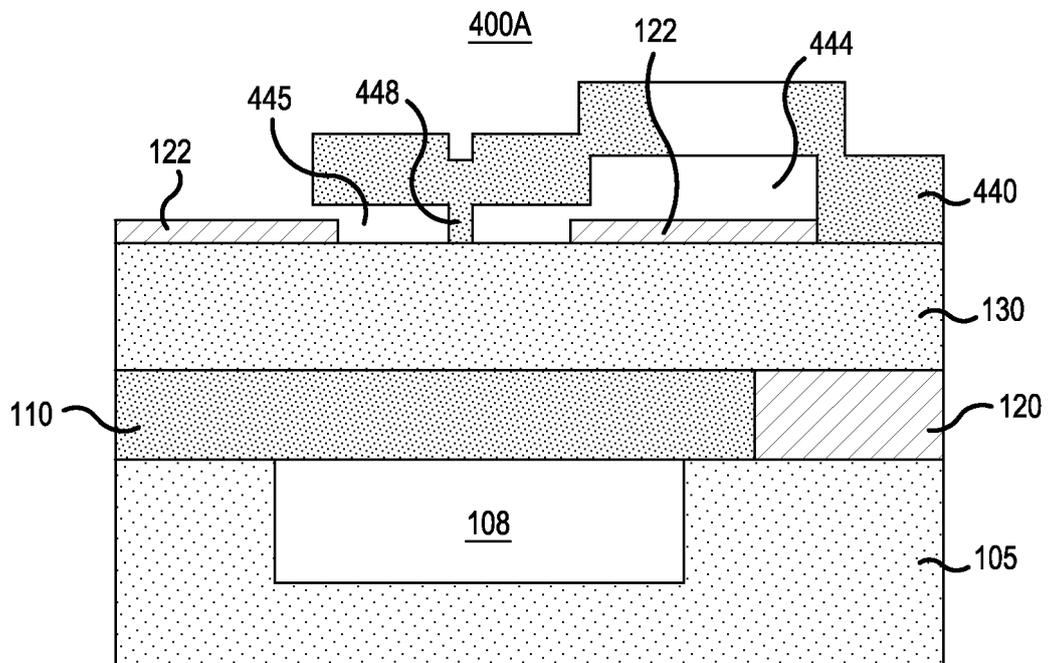


FIG.4A

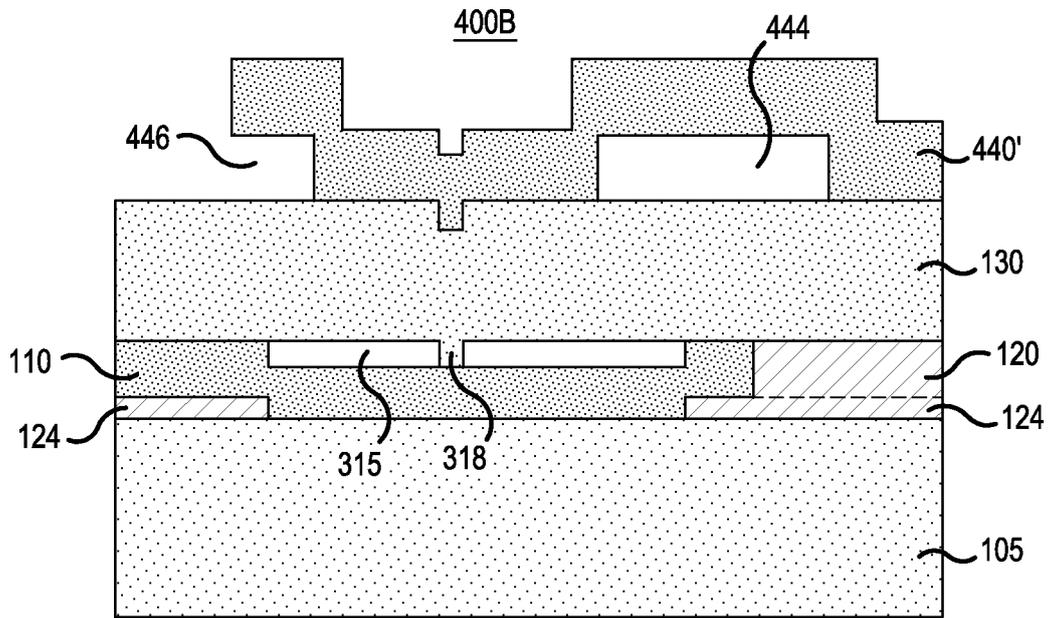


FIG.4B

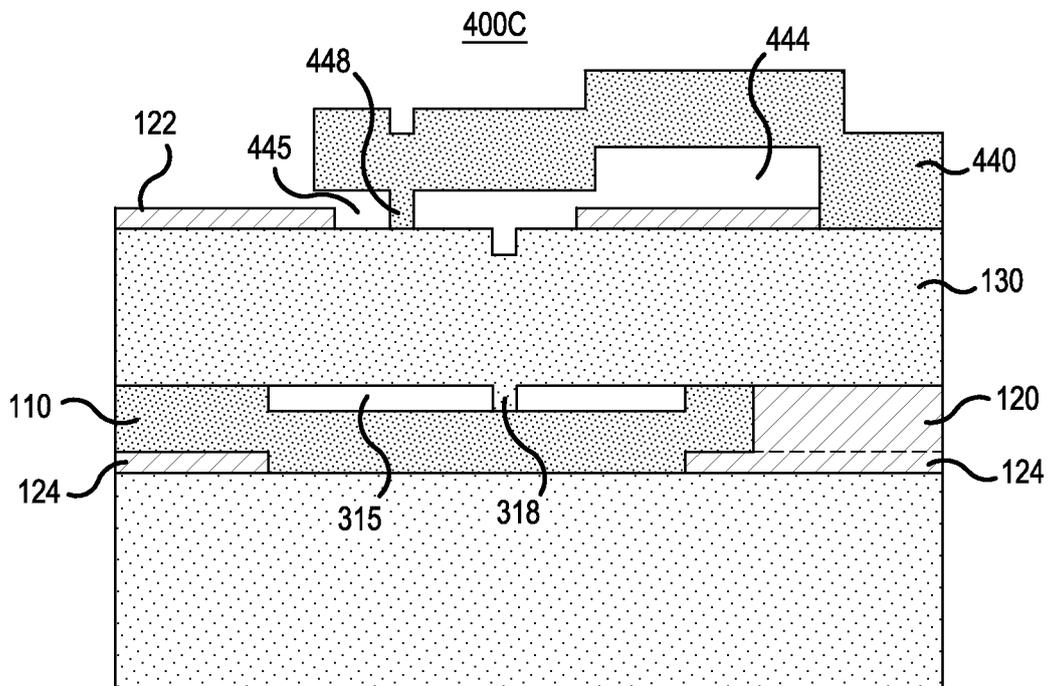


FIG.4C

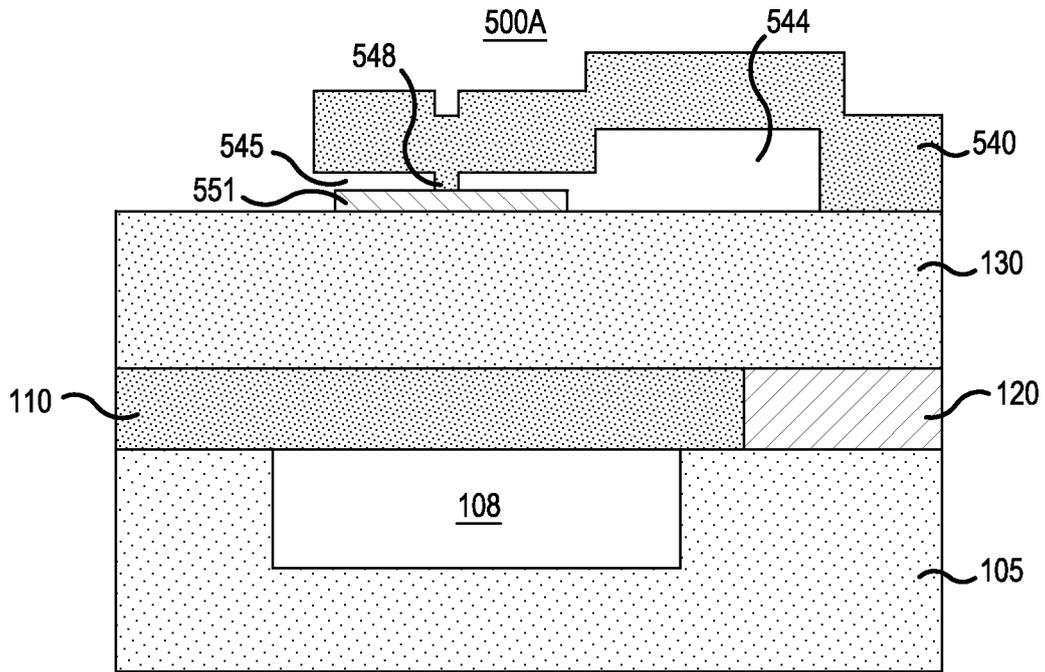


FIG.5A

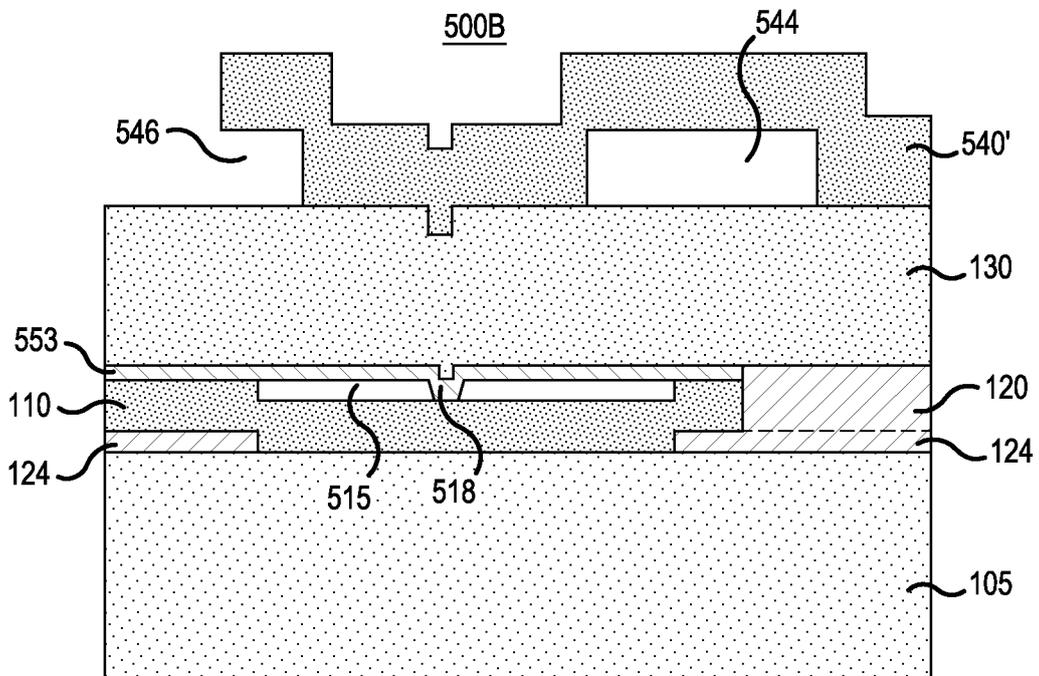


FIG.5B

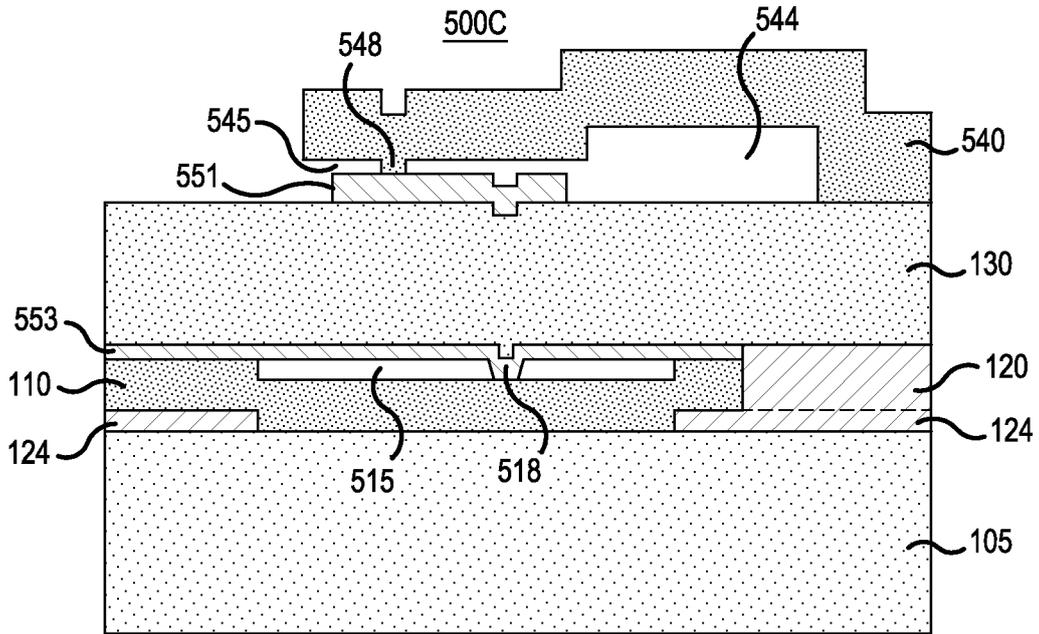


FIG.5C

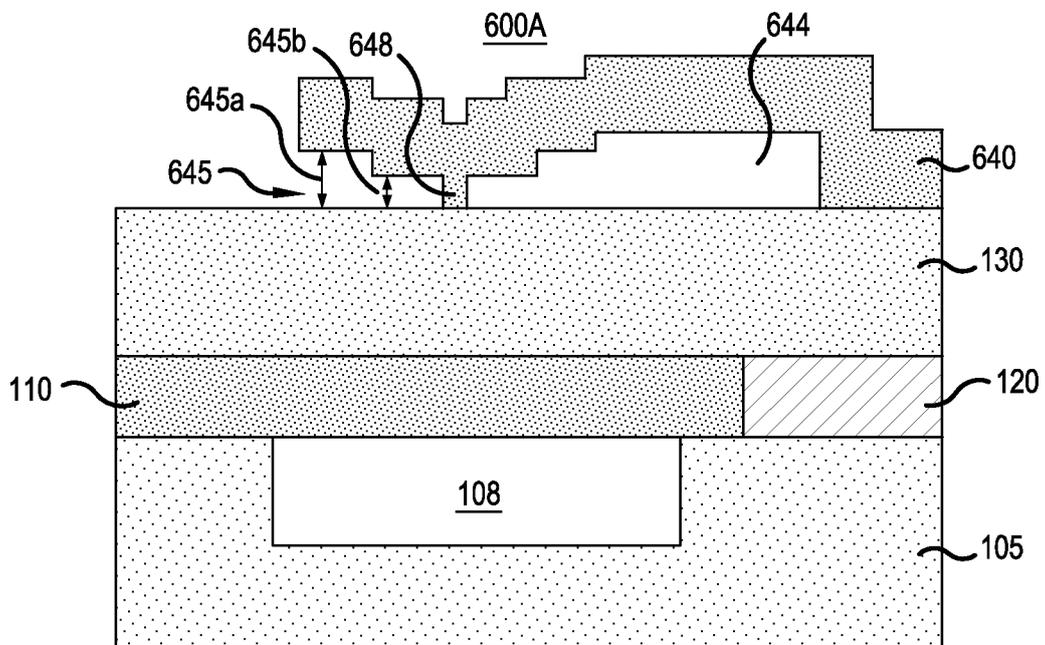


FIG.6A

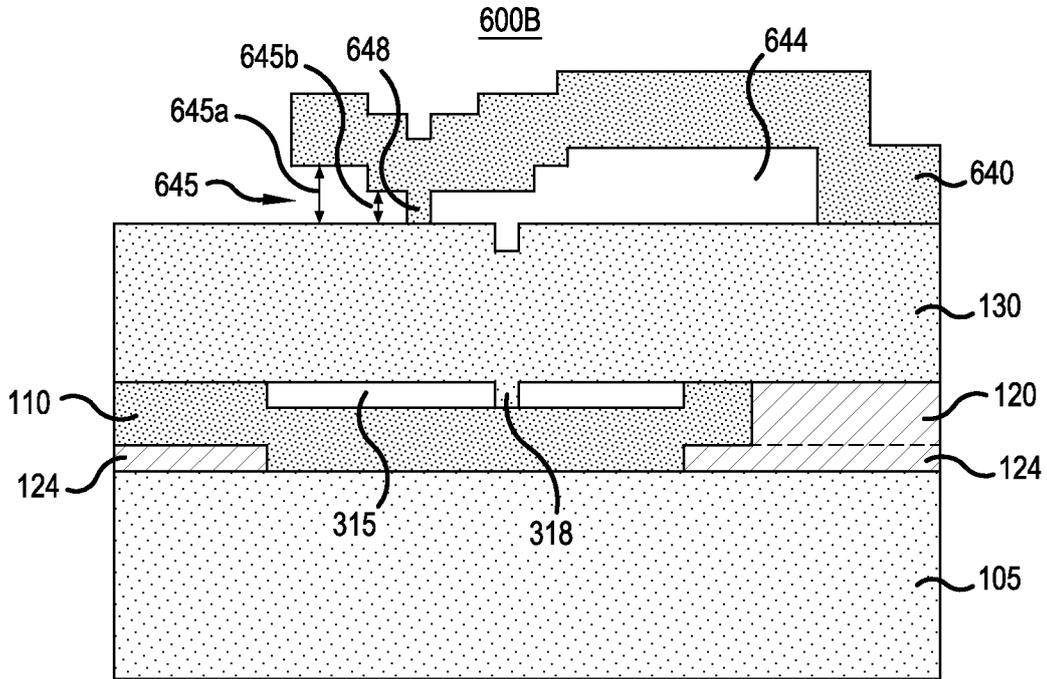


FIG.6B

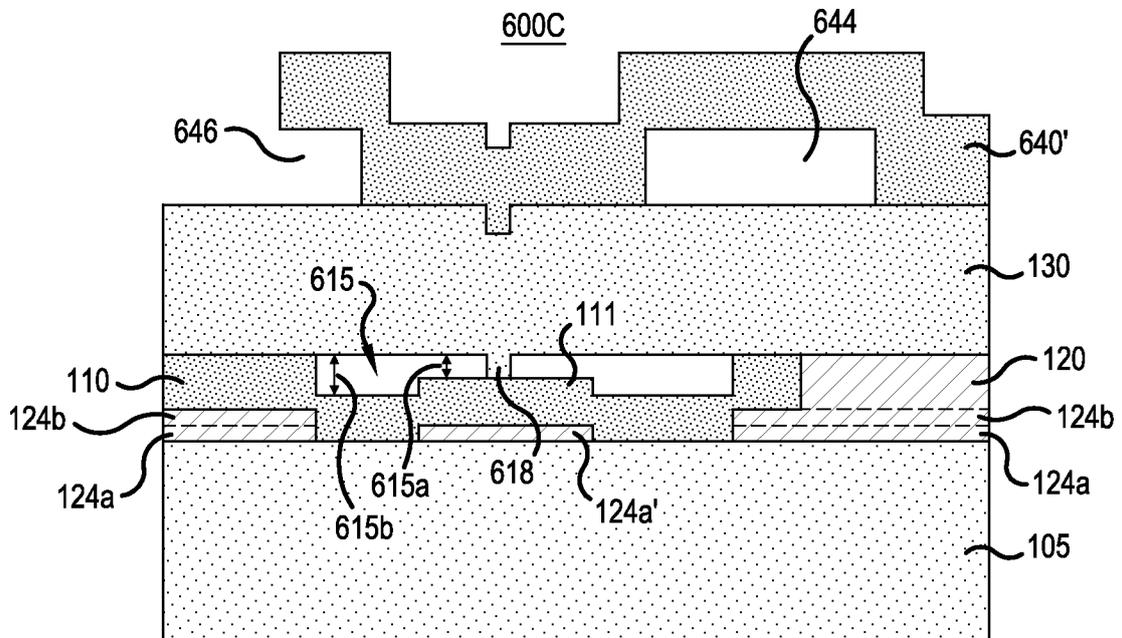


FIG.6C

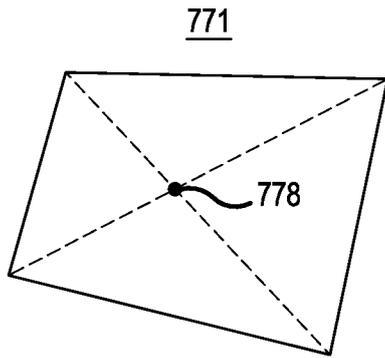


FIG. 7A

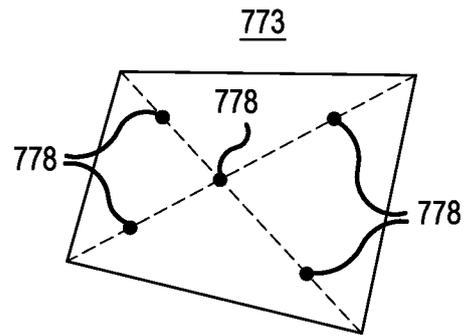


FIG. 7C

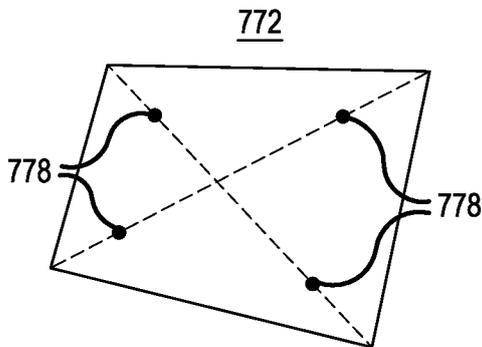


FIG. 7B

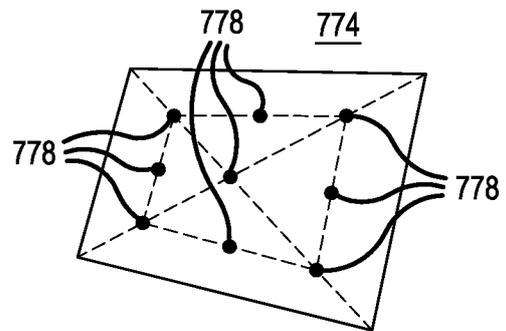


FIG. 7D