(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년05월02일
(11) 등록번호 10-2802116
(24) 등록일자 2025년04월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H03H 9/02 (2006.01) *B81B 3/00* (2006.01)
B81B 7/02 (2024.01) *H03H 3/007* (2006.01)
H03H 3/013 (2006.01) *H03H 9/24* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H03H 9/02448 (2013.01)
B81B 3/0067 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-7036930
(22) 출원일자(국제) 2020년04월15일
심사청구일자 2023년04월04일
(85) 번역문제출일자 2021년11월11일
(65) 공개번호 10-2021-0151924
(43) 공개일자 2021년12월14일
(86) 국제출원번호 PCT/FI2020/050249
(87) 국제공개번호 WO 2020/212648
국제공개일자 2020년10월22일
(30) 우선권주장
20195305 2019년04월15일 핀란드(FI)
(56) 선행기술조사문헌
JP2008545333 A*
(뒷면에 계속)
전체 청구항 수 : 총 26 항

(73) 특허권자
교세라 테크놀로지스 오와이
핀란드 02150 에스포 티에토티에 3
(72) 발명자
사렐라 빌레
핀란드 02150 에스포 티에토티에 3 교세라 티키틴 오와이
야콜라 안티
핀란드 02150 에스포 티에토티에 3 교세라 티키틴 오와이
오야 아르네
핀란드 02150 에스포 티에토티에 3 교세라 티키틴 오와이
(74) 대리인
리앤목특허법인

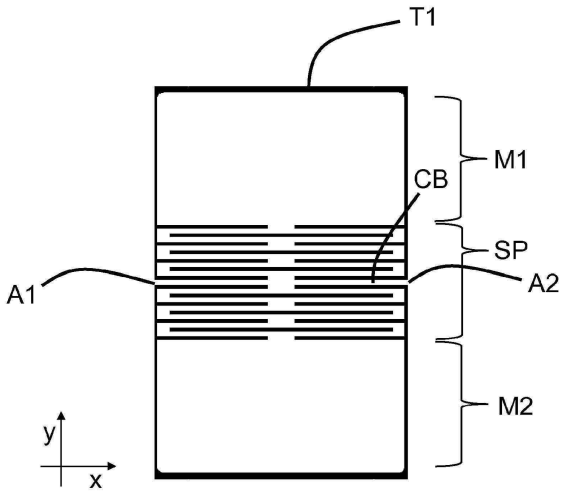
심사관 : 조성찬

(54) 발명의 명칭 **마이크로 전자기계 공진기**

(57) 요 약

마이크로 전자기계(microelectromechanical, MEMS) 공진기는 제1 중량부(M1), 제2 중량부(M2), 및 상기 중량부들 사이의 중앙 스프링부(SP)를 갖는 스프링 질량계를 포함한다.

대 표 도 - 도1a



(52) CPC특허분류
B81B 7/02 (2013.01)
H03H 3/0076 (2013.01)
H03H 3/013 (2013.01)
H03H 9/2473 (2013.01)
H03H 9/2484 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌
JP2016099269 A*
JP2017537500 A*
JP2018522461 A*
WO2012081457 A1*
WO2013005625 A1*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명 세 서

청구범위

청구항 1

마이크로 전자기계 공진기에 있어서, 상기 공진기는 스프링 질량계 (spring-mass system)를 포함하고,

상기 스프링 질량계는:

제1 중량부(first weight portion),

제2 중량부(second weight portion), 및

상기 제1 중량부 및 상기 제2 중량부 사이의 중앙 스프링부(central spring portion)를 가지며,

상기 공진기는 상기 공진기를 작동시키기 위해 압전층(piezoelectric layer)을 포함하며,

상기 공진기는, 적어도 $2*10^{19}$ cm^{-3}의 평균 불순물 농도로 도핑된 실리콘 바디(body of silicon)를 포함하고,

상기 중앙 스프링부의 물질부들(material portions)은 상기 공진기가 진동하도록 구성된 방향으로 y-축에 수직인 x-축을 따라 배향되고,

상기 x-축은 <100> 실리콘 결정 방향을 따라 진행하거나 그 방향에서 5도 미만으로 벗어나는 것인, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 제1 중량부 및 제2 중량부는 대칭 중량부들(symmetric weight portions)인, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 중앙 스프링부는 대칭부(symmetric portion)인, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 중앙 스프링부는, 상기 중앙 스프링부의 제1 단부에서 상기 제1 중량부에 부착되고 상기 중앙 스프링부의 반대 단부에서 상기 제2 중량부에 부착되는 사행 구조(meandering structure)를 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 5

제4 항에 있어서,

상기 제1 중량부 및 상기 제2 중량부는 그들의 에지들에서 상기 중앙 스프링부에 연결되는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 6

제1 항에 있어서,

아코디언 모드 형상(accordion mode shape)을 지원하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 7

제1 항에 있어서,

상기 공진기가 진동하는 상기 공진기의 방향으로 상기 중앙 스프링부의 제1 에지의 중앙과 상기 중앙 스프링부의 반대 에지의 중앙에 앵커링 포인트들(anchoring points)을 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 8

제1 항에 있어서,

상기 중앙 스프링부 또는 상기 스프링 질량계의 질량 중심과 정렬된 앵커링 포인트들을 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 9

제1 항에 있어서,

상기 중앙 스프링부를 주변(surroundings)에 고정하기 위한 앵커링 포인트를 포함하고,

상기 공진기의 메인 공진 모드 형상은 상기 앵커링 포인트에 노드 포인트(nodal point)를 갖는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 10

제1 항에 있어서,

상기 공진기는 반도체 물질, 실리콘, 및 축퇴적으로 도핑된 실리콘(degenerately doped silicon) 중 적어도 하나를 포함하고,

상기 공진기 질량의 50% 이상이 축퇴적으로 도핑된 실리콘으로 구성되고,

상기 공진기는 적어도 $2*10^{19}$ cm^{-3}의 평균 불순물 농도(average impurity concentration)로 도핑된 실리콘 바디(body of silicon)를 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 11

제1 항에 있어서,

상기 공진기는 압전기적으로(piezoelectrically) 작동되도록 구성되는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 12

제1 항에 있어서,

상기 중앙 스프링부는,

트렌치들에 의해 분리되고, <100> 실리콘 결정 방향으로 정렬되거나 그 방향으로부터 5도 미만으로 벗어나는, 암들(arms)을 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 13

제1 항에 있어서,

상기 공진기는 진공에서 작동하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 14

제1 항에 있어서,

상기 중량부들의 단부에 있는 트렌치는 에어 댐핑 효과를 감소시키는 폭(air damping effect reducing width)을 갖는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 15

제1 항에 있어서,

상기 제1 중량부 및 제2 중량부는 트렌치들의 그리드(grid)를 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 16

제1 항에 있어서,

SOI(silicon-on-insulator) 웨이퍼 상에 제조되는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 17

제1 항에 있어서,

32 kHz 주파수 대역에서 작동하도록 구성된, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 18

제1 항에 있어서,

상기 중앙 스프링부는 직사각형 다이(rectangular die)의 대각선을 따라 배향되는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 19

제1 항에 있어서,

상기 스프링 질량계는 상기 제1 중량부 및 제2 중량부에 부착된 추가 지지 스프링들(additional support springs)을 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 20

제1 항에 있어서,

상기 공진기의 제1 부분(first part)은 축퇴적으로 도핑된 실리콘층에 있고, 상기 공진기의 제2 부분(second part)은 상기 축퇴적으로 도핑된 실리콘층의 아래(beneath) 또는 위(above) 또는 양 측면들 상에(on both sides) 형성된 SiO_2층에 있는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 21

제1 항에 있어서,

측면 질량들(side masses)을 갖는 음차(音叉)(tuning fork)의 형상으로 배치되는 상기 중앙 스프링부 및 상기 제1 중량부와 제2 중량부를 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 22

제1 항에 있어서,

일렬로 위치되고 공유 질량 요소들(shared mass elements) 또는 연결 빔들과 연결된 양단형(double-ended) 음차 공진기들 세트를 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 23

제1 항에 있어서,

상부 전극층과 하부 전극층 사이에 실리콘 산화물층이 있는 재료 스택(materials stack)을 포함하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 24

제1 항에 있어서,

제3 중량부 및 제4 중량부를 더 포함하고,

상기 중앙 스프링부는 그 중앙 스프링부의 중앙에 기계적 앵커가 있는 십자 형태로 배열되는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 25

제1 항에 있어서,

반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들, 및 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극을 포함하는 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 26

제1 항에 있어서,

평면 내 굴곡 진동 작동 모드(flexural vibration mode of operation) 또는 평면 외 굴곡 진동 작동 모드를 지원하는, 마이크로 전자기계 공진기.

청구항 27

삭제

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 일반적으로 마이크로 전자기계(microelectromechanical, MEMS) 공진기에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 이 섹션은 최신 기술을 대표하는 여기에 설명된 기술의 승인 없이 유용한 배경 정보를 설명한다.

[0003] 저주파 클록 기준들(Low frequency clock references)은 일반적으로 32.768 kHz 석영 음차(音叉) 공진기들(quartz tuning fork resonators)과 같은 석영 음차 공진기들로부터 얻는다.

[0004] 마이크로 전자기계(microelectromechanical, MEMS) 공진기들은 비용 절감, 칩 크기 감소, 충격과 진동에 대한 견고성(robustness) 증가, 및 넓은 온도 범위에서 더 나은 안정성과 같은 이점들과 함께 석영 음차들과 동일한 기능을 제공하도록 개발되고 있다.

[0005] 주파수 기준 애플리케이션들(frequency reference applications)에 사용되는 실리콘 MEMS 공진기와 같은 MEMS 공진기들의 핵심 성능 매개변수는 등가 직렬 저항(equivalent series resistance, ESR)이다. ESR은 공진기의 품질 계수(quality factor)(Q)에 반비례하므로, 이 매개변수의 최대화는 종종 바람직하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 특정 실시예들의 목적은 원하는 특성(properties)을 갖는 마이크로 전자기계 공진기를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 제1 예시적인 측면에 따르면, 제1 중량부(first weight portion), 제2 중량부(second weight portion), 및 상기 중량부들 사이의 중앙 스프링부(central spring portion)를 갖는 스프링 질량계(spring-mass system)를 포함하는 마이크로 전자기계 공진기가 제공된다.

[0008] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 적어도 $2*10^{19}$ cm^{-3}의 평균 불순물 농도로 도핑된 실리콘 바디(body of silicon)를 포함하고, 상기 중앙 스프링부의 물질부들(material portions)은 상기 공진기가 진동하도록 구성된 방향인 y-축에 수직인 x-축을 따라 배향되고(oriented), 상기 x-축은 <100> 실리콘 결정 방향을 따라 진행하거나 그 방향에서 5도 미만으로 벗어난다.

[0009] 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부는 트렌치들에 의해 분리되고, <100> 실리콘 결정 방향으로 정렬되거나 그 방향으로부터 5도 미만으로 벗어나는 암들(arms)을 포함한다.

[0010] 특정 실시예에서, 상기 제1 및 제2 중량부는 대칭 중량부들(symmetric weight portions)이다.

[0011] 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부는 대칭부(symmetric portion)이다.

[0012] 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부는 제1 단부에서 상기 제1 중량부에 부착되고 반대 단부에서 상기 제2 중량부에 부착되는 사행 구조(meandering structure)를 포함한다.

[0013] 특정 실시예에서, 상기 제1 중량부 및 상기 제2 중량부는 에지들에서 상기 중앙 스프링부에 연결된다.

[0014] 특정 실시예에서, 상기 제1 및 제2 중량부는 전방, 후방, 우측, 및 좌측 에지들을 포함한다. 에지들 중 상기 전방 에지(front edge)는 상기 중앙 스프링부를 향하는(faces) 에지이다. 특정 실시예에서, 상기 제1 중량부는 상기 전방 및 좌측 에지를 연결하는 코너, 및 상기 전방 및 우측 에지를 연결하는 코너에서 상기 중앙 스프링부에 연결된다. 유사하게, 상기 제2 중량부는 상기 전방 및 좌측 에지를 연결하는 코너, 및 상기 전방 및 우측 에지를 연결하는 코너에서 상기 중앙 스프링부에 연결된다. 특정 실시예에서, 상기 제1 및 제2 중량부는 상기 전방 에지의 중앙에 있는 영역에서 상기 중앙 스프링부에 연결된다.

[0015] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 아코디언 모드 형상(accordion mode shape)을 지원한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 평면 내 굴곡 모드(in-plane flexural mode)에서 작동한다. 그러나, 다른 특정 실시예에서, 상기 공진기는 평면 외 모드(out-of-plane mode)에서 작동한다. 따라서, 특정 실시예에서, 상기 공진기는 평면 내 굴곡 진동 작동 모드(flexural vibration mode of operation) 또는 평면 외 굴곡 진동 작동 모드를 지원한다.

[0016] 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부는 대칭적으로 배치된(placed) 폴디드 스프링들(folded springs)을 포함한다(또는 그로 형성된다). 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링 포팅(porting)은 서로 직렬로 부착되거나 서로 평행하게 부착된 언폴디드 스프링들(unfolded springs)을 포함한다(또는 그로 형성된다).

[0017] 특정 실시예에서, 상기 제1 중량부 및 상기 제2 중량부는 대칭적으로 진동하도록 구성된다.

[0018] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 대칭적으로 위치된 앵커링 포인트들(anchoring points)을 포함한다.

[0019] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 상기 공진기가 진동하는 상기 공진기의 방향으로 상기 스프링부의 제1 에지의 중앙과 반대 에지의 중앙에 앵커링 포인트들을 포함한다. 상기 방향(y-방향, 설명의 뒷부분에서 정의됨)은 상기 중량부들의 형태(form)에 따라 상기 공진기의 길이 방향 또는 폭 방향일 수 있다. 언급된 에지들은 상기 공진기의 측면 에지들(side edges)을 형성할 수 있다.

[0020] 특정 실시예에서, 상기 스프링부 내의 상기 앵커링 포인트들의 수는 2개이다. 특정 실시예에서, 상기 앵커링 포인트들은 상기 공진기를 주변(또는, 주변 기판)에 고정하기 위한 것이다. 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부는 앵커링 포인트로 이어지는 연결 빔(connecting beam)을 포함한다. 특정 실시예에서, 상기 연결 빔은 상기 중앙 스프링부 또는 상기 스프링 질량계의 중심과 정렬된다. 특정 실시예에서, 상기 연결 빔은 상기 중앙 스프링부의 사행 형상(meandering shape)으로부터 앵커링 포인트까지 연장된다.

[0021] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 상기 중앙 스프링부 또는 상기 스프링 질량계의 질량 중심과 정렬된 앵커링 포인트들을 포함한다.

[0022] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 상기 중앙 스프링부를 주변에 고정하기 위한 앵커링 포인트를 포함하고, 상기 공진기의 메인 공진 모드 형상은 상기 앵커링 포인트에 노드 포인트(nodal point)를 갖는다.

[0023] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 반도체 물질을 포함한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 실리콘을 포함한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 축퇴적으로 도핑된 실리콘(degenerately doped silicon)을 포함한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기 질량의 50% 이상이 축퇴적으로 도핑된 실리콘으로 구성된다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 적어도 10^{20} cm^{-3}와 같이 적어도 $2*10^{19}$ cm^{-3}의 평균 불순물 농도(average impurity concentration)로 도핑된 실리콘 바디(body of silicon)를 포함한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 (단결정(single crystalline)) 실리콘 MEMS 공진기이다.

[0024] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 압전기적으로(piezoelectrically) 작동되도록 구성된다.

[0025] 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부의 개별 스프링 요소들의 종(縱)축(longitudinal axis)은 실리콘의 [100] 결정 방향을 따라 배향된다(oriented). 따라서, 특정 실시예에서 (연장된(elongated)) 상기 중앙 스프링부의 물질부들(material portions)은 상기 공진기가 진동하도록 구성된 방향인 y-축에 수직인 x-축을 따라 배향되고, 상기 x-축은 <100> 실리콘 결정 방향을 따라 진행하거나 그 방향에서 5도 미만으로 벗어난다. 특정 실시예에서,

본 명세서의 상기 물질부들은 트렌치들에 의해 서로 (y-방향으로) 분리된 직선부들(straight portions) 또는 개별 스프링 요소들을 포함한다.

[0026] 특정 실시예에서, 상기 공진기의 상기 종축은 상기 공진기가 진동하는 방향으로 정의된다.

[0027] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 진공에서 작동한다.

[0028] 특정 실시예에서, 상기 중량부들의 단부(또는, 후방 에지)의 트렌치는 에어 댐핑 효과(air damping effect)를 감소시키는 폭을 갖는다. 상기 폭은 해당 실시예에 따라 다르다. 특정 실시예에서, 5 μm보다 큰 폭이 적용된다.

[0029] 특정 실시예에서, 상기 중량부들의 상기 후방 에지는 상기 공진기의 외부 단부(outer end)이다.

[0030] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 트렌치들의 그리드(grid)를 포함하는 상기 제1 및 제2 중량부를 포함한다.

[0031] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 실리콘 온 인슐레이터(silicon-on-insulator), SOI, 웨이퍼(또는, SOI 유형의 웨이퍼) 상에 제조된다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 C-SOI(Cavity SOI) 웨이퍼 상에 제조된다.

[0032] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 32.768 kHz 주파수와 같은 32 kHz 주파수 대역에서 작동하도록 구성된다.

[0033] 특정 실시예에서, 상기 중앙 스프링부는 직사각형 다이(rectangular die)의 대각선을 따라 배향된다.

[0034] 특정 실시예에서, 상기 스프링 질량계는 상기 제1 및 제2 중량부에 부착된 추가 지지 스프링들(additional support springs)을 포함한다.

[0035] 특정 실시예에서, 상기 지지 스프링들은 상기 중앙 스프링부의 스프링(들)에 추가된다. 따라서, 상기 지지 스프링들은 상기 중앙 스프링부로부터 분리된다. 특정 실시예에서, 상기 지지 스프링들은 상기 제1 및 제2 중량부의 상기 후방 에지(즉, 상기 중앙 스프링부에 대면하는 에지에 대향하는 에지)에 부착된다.

[0036] 특정 실시예에서, 상기 공진기의 제1 부분(first part)은 축퇴적으로 도핑된 실리콘층에 있고, 상기 공진기의 제2 부분(second part)은 상기 축퇴적으로 도핑된 실리콘층의 아래(beneath) 또는 위(above) 또는 양 측면들 상에(on both sides) 형성된 SiO_2층에 있다.

[0037] 특정 실시예에서, 실리콘 산화물 SiO_2 층은 SiO_2 층이 축퇴적으로 도핑된 실리콘층을 두 부분으로 분할하도록 축퇴적으로 도핑된 실리콘층 옆에 또는 축퇴적으로 도핑된 실리콘층의 중앙에 위치된다.

[0038] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 y-축 방향으로 진동한다. 상기 중앙 스프링부에 의해 연결된 상기 제1 및 제2 중량부는 서로 가까워지거나 멀어지는 주기적인 움직임을 겪는다. 특정 실시예에서, 상기 움직임은 전후 움직임(back-and-forth movement)이다. 특정 실시예에서, 좌표계(coordinate system)는 y-축이 상기 공진기의 길이 방향(longitudinal direction)이고 x-축이 y-축에 수직이도록 선택되지만, 실시예에 따라 상기 공진기는 y-방향보다 x-방향(또는, 동일하게 긴)으로 더 길 수 있다. 상기 제1 중량부는 y-방향으로 상기 제2 중량부로부터 이격된다. 특정 실시예에서, y-방향은 상기 제1 중량부의 질량 중심 및 상기 제2 중량부의 질량 중심을 통과하는(가는) 방향으로 정의된다. 특정 실시예에서, y-방향은 상기 중앙 스프링부가 (상기 공진기의 평면에서) 진동하도록 허용되는 방향으로 정의된다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 단일 평면에서만 진동한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기는 1차원(+y 및 -y 방향)으로만 진동한다. 특정 다른 실시예에서, 상기 공진기는 평면 외 모드(out-of-plane mode)(+z 및 -z 방향)에서 진동한다.

[0039] 특정 실시예에서, 앞서 언급된 언폴디드 스프링들 상의 상기 폴디드 스프링들의 더 작은 치수(smaller dimension)(y-방향의 폭)는 동일하다. 특정 실시예에서, 상기 폴디드 스프링들 또는 언폴디드 스프링들은 상기 중앙 스프링부 내에서 반복 구조(repeating structure)를 형성한다.

[0040] 특정 실시예에서, 상기 공진기 구조는 반사 대칭(reflection symmetry)을 갖는다. 특정 실시예에서, 상기 공진기 구조는 거울 대칭(mirror symmetry)을 갖는다. 특정 실시예에서, 상기 거울 대칭은 x-축 및/또는 y-축에 대한 것이다. 특정 실시예에서, x-축과 y-축의 교차점은 상기 공진기 구조의 질량 중심에 있다. 특정 실시예에서, 상기 공진기 구조는 회전 대칭(rotational symmetry)을 갖는다.

[0041] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 측면 질량(side masses)을 갖는 음차(音叉)(tuning fork)의 형상으로 배치되는 상기 제1 및 제2 중량부들 및 상기 중앙 스프링부를 포함한다.

[0042] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 일렬로 위치되고 공유 질량 요소들(shared mass elements) 또는 연결 빔들과

연결된 양단형(double-ended) 음차 공진기들 세트를 포함한다.

[0043] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 다음을 포함한다:

[0044] 상부 전극층과 하부 전극층 사이에 실리콘 산화물층이 있는 재료 스택(materials stack).

[0045] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 제3 및 제4 중량부들을 더 포함하고, 상기 중앙 스프링부는 중앙에 기계적 앵커가 있는 십자 형태로 배열된다.

[0046] 특정 실시예에서, 상기 공진기는 반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들 및 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극(또는, 장치층(device layer))을 포함한다.

[0047] 특정 실시예에서, 실리콘 MEMS 공진기의 "아코디언(accordion)" 유형이 개시된다. 대칭적인 제1 및 제2 중량부들은 상기 중앙 스프링부(또는, 상기 스프링 질량계)의 스프링 상수(spring constant)에 의해 제어(또는, 지시)된 대로 진동(vibrate)(또는, 진동(oscillate))한다. 특정 실시예에서, 상기 공진기의 변환(transduction)은 압전기 박막(piezoelectric thin film)을 사용하는 것을 기반으로 한다.

[0048] 특정 실시예에서, 낮은 음향 손실, 즉, 높은 품질 계수, 및 낮은 ESR을 갖는 공진기 구조들이 개시된다. 상기 공진기가 Si 결정 구조에 대해 올바른 정렬(alignment)로 인이 많이 도핑된 실리콘(heavily phosphorus-doped silicon)에 제작될 때, 넓은 온도 범위에 걸쳐 우수한 주파수 안정성을 얻을 수 있다.

[0049] 다른(different) 구속력이 없는(non-binding) 예시적인 측면 및 실시예가 앞서 제시되었다. 상기(above) 실시예 및 이 설명에서 나중에 설명되는 실시예는 본 발명의 구현에서 활용(또는 이용)될 수 있는 선택된 측면(aspects) 또는 단계(steps)를 설명하는 데 사용된다. 대응하는 실시예가 다른 예시적인 측면에도 적용된다는 것을 이해(또는 인식)해야 한다(appreciated). 실시예의 임의의 적절한 조합이 형성될 수 있다.

발명의 효과

[0050] 본 명세서에 설명된 실시예들에 따르면, 원하는 특성(properties)을 갖는 마이크로 전자기계 공진기를 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0051] 이제 본 발명은 첨부(accompanying) 도면을 참조하여 단지 예로서 설명될 것이며, 여기서:

도 1a는 특정 실시예에 따른 마이크로 전자기계(microelectromechanical, MEMS) 공진기를 도시한다.

도 1b는 특정 실시예에 따른 수정된 MEMS 공진기를 도시한다.

도 2는 특정 실시예에 따른 추가(further) MEMS 공진기를 도시한다.

도 3은 도 1a의 MEMS 공진기의 특정 치수들(dimensions)을 도시한다.

도 4는 도 1a에 도시된 유형의 MEMS 공진기에 관한 실험 결과를 도시한다.

도 5는 특정 실시예에 따른 추가 MEMS 공진기를 도시한다.

도 6은 특정 실시예에 따른 대각선 디자인(diagonal design)을 갖는 MEMS 공진기를 도시한다.

도 7은 특정 실시예에 따른 추가 지지 스프링들을 갖는 MEMS 공진기를 도시한다.

도 8은 특정 실시예에 따른 압전기적으로(piezoelectrically) 작동되는 공진기의 단면도를 도시한다.

도 9는 도 8의 공진기에 대한 전극 패턴의 예를 도시한다.

도 10은 특정 실시예에 따른 MEMS 공진기의 대안적인(alternative) 단면도를 도시한다.

도 11은 도 10의 공진기에 대한 전극 패턴의 예를 도시한다.

도 12a 내지 도 12c는 또 다른 실시예에 따른 MEMS 공진기들의 단면도들을 도시한다.

도 13은 특정 실시예에 따른 트리밍 웨이트층(trimming weight layer)을 갖는 MEMS 공진기를 도시한다.

도 14는 특정 실시예에 따른 음차 유형의 MEMS 공진기를 도시한다.

도 15는 특정 실시예에 따른 대각선 디자인을 갖는 추가 MEMS 공진기를 도시한다.

도 16a 내지 도 16c는 특정 실시예에 따른 추가 음차 공진기들을 도시한다.

도 17 내지 도 21은 특정 실시예에 따른 양단형(double-ended) 음차 유형의 MEMS 공진기들을 도시한다. 그리고

도 22는 특정 실시예에 따른 회전(rotational) MEMS 공진기를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0052] 다음 설명에서 유사한 숫자들은 유사한 요소들을 나타낸다.

[0053] 도 1a는 특정 실시예에 따른 마이크로 전자기계(microelectromechanical, MEMS) 공진기를 도시한다. 보다 상세하게, 도 1a는 공진기 구조의 평면도를 도시한다. 좌표계는 y-축이 공진기의 길이 방향이고 x-축이 y-축에 수직이 되도록 선택된다. 공진기는 y-축 방향으로 진동한다.

[0054] 도 1a(및 다른 도면들에서)의 흑색 부분들(black portions)은 트렌치들, 즉 일반적으로 식각된(etched away), 제조 공정에서 제거된 층(일반적으로 SOI 웨이퍼의 실리콘층)의 부분을 나타낸다. 제시된 구조 내의 흰색 부분(white portion)은 물질부들(material portions), 일반적으로 실리콘 또는 축퇴적으로 도핑된 실리콘 영역들을 나타낸다. 따라서 공진기 기하학적 구조(또는, 형상)(geometry)이 정의된다. 압전기적 작동을 위한 전극 기하학적 구조(또는, 형상)은 도 1a에 그려지지 않았다.

[0055] 참조 부호들 A1 및 A2는 주변 기판에 대한 앵커링 포인트들(points of anchoring)을 나타낸다. MEMS 공진기는 대칭적인 중량부들(symmetric weight portions)(M1, M2)을 갖는 스프링 질량계(spring-mass system)로 설명되며, 여기서 질량 M1=M2=M이다. 중량부들은 중앙 스프링부(central spring portion)(SP)에 의해 연결된다.

[0056] 중앙 스프링부(SP)는 폴디드(접히는) 스프링들(또는, 동등하게, 직렬로 또는 병렬로 서로 부착된 여러 개의 언폴디드(펼쳐진) 스프링들)을 포함한다. 복합(compound) 스프링 상수는 작은 공간(footprint)에서 저주파의 공진 모드를 지원하기 위해 낮게 만들 수 있다.

[0057] 공진기의 주파수 f는 f = 1/(2 pi) x sqrt(K/M) 이다.

[0058] 식에서, 중앙 스프링부의 스프링 상수는 K로 표시된다.

[0059] 공진기의 모드 형상은 "아코디언 모드", 즉, 중량부들(M1, M2)이 +y 및 -y 방향으로 대칭적으로 진동한다.

[0060] 공진기의 정렬(alignment)과 관련하여, x-축 및 y-축은 <100> 실리콘 결정 방향들(또는, 그 방향들로부터 5도 미만으로 벗어남)을 따라 진행하는 것이 바람직하다. 특정 실시예에서, 폴디드 스프링들의 길이 방향, 즉, x-방향은 [100] 결정 방향(또는, 그 방향으로부터 5도 미만으로 벗어남)을 따라 배향된다.

[0061] 도 1a에 개시된 구조는 구조의 질량 중심을 통과하는 x-축 및 y-축 모두에 걸쳐 거울 대칭을 갖는다. 대칭성을 가짐으로써, (메인)공진 모드 형상의 좋은 노드 포인트를 얻을 수 있으며, 구조의 측면(side) 에지들 중간에 위치하는 앵커링 위치들(A1, A2)에 나타나며, 따라서 높은 품질 계수(진공 상태에서)로 이어진다.

[0062] 참조 부호 T1은 y-방향(메인 공진 모드에서 진동 방향)과 평행하지 않고 질량들(M1, M2)의 측면들에 있는 트렌치를 나타낸다. 특정 실시예에서, 트렌치(T1)는 압력에 대한 품질 계수의 의존성을 감소시키기 위하여 에어 댐핑 효과를 감소시키고, (공명기의 일반적인 최종 작동 조건은 진공 캡슐화(vacuum encapsulation)로 달성된 진공 상태임에도 불구하고) 대기압에서도 장치들을 측정할 수 있도록 대기압에서 충분한 품질 계수를 제공하기 위해 5 μm 보다 크다.

[0063] 도 1a에 도시된 실시예의 변형에서, 개별 스프링 치수들은 조정(조절)될 수 있다. 또한, 질량(중량부) 치수들이 다를 수 있다(vary). 또한, 중앙 스프링부 내의 스프링들의 수는 다를 수 있다. 앞의 내용은 모든 실시예에 적용된다.

[0064] 제1 중량부(M1)(유사하게 제2 중량부(M2))는 중앙 스프링부(SP)에 마주하는 전방 에지, 우측면(right side)의 우측 에지, 좌측면(left side)의 좌측 에지, 및 공진기 구조의 단부의 후방 에지를 갖는다.

[0065] 중량부들(M1, M2)이 도 1a에 도시된 실시예에서 전방 에지(들)의 중심 영역을 통해 중앙 스프링부(SP)에 연결(또는, 기계적으로 부착)되는 반면, 도 1b에 도시된 대안적인 실시예는 전방 에지의 코너들(전방 에지(들)와 우측 및 좌측 에지들 연결)에서만 중앙 스프링부에 대한 기계적 부착을 개시한다. 도 1b에 도시된 부착물

(attachment)은 두 개의 중량부들을 중앙 스프링부에 부착하여 안정성을 향상시키는 두 포인트들을 나타낸다.

[0066] 도 1a 및 도 1b에 도시된 바와 같이, 연결 빔들(CB)은 구조의 질량 중심으로부터 앵커링 위치들(A1, A2)까지 x-방향으로 연장된다. 따라서, 중앙 스프링부는 두 포인트들에 의해 주변 기판에 부착되고, 하나 또는 두 포인트들에 의해 각각의 중량부들에 부착된다.

[0067] 도 2는 도 1a와 유사한 디자인을 보여주지만, 장치가 SOI(silicon-on-insulator) 웨이퍼에서 제조될 때 매립된(buried) 산화물층의 방출(release)을 가능하게 하는 작은 트렌치들의 그리드(grid)를 포함하는 질량(중량)부들이 있다. 또한, 도 2는 주변 기판에 공진기를 더 강하게 고정하기 위해 더 짧은 연결 빔(CB) 길이를 제공하기 위해 약간 다른 중앙 부분(section)을 보여준다. 중앙 스프링부의 중앙 부분은 구조를 더 강하게 만들기 위해 확장된 물질 영역을 포함한다. 확장된 영역은 (사행(구불구불한)(meandering)) 스프링들이 없다. 그것에는 복수의 트렌치들이 포함될 수 있다. 트렌치들은 대칭적으로 배치될 수 있다.

[0068] 도 3은 도 1a의 공진기의 치수들를 도시한다. 이들은 예를 들어 대략 32 kHz의 주파수에서 작동하는 공진기를 생성하는 데 사용할 수 있는 예시적인 치수이다. 공진기의 폭은 405 μm, 공진기의 길이는 628 μm, 개별 스프링 요소의 작은 치수(폭)는 9 μm 이다. 공진기가 존재하는 층, 즉, 장치층(device layer)의 두께는 예를 들어 4 내지 20 μm 범위일 수 있다.

[0069] 도 4는 $p < 0.1$ mbar의 진공 상태에서 측정된 44 kHz에서 작동하는 테스트 디자인의 응답인 실험 결과를 도시한다. 얻은 품질 계수는 17 000이었고, ESR은 133 kOhm 이었다.

[0070] 도 5는 도 2와 유사한 공진기를 보여주지만, 질량(M1, M2) 치수들이 다르고, 폴디드 중앙 스프링 구조가 다르며, 이는 연결 빔 요소(CB)가 더 짧아질 수 있으므로 기판에 대한 공진기의 더 강한 지지를 제공할 수 있다. 연결 빔(CB)은 사행 스프링 요소의 외부 터닝 포인트(turning point)에서 앵커링 포인트(A2(A1))까지 연장된다.

[0071] 도 6은 대각 공진기 구조를 따른 스프링을 도시한다. 중앙 폴디드 스프링 구조의 유효 길이는 다이의 대각선(diagonal of the die)을 따라 스프링을 배향하여 주어진 직사각형 다이 영역(rectangular die area) 내에서 최대화된다. 따라서, 예를 들어 32 kHz 공진 주파수 공진기를 구현하는 데 필요한 면적을 최소화할 수 있다.

[0072] 도 7은 일반적으로 도 2에 도시된 공진기의 구조를 갖지만, 추가 지지 스프링들(SS)이 질량부들(M1, M2)에 부착된 MEMS 공진기를 도시한다(추가 스프링부들은 또한 주변 기판에도 부착된다, 예를 들어, 측면(sides)에서).

[0073] y-축을 따른 움직임(motion)에 대한 지지 스프링의 스프링 상수는 공진기의 메인 스프링 상수 K의 1/10 미만이다. 질량들(M1, M2)에 부착된 여러 개의 지지 스프링들(SS)이 있을 수 있다. 지지 스프링들(SS)은 질량들(M1, M2)의 임의의 (x-방향 또는 y-방향) 면(side)에 부착될 수 있다.

[0074] 지지 스프링들(SS)의 목적은 기생(parasitic) 공진 모드들을 억제하고 z-방향(x-방향 및 y-방향 모두에 수직) 변위에 대해 구조에 강성(stiffness)을 추가하는 것이다. 이것은 장치의 작동 동안 신뢰성뿐만 아니라 구성요소의 제조 가능성에 도움이 될 수 있다(신뢰할 수 없는 한 가지 원인은 갭(gap) 위의 하부 (실리콘) 핸들 웨이퍼에 대한 구조의 정지 마찰(stiction)일 수 있음).

[0075] 도 8은 SOI 웨이퍼(150) 상에 제조될 때 공진기 장치의 예시적인 단면을 도시한다. 층들(L1-L6)은 다음 설명과 함께 도면에 도시된다.

[0076] L2 = 압전층(piezoelectric laye): 변환(transduction)은 압전층을 기반으로 한다. 예시적인 층 재료는 AlN, ScAlN, 및 ZnO이다. L2 두께는 예를 들어 1 μm 일 수 있다.

[0077] L1 = 상부 전극층(top electrode layer): 압전층의 윗면에는 상부 전극층이 있다. 이 층의 재료는 Al, Mo, Au, 폴리실리콘 또는 전기 전도성인 임의의 다른 적절한 재료일 수 있다. L1 두께는 예를 들어 1 μm 일 수 있다.

[0078] L3 = 하부 전극층(bottom electrode layer): 압전층의 아래면에는 하부 전극층이 있다. 이 층의 재료는 Al, Mo, Au, 폴리실리콘 또는 전기 전도성인 임의의 다른 적절한 재료일 수 있다. L3 두께는 예를 들어 1 μm 일 수 있다.

[0079] L4 = 도핑된 실리콘층(doped silicon layer)(공진기 바디 및 하부 전극): 인 도핑된 단결정 실리콘(phosphorus doped single crystal silicon)은 공진기(또는 중앙 스프링부) 질량의 >50% 를 형성한다. 특정 실시예에서, 인 도핑 농도는 $1*10^{19}$ cm^{-3} 이상이다. 도핑된 실리콘층은 하부 전극층으로서 작용하는 것이 가능하다. 즉, 층들(L3,

L4)은 단일 실리콘층으로 결합될 수 있다. 예를 들어, L4 두께는 2 μm - 20 μm 범위일 수 있다.

[0080] L5 = 매립된 산화물층(buried oxide layer): 이 층은 공진 모드에서 진동하도록 공진기(참조 부호 100으로 표시된 공진기 영역)를 해제(release)하기 위해 공진기 구조 아래에서(underneath) 에칭된다.

[0081] L6 = 실리콘 핸들층(silicon handle layer).

[0082] 추가 실시예에서, 추가 재료층들이 존재할 수 있다.

[0083] 참조 번호 201은 하부 전극층에 대한 전기적 연결을 나타내고, 참조 번호 202는 상부 전극층에 대한 전기적 연결을 나타낸다. 층(L2)의 개구는 참조 번호 120으로 표시된다.

[0084] 도 9는 "아코디언" 공진 모드의 전기기계적 변환을 달성하기 위해 사용될 수 있는 상부 전극 패턴(도 8 참조)의 예를 도시한다. TE는 도면의 상부 전극을 나타낸다.

[0085] 도 10은 공진기 장치의 다른 단면을 도시한다. 여기서 도 8과의 차이점은 상부 전극에는 203 [X_{in}]과 204 [X_{out}]의 두 가지 극성이 있으며 하부 전극은 플로팅되어 있다는 것이다. 두 극성의 상부 전극 구조(geometry)는 전기 연결이 없는 교차 전극 패턴(crossing electrode pattern)을 필요로 하기 때문에(도 11 참조), 추가 재료층이 필요하다: L7 = 브리지 도체층(bridge conductor layer), L8 = 브리지 유전층(bridge dielectric layer).

[0086] 도 11은 상부 전극층이 2개의 극성(X_{in}, X_{out})의 영역들을 가질 때, "아코디언" 공진 모드의 전기기계적 변환을 달성하기 위해 사용될 수 있는 상부 전극 패턴(도 10 참조)의 예를 도시한다. 서로 다른 극성의 트레이스(traces)의 교차는 브리지 도체층(L7)과 브리지 유전층(L8)을 사용하여 달성된다(L8은 도 11에 표시되지 않음).

[0087] 도 12a는 또 다른 실시예에 따른 MEMS 공진기의 단면도를 도시한다. 이들 실시예에서, 열 산화물층(thermal oxide layer)(L4')이 제공된다. 열 산화물층, 예를 들어, 실리콘 산화물 SiO_2 층은 (퇴행성적으로(degeneratively)) 도핑된 실리콘층(L4)의 다음(아래 또는 위) 또는 층(L4)의 양면에 위치된다. 또 다른 실시예에서, 실리콘 산화물 SiO_2 층은 SiO_2 층이 층(L4)을 두 부분으로 분할하도록 층(L4)의 중간(중앙)에 위치된다. 열 산화물층(L4')은 공진기의 열적 특성을 향상시키기 위한 것이다. 특정 실시예에서, 공진기의 선형 온도 계수(linear temperature coefficient)(주파수의)(TCF1)는 열 산화물층을 추가함으로써 수정(예를 들어, 증가)된다. 예를 들어, 열 산화물층이 없는 공진기는 약간 음의 TCF1(예를 들어, -5 ppm/℃)을 가질 수 있다. 실시예에 따라 적절한 두께를 갖는 열 산화물층을 추가함으로써, TCF1이 증가된다. 원하는 TCF1 = 0을 얻을 수 있다.

[0088] 도 12b 및 도 12c는 또 다른 실시예에 따른 MEMS 공진기들의 단면도들을 도시한다. 이들 실시예에서, 실리콘 산화물(SiO2)층(L4')은 도 12b에 도시된 바와 같이 압전층(L2) 상에(즉, 층들(L1, L2) 사이에), 또는 도 12c에 도시된 바와 같이 압전층 아래에(즉, L2와 하부 전극층(L3) 사이에) 증착된다(deposited). 다른 재료층들에 대해서는 도 8 및 도 10의 설명을 참조한다. 특정 실시예에서, 도 8을 참조하여 위에서 논의된 바와 같이, 도핑된 실리콘층(L4)이 하부 전극층으로서 작용하는 것이 가능하며, 즉 층들(L3, L4)은 단일 실리콘층으로 결합될 수 있다.

[0089] 이러한 솔루션의 장점은 다음과 같은 추론을 고려하여 이해할 수 있다. 공진기의 ESR 감소를 달성하려면 재료 스택(materials stack)의 전체(overall) TCF1이 0인 조건을 유지하면서 필름(막) 두께를 줄여 공진기의 질량을 줄이는 것(scale down)이 유리하다. 실리콘 산화물은 인이 강하게 도핑된 실리콘보다 상대적으로 높은 양의 온도 계수를 갖기 때문에, 전체 TCF1 = 0을 유지하면서 도핑된 실리콘의 일부를 실리콘 산화물로 교체하여 공진기 재료 스택 전체 두께(및 질량)를 줄이는 것이 가능하다. 두께를 줄이면 ESR이 감소하고 동시에 압전층 양단(across)의 커패시턴스가 증가한다. 커패시턴스가 너무 많이 증가하는 것을 방지하기 위해, 도 12b 및 도 12c에 도시된 바와 같이 하부 전극과 상부 전극 사이에 실리콘 산화물층(L4')을 배치하는 것이 유리하다.

[0090] 실리콘의 열 산화, 플라즈마 강화 화학 기상 증착(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD), 또는 저온 산화물(low temperature oxide, LTO) 방법과 같은 실리콘 산화물층을 성장시키는 몇 가지 잘 알려진 방법이 있다. 예를 들어, PECVD 및 LTO 방법은 도 12b 및 도 12c의 재료 스택에 따라 공진기를 위한 SiO_2 층을 성장시키는데 사용될 수 있다.

[0091] 특정 실시예에서, 하부 전극층(L3) 및 도핑된 실리콘층(L4)은 단일 도핑된 실리콘층(L4)으로 결합된다. 이러한 경우에 열 산화에 의해 층(L4)으로부터 열 산화물이 편리하게 형성될 수 있고, 이로써 나머지 층(L4)의 상부에

층(L4')을 형성할 수 있다.

[0092] 도 13은 도 5와 유사한 디자인을 보여주지만, 층(L9): 질량들(M1, M2)의 상단(top)의 트리밍 웨이트층(trimming weight layer)(대각선으로 해칭된/회색 영역)이 있다. 층(L9)의 목적은 예를 들어, 이온 빔 트리밍 또는 레이저 제거(ablation)에 의해 층(L9)(또는, 층(L9)의 일부)의 두께를 줄임으로써 공진 주파수의 미소 조정(微小調整)(fine adjustability)을 제공하는 것이다. L9의 재료는 예를 들어, Mo 또는 Au일 수 있다. 예를 들어, 도 3과 유사한 치수와 10 μm의 Si 장치층(소자층) 두께에서 공진 주파수는 제거된 Mo의 100 nm당 약 40,000 ppm만큼 변한다.

[0093] 도 14는 특정 실시예에 따른 추가적인 (단결정) 실리콘 MEMS 공진기(1400)를 도시한다. 재료와 관련하여 공진기(1400)의 일반적인 구조 및 일반적인 기능은 이전 설명에 제공된 실시예들을 참조한다. 좌표계는 도면과 같이 정의된다. 따라서, 공진기 또는 압전층과 같은 공진기 구조의 층들은 일반적으로 xy-평면에 있다.

[0094] 공진기(1400)는 스프링 질량계의 공진 주파수를 원하는 값으로 낮추기 위해 진동 암들(vibrating arms)의 단부에 추가 매스(질량)(additional masses)가 장착된 음차 공진기로 볼 수 있다. 따라서, 특정 실시예에서, 공진기(1400)는 일반적인 M 형상이다. 공진기(1400)는 제1 중량부(1401), 제2 중량부(1402), 및 중량부들 사이의 중앙 스프링부를 갖는 스프링 질량계를 포함한다. 특정 실시예에서, 중앙 스프링부는 음차의 제1(좌측) 암(1403) 및 음차의 제2(우측) 암(1404)을 포함한다. 암들(1403, 1404)은 x-방향으로 정렬된다. 좌측 암(1403)은 우측 암(1404)으로부터 갭(gap)만큼 분리되지만 또한 그 단부가 우측 암(1404)의 각 단부에 기계적으로 연결된다. 음차는 암들이 연결된 동일한 단부(들)에서 기계적 앵커(mechanical anchor)(1409)에 추가로 고정된다. 부분(part)(1403)(및 각각 부분(1404))은 반대쪽 단부에서 부분(1401)(각각 부분(1402))에 연결된다. 그 외에는(otherwise), 부분들(1401, 1403) 사이에 제1 갭이 있고 부분들(1402, 1404) 사이에 각각 제2 갭이 있다.

[0095] 바람직한(preferred) 진동 모드는 공진기(1400)의 2개의 암들이 서로에 대해 역위상(antiphase)으로 움직이는 평면 내 운동(in-plane motion)이다. 따라서, 진동 암들(1403, 1404)은 대칭 방식으로 교대로 서로 가까워지고 멀어지도록 진동한다(y-방향의 양방향 화살표로 표시된 것처럼).

[0096] 온도에 따른 주파수 변화를 최소화하기 위해, 공진기의 단결정 실리콘층에 인과 같은 n형 도펀트를 축퇴적으로 도핑하는 것이 유리하다. 특정 실시예에서, 도핑 농도는 $1*10^{19}$ cm^{-3} 이상이다. 특정 실시예에서, 도핑된 실리콘은 공진기의 진동 암들(1403, 1404) 질량의 적어도 50%를 형성한다. 이것은 높은 열적 안정성을 추구하는데 유리하다. 특정 실시예에서, 2개의 암들(1403, 1404)은 실리콘의 [100] 결정 축과 같은 <100> 결정 축을 따라 정렬되며(또는, 그 방향에서 5도 미만으로 벗어남), 이는 또한 높은 열적 안정성을 달성하는 데 도움이 된다.

[0097] 특정 실시예에서, 공진기(1400)는 압전기적 결합(piezoelectric coupling)에 의해 진동으로 설정된다. 특정 실시예에서, 압전막(piezoelectric film)(예를 들어, AlN 박막)이 공진기 구조의 단결정 실리콘층의 상부에 증착된다. 상부 전극은 압전 박막 상에 증착되고 패터닝된다. 특정 실시예에서, 상부 전극의 제1 부분(1405)은 진동 암(1403) 상에 위치되고 제2 부분(1406)은 진동 암(1404) 상에 위치된다. 전극의 재료는 예를 들어, Mo, Al, Au, Pt, Ag, 다결정 실리콘(polycrystalline silicon), 또는 다른 전도성 재료일 수 있다.

[0098] 특정 실시예에서, 도핑된 실리콘층(L4)(예를 들어, 도 8, 10, 및 12a-12c 참조)는 하부 전극층으로서 작용한다. 특정 대안적인 실시예에서, 하부 전극으로서 동작하는 단결정 실리콘 상에 추가적인 얇은 층(thin layer) 또는 층 스택(layer stack)이 존재한다(도 8, 10, 및 12a-12c의 L3 참조). 따라서 특정 실시예에서 공진기(1400)의 재료 스택은 도 12a 내지 도 12c에 의해 개시된 L4' 특징(features)에 의해 선택적으로 보완된 도 8을 참조하여 앞서 제시된 것에 대응한다.

[0099] 특정 실시예에서, 도 14에 도시된 바와 같이 상부 전극은 상부 및 하부 전극들 사이에 교류 신호가 연결될 때 공진기(1400)의 2개의 암들이 역위상 공진을 지지하는 힘을 받도록(experience) 패턴화된다. 이것은 예를 들어 도 14에 도시된 바와 같이 상부 전극을 패터닝하여 암들(1403, 1404)을 분리하는 갭 옆에 있는 압전층의 상부 상의 암들(1403, 1404)의 영역들(즉, 영역들(1405, 1406))은 전극 부분들에 의해 덮인 반면 중량부들에 더 가까운 암들(1403, 1404)의 영역들은 덮이지 않은 채로 남아 있도록 함으로써 달성될 수 있다.

[0100] 특정 대안적인 실시예에서, 상부 전극은 중량부들에 더 가까운 압전층의 상부 상의 암들(1403, 1404)의 영역들은 전극 부분들에 의해 덮인 반면 암들(1403, 1404)을 분리하는 갭 옆에 있는 암들(1403, 1404)의 영역들이 덮이지 않은 채로 남아 있도록 패턴화된다.

[0101] 특정 실시예에서, 패터닝된 상부 전극에 대한 배선은 기계적 앵커(1409) 상에 위치된 접촉 패드(1408)(도 8의

재료 스택에 따른 공진기에 대해 참조 번호 202로 표시됨)로부터 배열된다. 하부 전극을 위한 접촉 패드(1407)(도 8의 재료 스택에 따른 공진기에 대한 참조 번호 201로 표시됨)는 동일한 앵커(1409) 상에 위치될 수 있다. (도 8에 도시된 압전층(L2)의 개구(120)는 도 14에 도시되어 있지 않다.)

[0102] 도 15는 특정 실시예에 따른 다른 음차 공진기를 도시한다. 음차 암들(1403, 1404)의 길이는 관련된(concerned) 칩(chip)(또는 다이(die))의 대각선 치수를 사용할 수 있는 반면 질량 요소들(중량부들)(1401, 1402)은 다이의 코너에 배치된다. 특정 실시예에서 2개의 암들(1403, 1404)은 열 계수(thermal coefficient)를 최소화하기 위해 실리콘의 [100] 결정 축과 같은 <100> 결정 축을 따라 정렬된다(또는, 그 방향으로부터 5도 미만으로 벗어남).

[0103] 바람직한 진동 모드는 공진기의 2개의 암들이 서로에 대해 역위상으로 움직이는 평면 내 운동(xy-평면에서)이다. 따라서, 진동 암들(1403, 1404)(x-방향으로 정렬됨)은 대칭 방식으로 교대로 서로 더 가까워지고 멀어지도록 진동한다(도 15에서 y-방향의 양방향 화살표로 표시된 것처럼). 도 15에 도시된 공진기의 재료 스택은 공진기(1400)의 재료 스택에 대응한다.

[0104] 도 16a는 음차 공진기의 다른 실시예를 도시한다. 도 16a에 도시된 공진기(1600)는 제1 중량부(1601), 제2 중량부(1602), 및 중량부들 사이의 중앙 스프링부를 갖는 스프링 질량계를 포함한다. 특정 실시예에서, 중앙 스프링부는 x-방향으로 정렬된 음차의 제1(좌측) 암(1603) 및 음차의 제2(우측) 암(1604)을 포함한다. 좌측 암(1603)은 우측 암(1604)으로부터 갭(gap)만큼 분리되지만 또한 그 단부가 우측 암(1604)의 각 단부에 기계적으로 연결된다. 음차는 암들이 연결된 동일한 단부(들)에서 기계적 앵커(1609)에 추가로 고정된다. 부분(part)(1603)(및 각각 부분(1604))은 반대쪽 단부에서 부분(1601)(각각 부분(1602))에 연결된다. 그 외에는(otherwise), 부분들(1601, 1603) 사이에 제1 갭이 있고 부분들(1602, 1604) 사이에 각각 제2 갭이 있다.

[0105] 바람직한 진동 모드는 공진기(1600)의 2개의 암들이 서로에 대해 역위상으로 y-방향으로 움직이는 평면 내 운동이다. 따라서, 진동 암들(1603, 1604)은 대칭 방식으로 교대로 서로 가까워지고 멀어지도록 진동한다(양방향 화살표로 도시된 바와 같이).

[0106] 따라서, 공진기(1600)는 기본적으로 공진기(1400)에 대응한다. 공진기(1400)와 다른 점은 구동 방식의 구현에 있다. 상부 전극 및 하부 전극 대신에 공진기 구조는 반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들과 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극층(L3)을 포함한다. 공진기(1600)의 재료 스택은 도 10 및 도 12a 내지 도 12c를 참조하여 앞서 제시된 것들 중 어느 것에 대응한다. 특정 실시예에서, 상부 전극들의 패터닝은 제1 상부 전극의 제1 부분(1605)이 진동 암(1603) 상에 위치되고 제2 부분(1606)이 진동 암(1604) 상에 위치되고, 제2 상부 전극의 제1 부분(1615)은 진동 암(1603) 상에 위치되고 제2 부분(1616)은 진동 암(1604) 상에 위치되도록 도 16a에 도시된 바와 같다. 암들(1603, 1604)을 분리하는 갭 옆에 있는 암들(1603, 1604)의 영역들(1605, 1606)은 제1 상부 전극에 의해 덮이고, 각 중량부들(1601, 1602)에 더 가까운 암들(1603, 1604)의 영역들(1615, 1616)은 제2 상부 전극에 의해 덮인다.

[0107] 특정 실시예에서, 제1 상부 전극에 대한 배선은 기계적 앵커(1609) 상에 위치된 접촉 패드(1608)로부터 배열된다. 제2 상부 전극을 위한 접촉 패드(1618)는 동일한 앵커(1609) 상에 위치될 수 있다.

[0108] 도 16b는 음차 공진기의 또 다른 실시예를 도시한다. 도 16b에 도시된 공진기(1600')는 제1 중량부(1601), 제2 중량부(1602), 및 중량부들 사이의 중앙 스프링부를 갖는 스프링 질량계를 포함한다. 특정 실시예에서, 중앙 스프링부는 음차의 제1(좌측) 암(1603') 및 음차의 제2(우측) 암(1604')을 포함한다. 좌측 암(1603')은 우측 암(1604')으로부터 갭(gap)만큼 분리되지만 또한 그 단부가 우측 암(1604')의 각 단부에 기계적으로 연결된다. 음차는 암들이 연결된 동일한 단부(들)에서 기계적 앵커(1609')에 추가로 고정된다. 부분(1603')(및 각각 부분(1604'))은 반대쪽 단부에서 부분(1601)(각각 부분(1602))에 연결된다. 그 외에는(otherwise), 부분들(1601, 1603') 사이에 제1 갭이 있고 부분들(1602, 1604') 사이에 각각 제2 갭이 있다.

[0109] 이 실시예에서, 진동 모드는 공진기(1600')의 2개의 암들이 서로에 대해 역위상으로 움직이는 평면 외 운동(out-of-plane motion)이다. 따라서, 진동 암들(1603', 1604')은 좌측 암(1603')이 양의 z-축 방향으로 이동할 때 우측 암(1604')이 음의 z-축 방향으로(및 그 반대(vice versa)) 이동하도록 진동한다.

[0110] 그러한 공진기(1600')의 전기기계적 작동의 바람직한 구현이 도 16b에 도시되어 있다. 반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들, 좌측 암을 위한 전극(1605')과 우측 암을 위한 전극(1606')이 있으며, 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극층(L3)이 있다. 전기적 신호들(X_{in}, X_{out})은 상부 전극들(1605', 1606')이 각각 연결되는 접촉 패드들(1618', 1608')에 연결된다. 접촉 패드들은 기계적 앵커 영역(1609')에 형성된다. 공진기(1600')의

재료 스택은 도 10 및 도 12a 내지 도 12c를 참조하여 앞서 제시된 것들 중 어느 것에 대응할 수 있다.

[0111] 도 16c는 음차 공진기의 또 다른 실시예를 도시한다. 공진기(1600')와 유사하게, 도 16c에 도시된 공진기(1600'')는 제1 중량부(1601), 제2 중량부(1602), 및 중량부들 사이의 중앙 스프링부를 갖는 스프링 질량계를 포함한다. 중앙 스프링부는 음차의 제1(좌측) 암(1603'') 및 음차의 제2(우측) 암(1604'')을 포함한다. 좌측 암(1603'')은 우측 암(1604'')으로부터 갭(gap)만큼 분리되지만 또한 그 단부에서 우측 암(1604'')의 각 단부에 기계적으로 연결된다. 음차는 암들이 연결된 동일한 단부(들)에서 기계적 앵커(1609'')에 추가로 고정된다. 부분(1603'')(및 각각 부분(1604''))은 반대쪽 단부에서 부분(1601)(각각 부분(1602))에 연결된다. 그 외에는(otherwise), 부분들(1601, 1603'') 사이에 제1 갭이 있고 부분들(1602, 1604'') 사이에 각각 제2 갭이 있다.

[0112] 특정 실시예에서, 도 16c에 도시된 바와 같이 상부 전극은 교류 신호가 상부 및 하부 전극들 사이에 연결될 때 공진기(1600'')의 2개의 암들은 공진기(1600'')의 2개의 암들이 서로에 대해 동위상(in phase)으로 움직이는 평면 외 운동을 지원하는 힘을 경험하도록 패터닝되어 있다(즉, 좌측 암(1603'')과 우측 암(1604'')이 모두 양의 z-축 방향 또는 음의 z-축 방향으로 이동함).

[0113] 이러한 진동 모드를 지원하기 위해 상부 전극은 두 부분들(1605'', 1606'')로 구성되며 각각 좌측 암과 우측 암에 배치된다. 상부 전극 부분들은 기계적 앵커(1609'')에 배치된 접촉 패드(1608'')에 연결된다. 하부 전극을 위한 접촉 패드(1607'')는 동일한 앵커(1609'') 상에 위치될 수 있다. 따라서 특정 실시예에서 공진기(1600'')의 재료 스택은 도 12a 내지 도 12c에 의해 개시된 L4' 특징(features)에 의해 선택적으로 보완되는 도 8을 참조하여 앞서 제시된 것에 대응한다.

[0114] 도 17a는 특정 실시예에 따른 추가적인 MEMS 공진기를 도시한다. 공진기(1700)의 재료, 구조 및 일반적인 기능에 대해서는 앞의 설명, 특히 공진기(1400)에 대한 설명을 참조한다.

[0115] 공진기(1700)는 양단형 음차 공진기(double-ended tuning fork resonator)로 볼 수 있는데, 그 일반적인 구조는 진동 암들의 단부에 2개의 음차 공진기들을 연결하여 형성된 것으로 볼 수 있기 때문이다. 공진기(1700)는 제1 중량부(1701), 제2 중량부(1702), 및 중량부들 사이의 중앙 스프링부를 갖는 스프링 질량계를 포함한다. 특정 실시예에서, 중앙 스프링부는 x-방향으로 정렬된 제1(좌측) 진동 암(1703) 및 제2(우측) 진동 암(1704)을 포함한다. 좌측 암(1703)은 우측 암(1704)으로부터 (폐쇄된(closed)) 갭(gap)(17)에 의해 분리되지만 또한 그 단부들에서 우측 암(1704)의 각 단부들에 기계적으로 연결된다. 2개의 중량부들은 특정 실시예에서 공진 주파수의 값을 원하는 값으로 조정하기 위해 2개의 진동 암들(1703, 1704)의 중앙 포인트들에 부착된 동일한 질량 요소들이다. 그 외에는(otherwise), 부분들(1701, 1703) 사이 및 부분들(1702, 1704) 사이에 각각 갭들이 있다. 공진기(1700)는 그 한쪽 단부에서 기계적 앵커(1709)에, 그리고 반대쪽 단부에서 다른 기계적 앵커(1719)에 더 고정된다.

[0116] 바람직한 진동 모드는 공진기(1700)의 2개의 암들이 압전기적 변환(piezoelectric transduction)에 의해 서로에 대해 y-방향으로 역위상으로 움직이는 평면 내 운동이다. 따라서, 2개의 (굴곡(flexural)) 진동 암들(1703, 1704)이 대칭 방식으로 교대로 서로 가까워지고 멀어지도록 진동한다(양 방향 화살표로 도시된 것처럼). 상부 전극은 이러한 움직임을 지원하도록 패턴화되어 있다. 특정 실시예에서, 상부 전극은 암들의 길이 방향으로 교번하는 패턴을 형성하도록 패터닝된다. 특정 실시예에서, 압전층의 상부에 있는 암들(1703, 1704)의 중앙 종방향 영역들(central longitudinal areas)은 중량부들 옆의 영역들이 상부 전극(즉, 상부 전극 부분들(1705, 1706))에 의해 덮이고, 갭(17)에 더 가까운 영역들이 덮이지 않은 채로 유지되도록 배열된다. 암들(1703, 1704)의 원위 종방향 영역들(distal longitudinal areas)은 반대로 배열된다. 즉, 갭(17)에 더 가까운 영역들은 상부 전극(즉, 상부 전극 부분들(1715, 1725, 1716, 1726)에 의해 덮이고 중량부들 옆의 영역들은 덮이지 않은 채로 유지된다.

[0117] 특정 실시예에서, 패터닝된 상부 전극에 대한 배선은 기계적 앵커(1709) 상에 위치된 접촉 패드(1708)로부터 배열된다. 또한, 상부 전극 부분들로부터 상부 전극의 다른 부분들로의 배선이 배열될 수 있다. 그리고, 반대쪽 앵커(1719)로부터의 배선이 배열될 수 있다. 하부 전극을 위한 접촉 패드(1707)는 예를 들어 앵커들(1709, 1719) 중 하나에 위치될 수 있다.

[0118] 도 17b는 양단형 음차 공진기의 다른 실시예를 도시한다. 공진기(1730)의 바람직한 진동 모드는 공진기(1730)의 2개의 암들이 압전기적 변환에 의해 서로에 대해 z-방향으로 동위상으로 움직이는 평면 외 운동이다. (갭(17)의 기호는 양의 z-방향이든 음의 z-방향이든 인접한 굴곡 진동 암들에 대한 상대적인 모션 방향을 나타낸다.) 따라서, 2개의 (굴곡) 진동 암들(1703, 1704)은 양쪽 암들(1703, 1704)이 양의 z-방향 또는 음의 z-방향으로 교대로

이동하도록 진동한다. 상부 전극은 이러한 움직임을 지원하도록 패턴화되어 있다. 공진기 구조는 반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들과 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극층(L3)을 포함한다. 공진기(1730)의 재료 스택은 도 10 및 도 12a 내지 도 12c를 참조하여 앞서 제시된 것들 중 어느 것에 대응한다. 특정 실시예에서, 압전층의 상부에 있는 암들(1703, 1704)의 중앙 종방향 영역들은 제1 상부 전극 구조(즉, 상부 전극 부분들(1732, 1742))에 의해 주로 덮이고 (제1) 접촉 패드(1708)에 연결되는 반면, 암들(1703, 1704)의 원위 종방향 영역들은 제2 상부 전극 구조(즉, 상부 전극 부분들(1731, 1733, 1741, 1743))에 의해 주로 덮이고 (제2) 접촉 패드(1718)에 연결된다. 도 17b에 도시된 예에서, 접촉 패드(1708)는 앵커(1709)에 위치되고 접촉 패드(1718)는 반대쪽 앵커(1719)에 위치된다.

[0119] 도 17c는 양단형 음차 공진기의 다른 실시예를 도시한다. 공진기(1750)의 바람직한 진동 모드는 공진기(1750)의 2개의 암들이 압전기적 변환에 의해 서로에 대해 z-방향으로 역위상으로 움직이는 평면 외 운동이다. 따라서, 2개의 (굴곡) 진동 암들(1703, 1704)이 진동하여 암(1703)은 양의 z-방향으로 움직이는 반면 암(1704)은 음의 z-방향으로 움직인다. 또는, 그 반대도 마찬가지이다. 상부 전극은 이러한 움직임을 지원하도록 패턴화되어 있다. 공진기 구조는 반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들과 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극층(L3)을 포함한다. 공진기(1750)의 재료 스택은 도 10 및 도 12a 내지 도 12c를 참조하여 앞서 제시된 것들 중 어느 것에 대응한다. 특정 실시예에서, 압전층의 상부에 있는 암(1703)의 중앙 종방향 영역(즉, 상부 전극 부분(1752)) 및 압전층의 상부에 있는 암(1704)의 원위 종방향 영역들(즉, 상부 전극 부분들(1761, 1763))은 제1 상부 전극 구조에 의해 주로 덮이고 접촉 패드(1708)에 연결되는 반면, 압전층의 상부에 있는 암(1704)의 중앙 종방향 영역(즉, 상부 전극 부분(1762)) 및 압전층의 상부에 있는 암(1703)의 원위 종방향 영역들(즉, 상부 전극 부분들(1751, 1753))은 제2 상부 전극 구조에 의해 주로 덮이고 접촉 패드(1718)에 연결된다.

[0120] 도 17b 및 도 17c에 예시된 실시예에서, 2개의 상부 전극들은 서로 교차할 필요가 없다. 따라서, 도 10 및 도 12a 내지 도 12c에 묘사된 재료 스택의 층들(L7, L8)은 필요하지 않다.

[0121] 이전의 음차 공진기들에서와 유사하게, 도 17a 내지 도 17c의 양단형 음차 공진기들의 암들(1703, 1704)은 높은 열적 안정성을 달성하기 위해 실리콘의 [100] 결정 축과 같은 <100> 결정 축과 정렬된다(또는, 그 방향에서 5도 미만으로 벗어남).

[0122] 양단형 음차 공진기는 어셈블리가 단일 집단 진동 모드(single collective vibration mode)에서 공진하도록 강제하는 상호 연결 요소들이 있는 더 큰 공진기 구조들로 결합될 수 있다. 이러한 양단형 음차 공진기 어셈블리의 예는 도 18a 및 도 18b에 도시되어 있다. 개별 양단형 음차 공진들(1800)(도 17a 내지 도 17c에 도시된 유형의 5개 공진기들)이 일렬로 배치되었다. 양단형 음차 공진기들(1800)은 갭(18)에 의해 분리된 자체 진동 암들(1803, 1804)을 포함한다. 공유 질량 요소(1802)는 인접한 중앙 스프링부와 어셈블리의 단부들에 있는 단부 질량 요소들(1801) 사이에 위치된다. 어셈블리는 중앙 스프링부들의 각 단부들(양단형 음차 포크들(double ended tuning forks))에 연결된 기계적 앵커들(1809, 1819)을 포함한다. 이 앵커들은 다른 실시예에서 중앙 앵커에 더 가깝게 결합되거나 연결 및/또는 이동될 수 있다.

[0123] 도 18a에 도시된 예에서, 개별 양단형 음차 공진기들(1800)은 모두 평면 내 역위상 모드(xy-평면에서)에서 진동하지만, 인접한 공진기들(1800)의 진동 모드들은 서로 180도 시프트된다. 그 결과, 인접한 양단형 음차 공진기 암들(1803, 1804)에 연결된 질량 요소들(1802)(도 18a에서 가장 안쪽의 4개의 질량 요소들)은 인접한 암들과 동기하여(synchrony) 이동한다.

[0124] 연결된 양단형 음차 공진기들의 어셈블리의 다른 실시예가 도 18b에 도시되어 있다. 이 실시예에서, 개별 양단형 음차 공진기들(1800)은 모두 평면 외 역위상 모드에서 진동하지만, 공진기들(1800)의 진동 모드들은 서로 180도 시프트된다(양의 z-방향과 음의 z-방향의 움직임들을 나타내는 기호들로 설명된 것처럼). 그 결과, 인접한 양단형 음차 공진기 암들(1803, 1804)에 연결된 질량 요소들(1802)(도 18b에서 가장 안쪽의 4개의 질량 요소들)은 인접한 암들과 동기하여 이동한다.

[0125] 특정 실시예에서, 가장 바깥쪽 질량 요소들(1801)의 체적(예를 들어, 폭)은 상호 연결된 양단형 음차 공진기들(1800) 사이의 진동 에너지의 균일한 분포를 용이하게 하기 위해 가장 안쪽 질량 요소들(1802)의 체적의 50% 또는 실질적으로 50% 이다. 이전과 같이, 양단형 음차 공진기들(1800)의 암들(1803, 1804)은 실리콘의 [100] 결정 축과 같은 <100> 결정 축과 정렬된다(또는, 그 방향에서 5도 미만으로 벗어남).

[0126] 도 19a 및 도 19b는 상호 연결된 양단형 음차 공진기들의 다른 실시예들을 도시한다. 일부 실시예에서, 전극 구조는 상부 및 하부 전극들 사이에 교류 신호가 연결될 때, 인접한 양단형 음차 공진기들이 180도 상대 위상 변

이를 갖는 움직임(모션, 운동)을 지원하는 힘을 경험하도록 패턴화된다. 특정 실시예에서, 이것은 도 19a에 도시된 바와 같이 상부 전극을 패터닝함으로써 얻어진다. 단순화를 위해 (단지(only)) 3개의 양단형 음차 공진기들(1800)을 갖는 어셈블리가 그려진다. 2개의 인접한 공진기들(1800)을 비교할 때, 상부 전극들(1850)은 각 굴곡 암들(1803)(또는 1804)의 반대 상부 표면 측에 패터닝된다.

[0127] 특정 실시예에서, 패터닝된 상부 전극들(1850)로의 배선은 결합된 기계적 앵커(1809) 상에 위치된 접촉 패드(1808)로부터 배열된다. 하부 전극을 위한 접촉 패드(1807)는 동일한 앵커(1809) 상에 위치될 수 있다.

[0128] 도 19b에 도시된 예에서와 같은 또 다른 실시예에서, 대응하는 공진기들(1800')의 구조는 반대 극성을 갖는 2개의 상부 전극들(1860, 1870) 및 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극층(L3)을 포함한다. 공진기(1800')의 재료 스택은 도 10 및 도 12a 내지 도 12c를 참조하여 앞서 제시된 것들 중 임의의 것에 대응한다(도 19b의 예에서는 층들(L7, L8)이 필요하지 않기 때문에 도 10 및 도 12a 내지 도 12c에 도시된 재료 스택의 층들(L7, L8)을 제외함). 단순화를 위해 (단지(only)) 2개의 양단형 음차 공진기들(1800')을 갖는 어셈블리가 그려진다.

[0129] 왼쪽의 양단형 음차 공진기에서, 압전층의 상부에 있는 암의 중앙 종방향 영역(1803)은 제1 상부 전극 구조(1860)에 의해 주로 덮이고(접촉 패드(1868)에 연결되고), 암의 원위 종방향 영역들은 제2 상부 전극 구조(1870)에 의해 주로 덮이는(접촉 패드(1878)에 연결되는) 반면, 암의 중앙 종방향 영역(1804)은 제2 상부 전극 구조(1870)에 의해 주로 덮이고 암의 원위 종방향 영역들은 제1 상부 전극 구조(1860)에 의해 주로 덮인다. 도 19b에 도시된 예에서, 접촉 패드(1868)는 앵커(1809)에 위치되고 접촉 패드(1878)는 반대쪽 앵커(1819)에 위치된다.

[0130] 2개의 인접한 양단형 음차 공진기들(1800')을 비교할 때, 각 중앙 및 원위 종방향 영역들은 반대 극성의 상부 전극들로 덮인다(커버된다). 2개의 상부 전극들 사이에 교류 신호가 연결될 때, 인접한 양단형 음차 공진기들은 180도 상대 위상 변이를 갖는 움직임을 지원하는 평면 외 힘을 경험한다. 그 결과, 인접한 양단형 음차 공진기 암들(1803, 1804)에 연결된 질량 요소들(1802)(도 19b의 가장 안쪽 질량 요소)은 인접한 암들과 동기하여 이동한다.

[0131] 도 20은 도 18a 및 도 18b, 그리고 도 19a 및 도 19b에 도시된 실시예들에 대한 특정 변형을 도시한다. 중앙의 양단형 음차 공진기(1800)(또는 1800')만이 기계적으로 고정된다. 다른 양단형 음차 공진기들의 상부 전극들에 대한 배선은 그 다음, 바람직하게는 대칭 패턴에 의해 공유 질량 요소들(1802)을 통해 인접한 공진기들의 전극들을 연결함으로써 구현된다.

[0132] 도 21은 도 18 내지 도 20에 도시된 실시예들에 대한 추가 변형을 도시한다. 상호 연결 질량 요소들(공유 질량 요소들)은 인접한 공진기들 사이의 연결 요소들이 연결 빔들(2145)로 단순히 구현되도록 최소화(또는 생략)되었다.

[0133] 도 22는 중앙에서 기계적 앵커(2209)에 기계적으로 고정된 중앙 스프링 구조 또는 부분(portion)이 있는 회전 공진기(2200)를 도시한다. 중앙 스프링부은 4개의 스프링 요소들 또는 암들(2203, 2204, 2213, 2214)을 통해 둘러싸는(encircling) 영역에 배열된 4개의 질량 요소들(2201, 2202, 2211, 2212)에 연결된다. 스프링 요소들은 교차 구조를 형성하고, 스프링 요소들은 본질적으로 <100> 결정 축을 따라 정렬된다(또는, 이러한 방향에서 5도 미만으로 벗어남).

[0134] 상부 전극들(2205, 2206, 2215, 2216)은 교류 신호가 상부 및 하부 전극들 사이에 연결될 때, 암들(2203, 2204, 2213, 2214)이 중앙 앵커링 영역(2209)이 정지 상태를 유지하도록 z-축에 대한 회전(앞뒤) 운동(모션)을 지원하는 힘을 경험하도록 패턴화된다. 이것은 예를 들어, 문제의 암의 동일한 측(쪽)(예를 들어, 앵커(2209)에서 보았을 때 오른쪽(우측))에 있는 암들(2203, 2204, 2213, 2214)의 표면적들(즉, 영역들(2205, 2206, 2215, 2216))이 전극 부분들(electrodes parts)에 의해 덮이고 암들의 나머지 영역들이 덮이지 않은 상태로 남아 있도록 도 22와 같이 상부 전극들을 패턴화하여 수행할 수 있다. 이 예에서 4개의 질량 요소들은 동일한 방향(동위상)으로 회전한다.

[0135] 상부 전극들에 대한 (바람직하게는 금속성) 배선(22)은 접촉 패드(2208)로부터 배열된다. 하부 전극에 대한 접촉은 접촉 패드(2207)로부터 배열된다. (도 8에 도시된 압전층(L2)의 개구(120)는 도 22에 도시되어 있지 않다.) 보다 일반적으로, 접촉 패드들은 웨이퍼 레벨 패키지 공진기(wafer-level packaged resonator)의 일부인 관통 실리콘 상호 연결(through-silicon interconnects)을 나타낼 수 있다.

[0136] 특정 실시예에서, 공진기(2200)의 재료 스택은 도 12a 내지 도 12c에 의해 개시된 L4' 특징에 의해 선택적으로

보완되는 도 8을 참조하여 앞서 제시된 바와 유사하게 구현된다.

[0137] 또 다른 실시예에서, 공진기(2200)에 대응하는 공진기들은 반대 극성의 2개의 상부 전극들(X_{in}, X_{out})과 전기적으로 부동하는(floating) 하부 전극으로 구현된다. 이러한 실시예에서, 2개의 전극들이 서로 교차하는 영역들에서도 10 및 도 11에 도시된 실시예에서와 유사하게 구현된 상부 전극들 사이에 추가 절연층(L8)이 있을 수 있다. 재료 스택의 기술적 구현은 도 10 및 도 12a 내지 도 12c에 도시된 임의의 실시예에서 설명된 바와 유사하게 구현될 수 있다.

[0138] 특허 청구범위의 범위 및 해석을 제한하지 않고, 여기에 개시된 하나 이상의 예시적인 실시예의 특정 기술적 효과가 다음과 같이 나열된다. 기술적 효과는 최적화된 실리콘 MEMS 공진기 설계(디자인)이다. 기술적 효과는 원하는 공진 주파수를 가진 아코디언 모드 MEMS 공진기를 제공하는 것이다. 또 다른 기술적 효과는 넓은 온도 범위에서 우수한 주파수 안정성이다. 또 다른 기술적 효과는 낮은 등가 직렬 저항(low equivalent series resistance, ESR)이다. 또 다른 기술적 효과는 작은 공간을 차지하는 공진기를 제공하는 것이다.

[0139] 전술한 설명은 본 발명의 특정 구현 및 실시예의 비제한적인 예로서 본 발명을 수행하기 위해 본 발명가에 의해 현재 고려되는 최상의 모드의 완전하고 유익한 설명을 제공하였다. 그러나, 본 발명이 위에 제시된 실시예의 세부사항에 제한되지 않고, 본 발명의 특성을 벗어나지 않고 동등한 수단을 사용하여 다른 실시예에서 구현될 수 있다는 것은 당업자에게 명백하다.

[0140] 또한, 본 발명의 전술한 실시예의 특징 중 일부는 다른 특징의 대응하는 사용 없이 유리하게 사용될 수 있다. 이와 같이, 전술한 설명은 단지(merely) 본 발명의 원리를 예시하는 것으로 간주되어야 하며, 이에 제한되는 것은 아니다. 따라서, 본 발명의 범위는 첨부된 특허 청구범위에 의해서만 제한된다.

부호의 설명

[0141] A1, A2: 앵커링 포인트들

M1, M2: 중량부들

SP: 중앙 스프링부

T1: 트렌치

CB: 연결 빔 요소

L1: 상부 전극층

L2: 압전층

L3: 하부 전극층

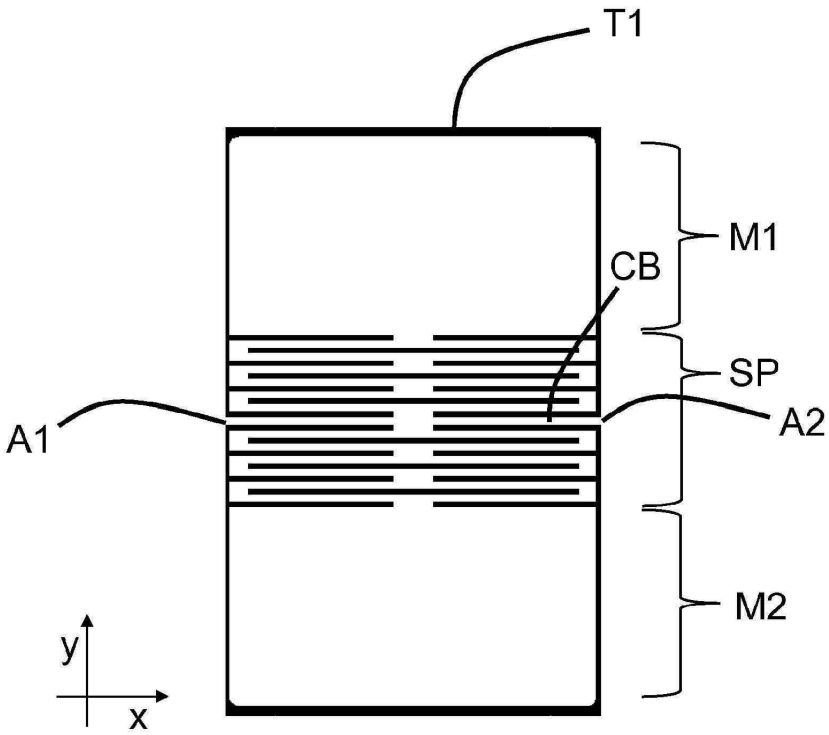
L4: 도핑된 실리콘층

L5: 매립된 산화물층

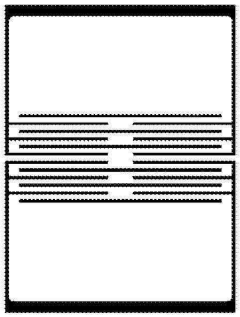
L6: 실리콘 핸들층

도면

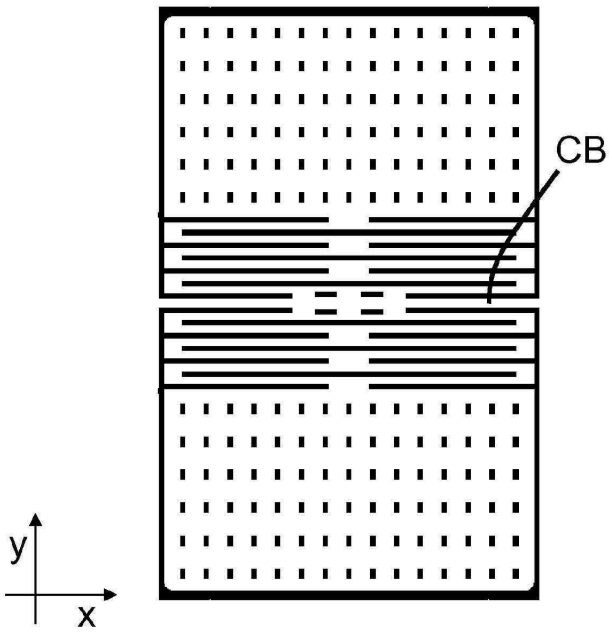
도면1a



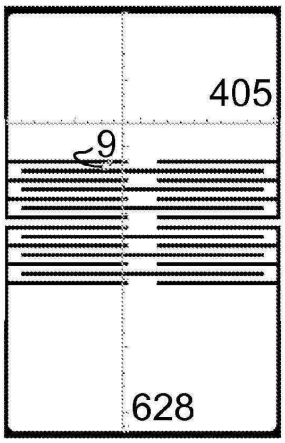
도면1b



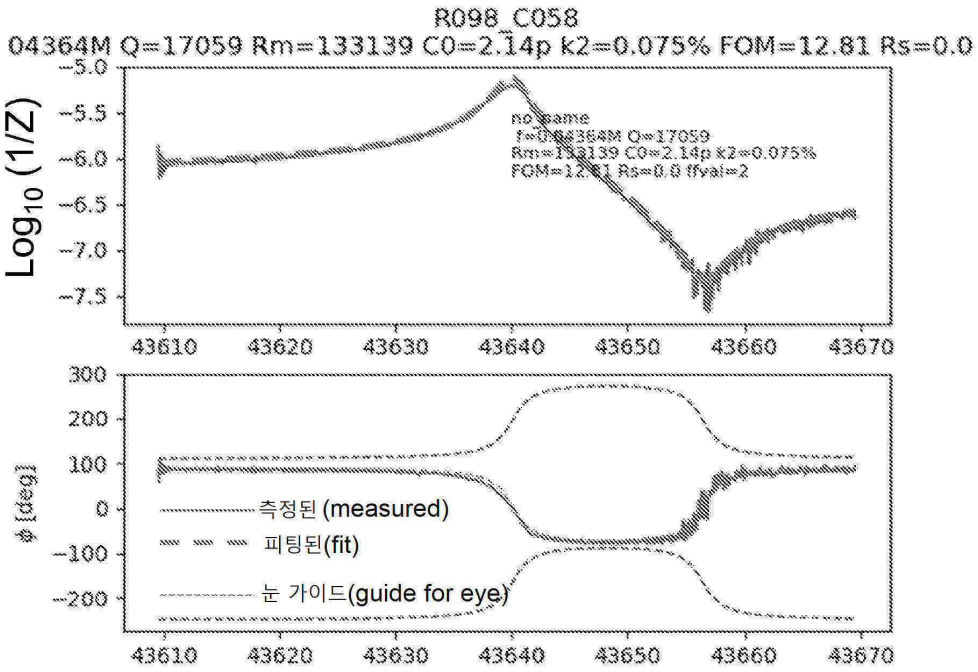
도면2



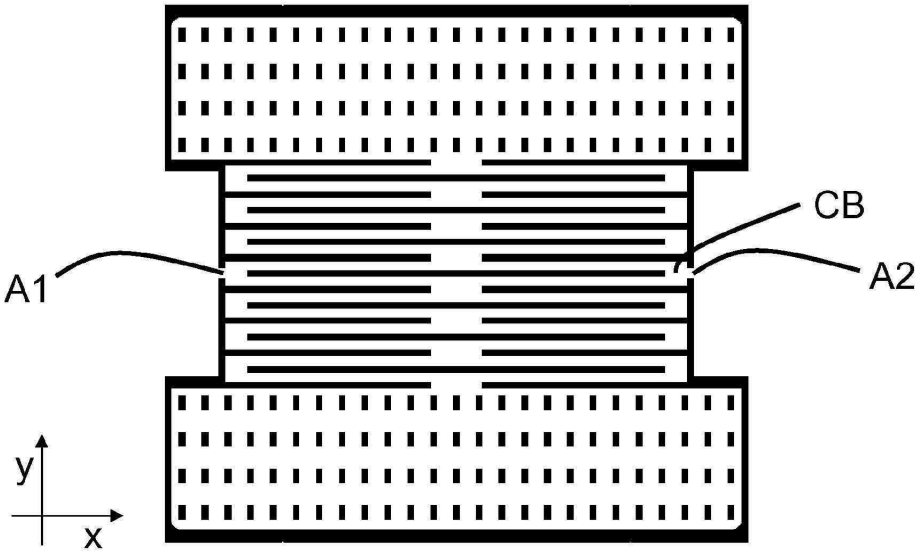
도면3



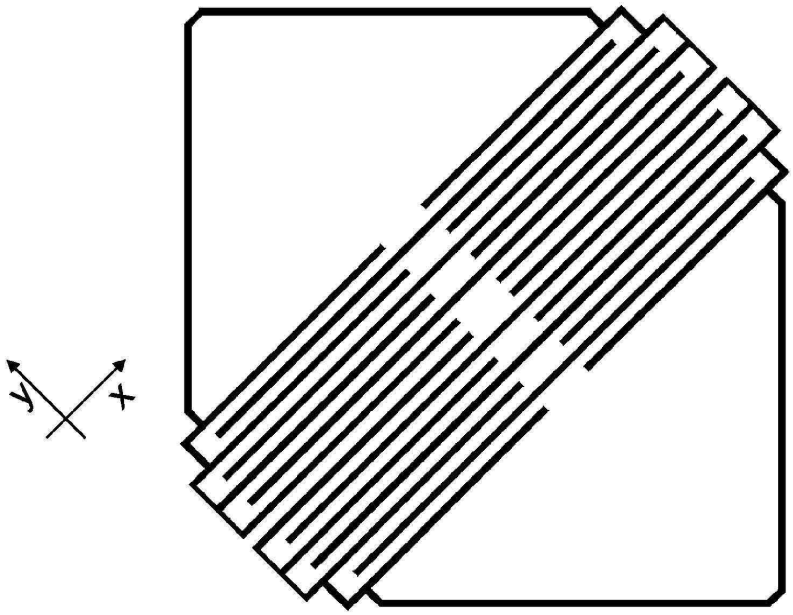
도면4


R098_C058
04364M Q=17059 Rm=133139 C0=2.14p k2=0.075% FOM=12.81 Rs=0.0
Log10 (1/Z)
-5.0
-5.5
-6.0
-6.5
-7.0
-7.5
no name
f=04364M Q=17059
Rm=133139 C0=2.14p k2=0.075%
FOM=12.81 Rs=0.0 ffval=2
43610
43620
43630
43640
43650
43660
43670
300
200
100
0
-100
-200
φ [deg]
측정된 (measured)
피팅된(fit)
눈 가이드(guide for eye)

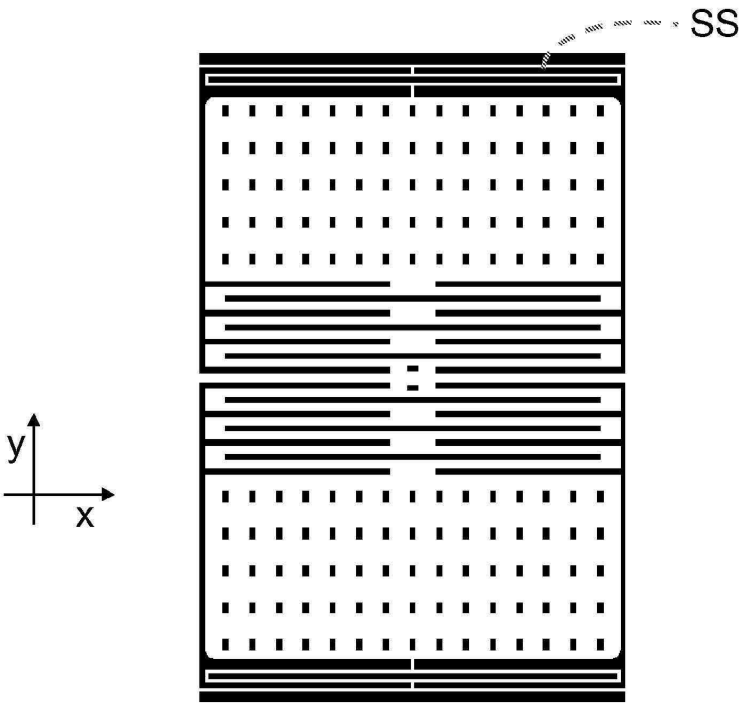
도면5


CB
A1
A2
y
x

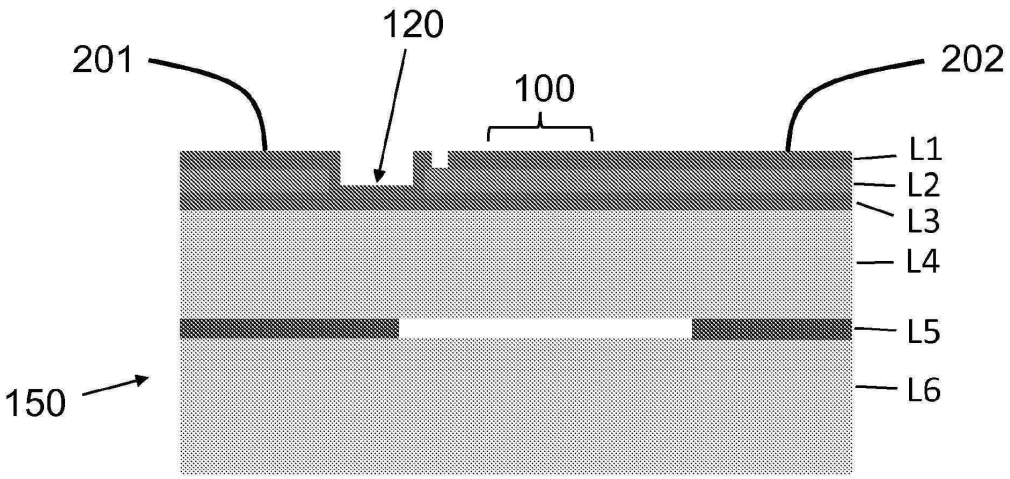
도면6



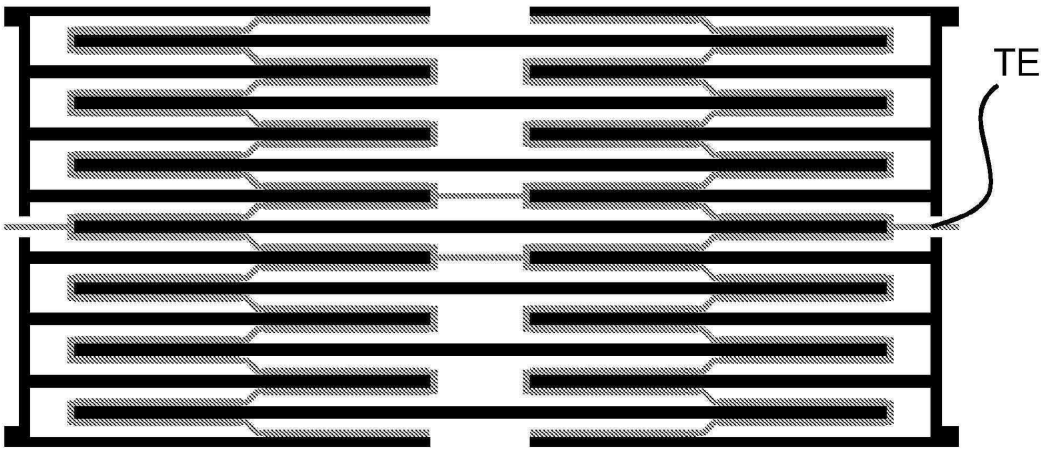
도면7



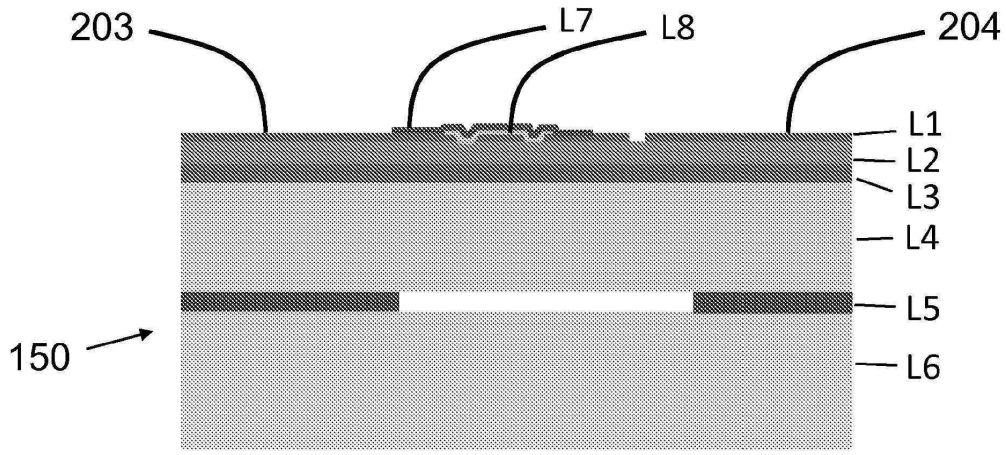
도면8


201
120
100
202
L1
L2
L3
L4
L5
L6
150

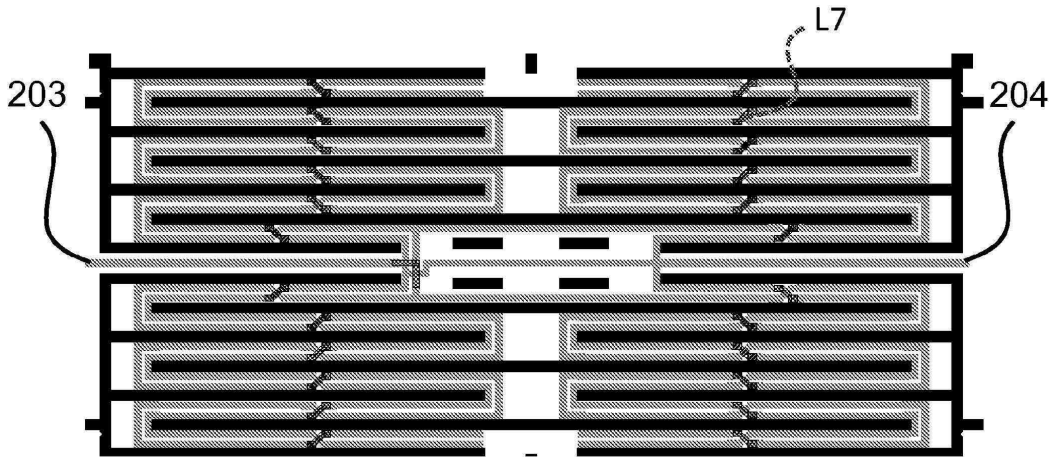
도면9


TE

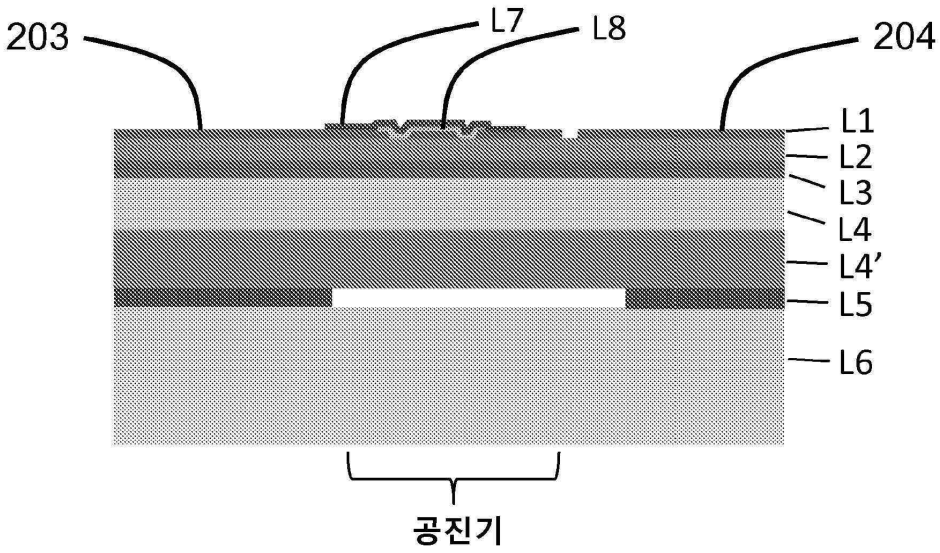
도면10


203
L7
L8
204
L1
L2
L3
L4
L5
L6
150

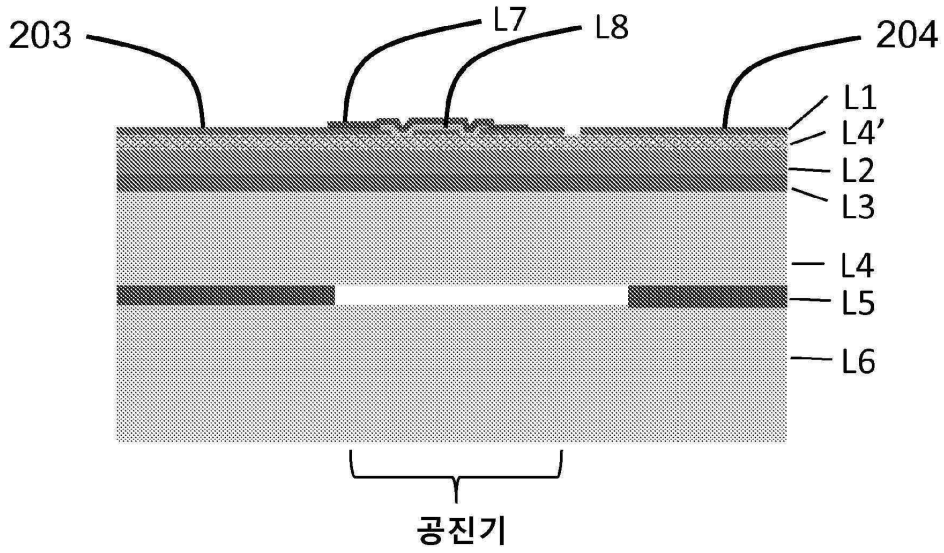
도면11



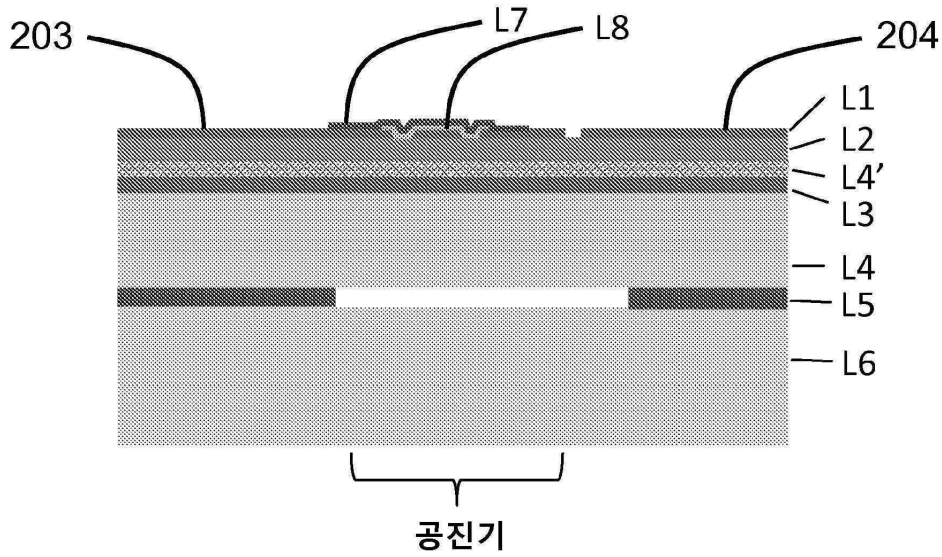
도면12a



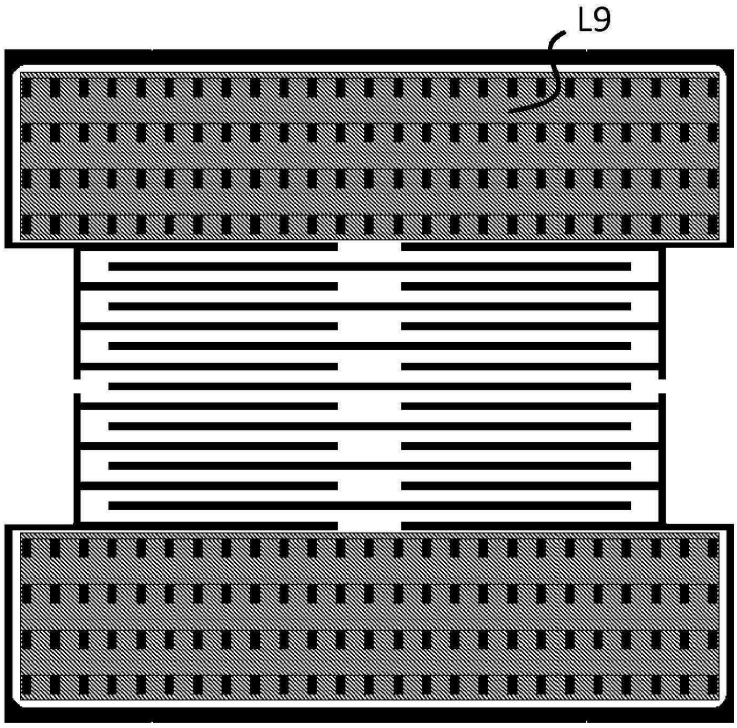
도면12b


203
L7
L8
204
L1
L4'
L2
L3
L4
L5
L6
공진기

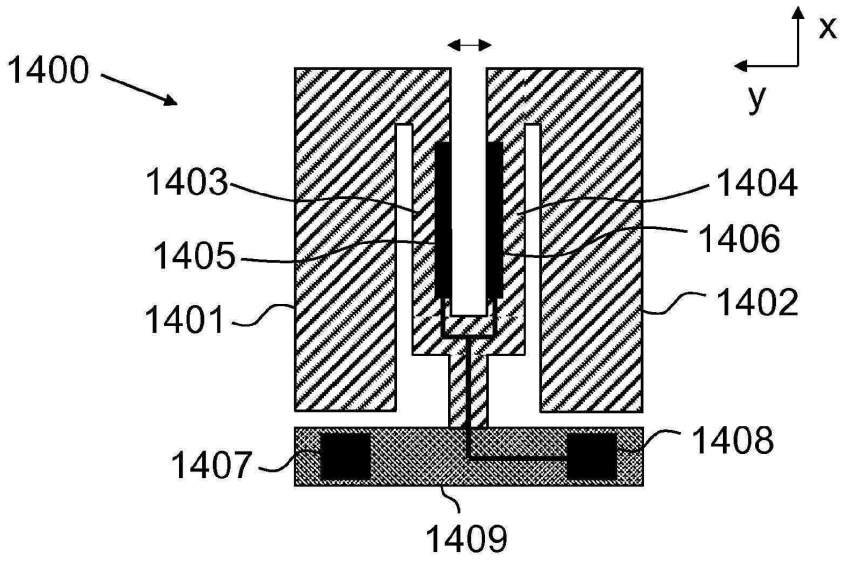
도면12c


203
L7
L8
204
L1
L2
L4'
L3
L4
L5
L6
공진기

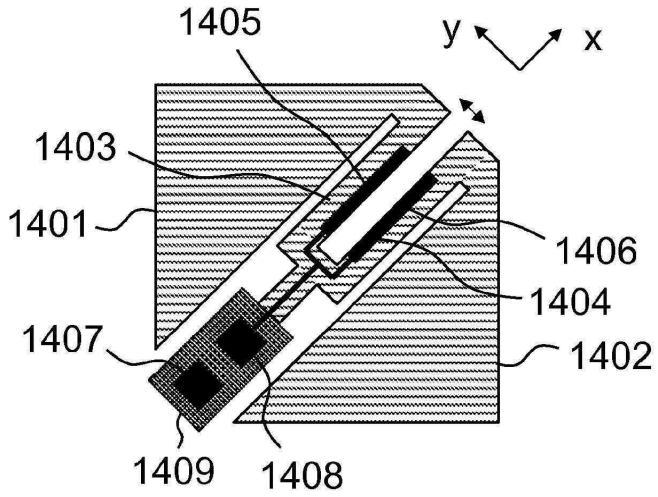
도면13



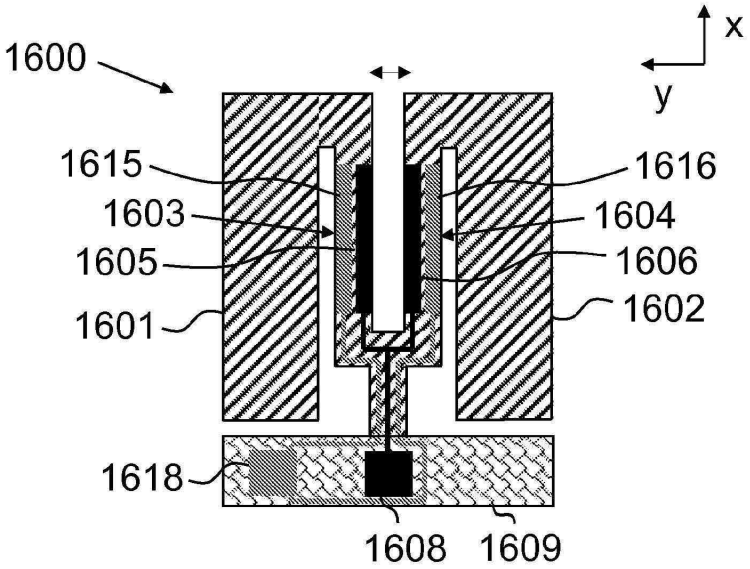
도면14



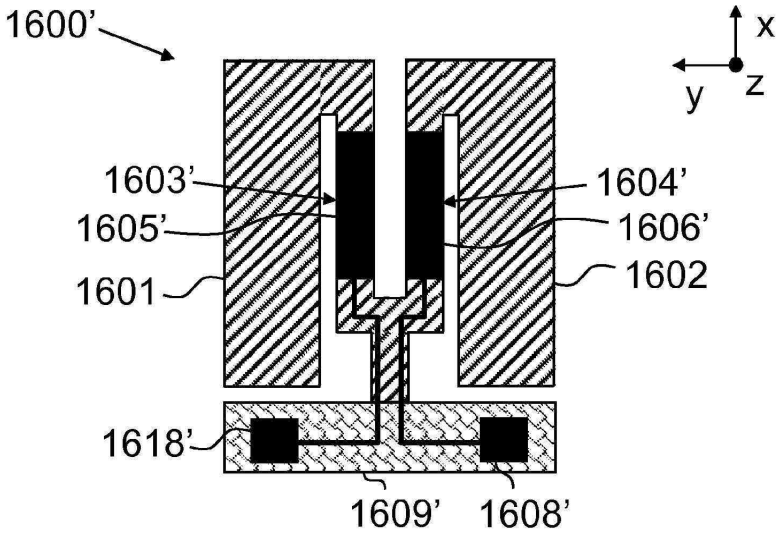
도면15


1405
y
x
1403
1401
1406
1404
1407
1402
1409
1408

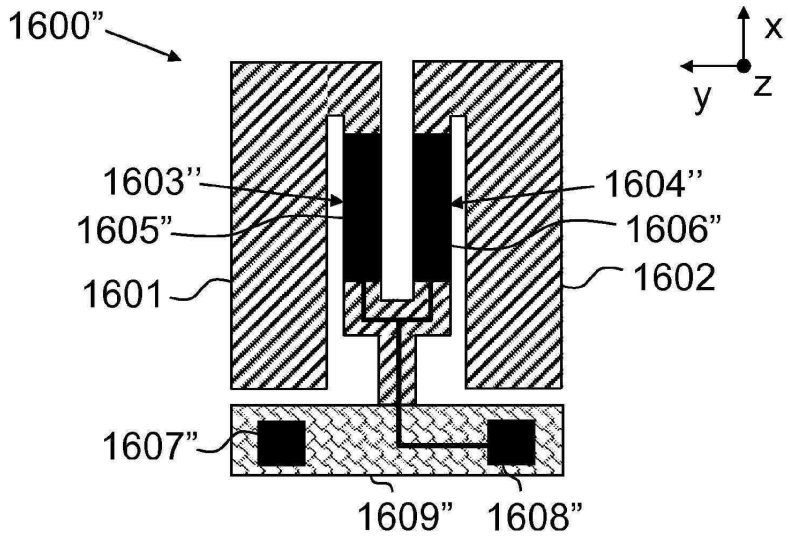
도면16a


1600
x
y
1615
1616
1603
1604
1605
1606
1601
1602
1618
1608
1609

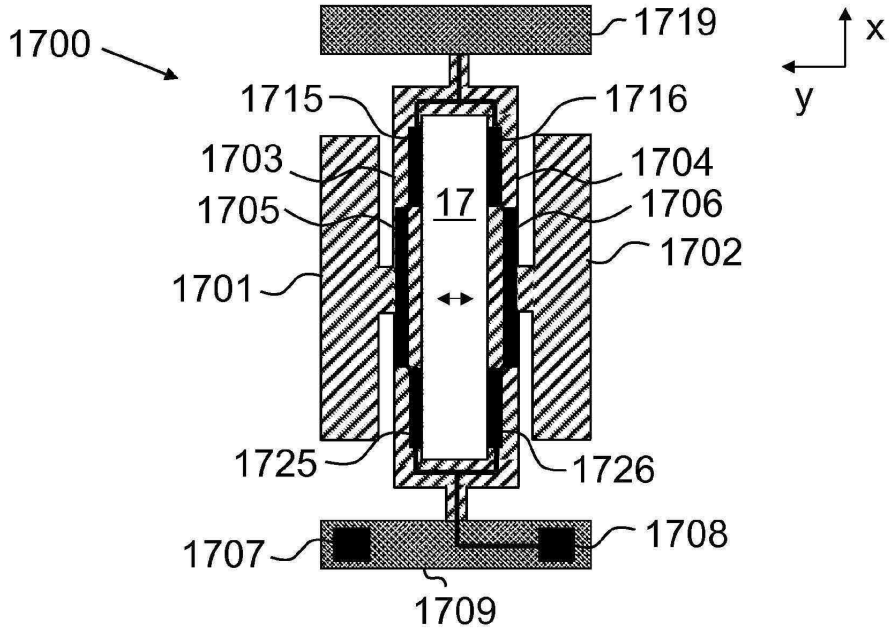
도면16b


1600'
x
y
z
1603'
1604'
1605'
1606'
1601
1602
1618'
1609'
1608'

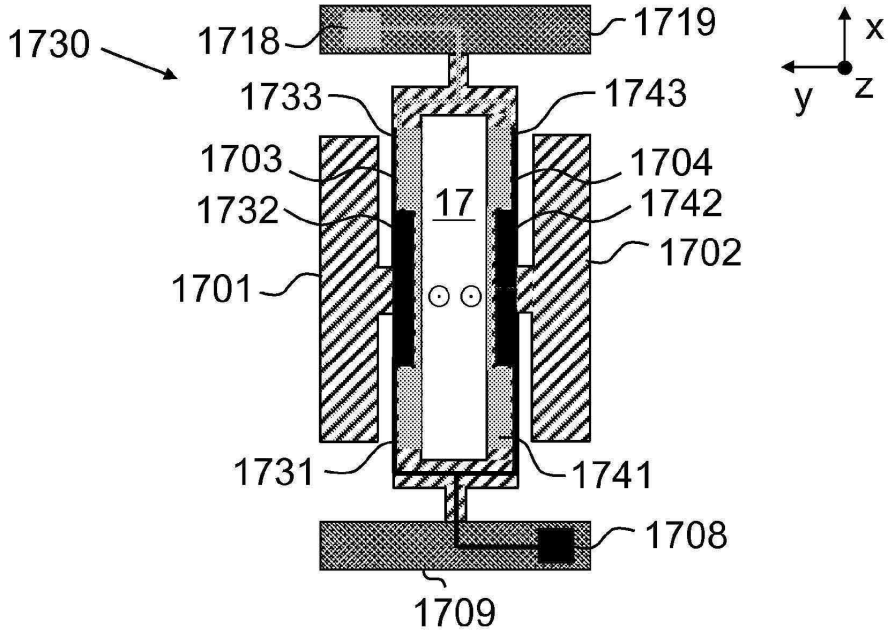
도면16c


1600"
x
y
z
1603''
1604''
1605"
1606"
1601
1602
1607"
1609"
1608"

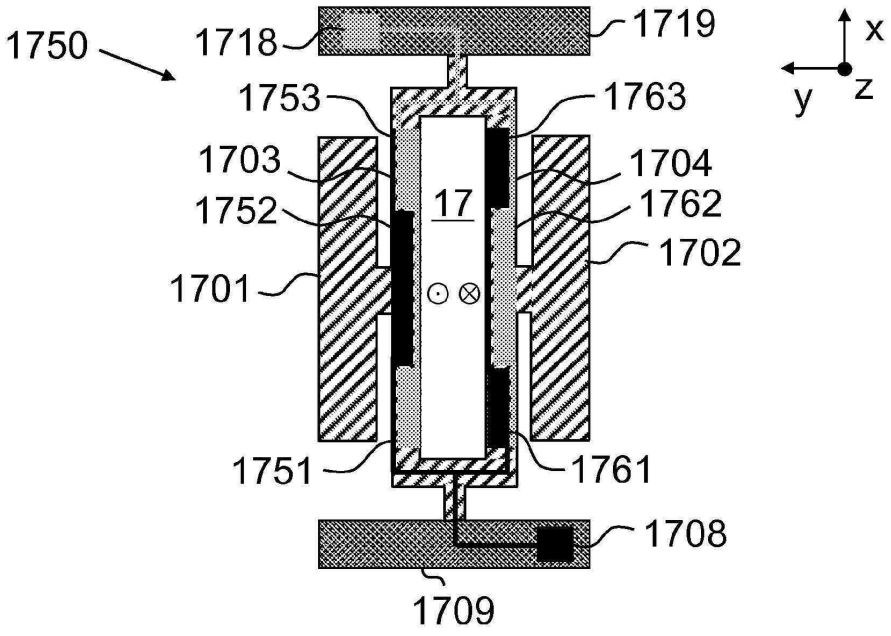
도면17a


1700
1719
x
y
1715
1716
1703
1704
17
1705
1706
1702
1701
1725
1726
1707
1708
1709

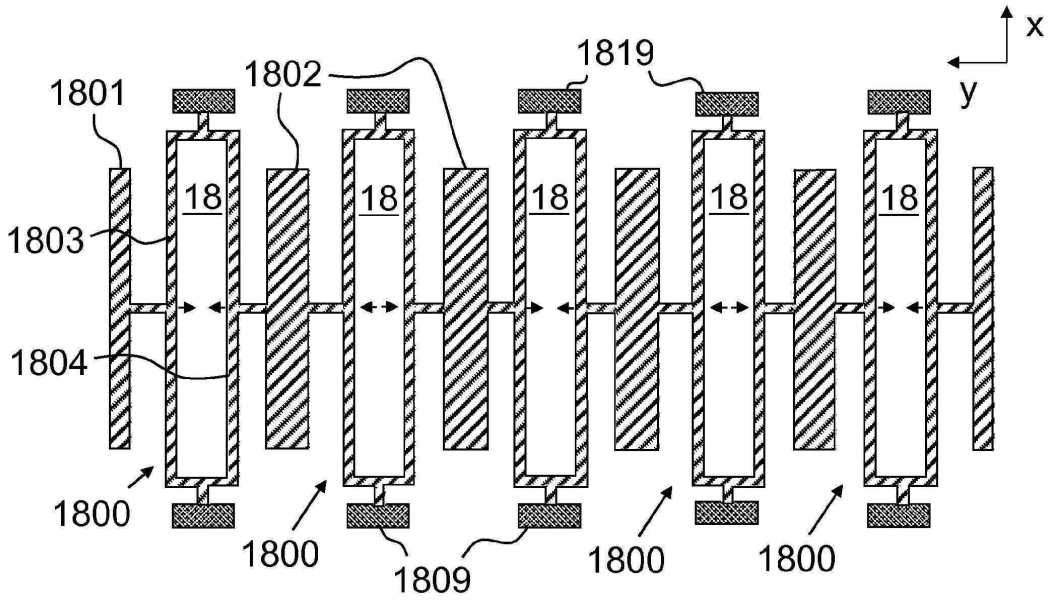
도면17b


1730
1718
1719
x
y
z
1733
1743
1703
1704
17
1732
1742
1702
1701
1731
1741
1708
1709

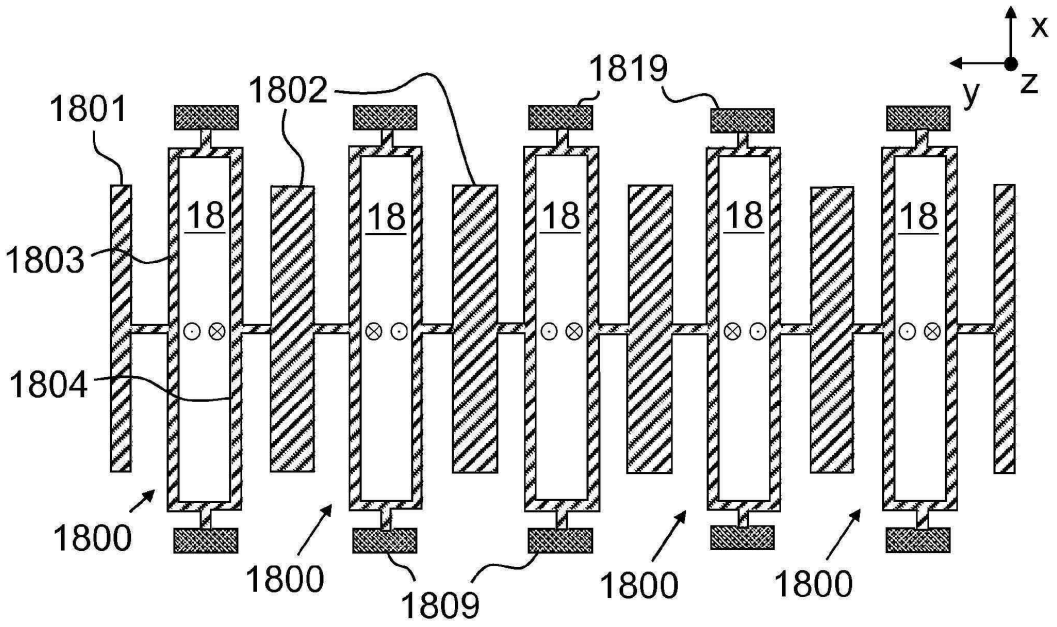
도면17c


1750
1718
1719
x
y
z
1753
1763
1703
1704
17
1752
1762
1702
1701
1751
1761
1708
1709

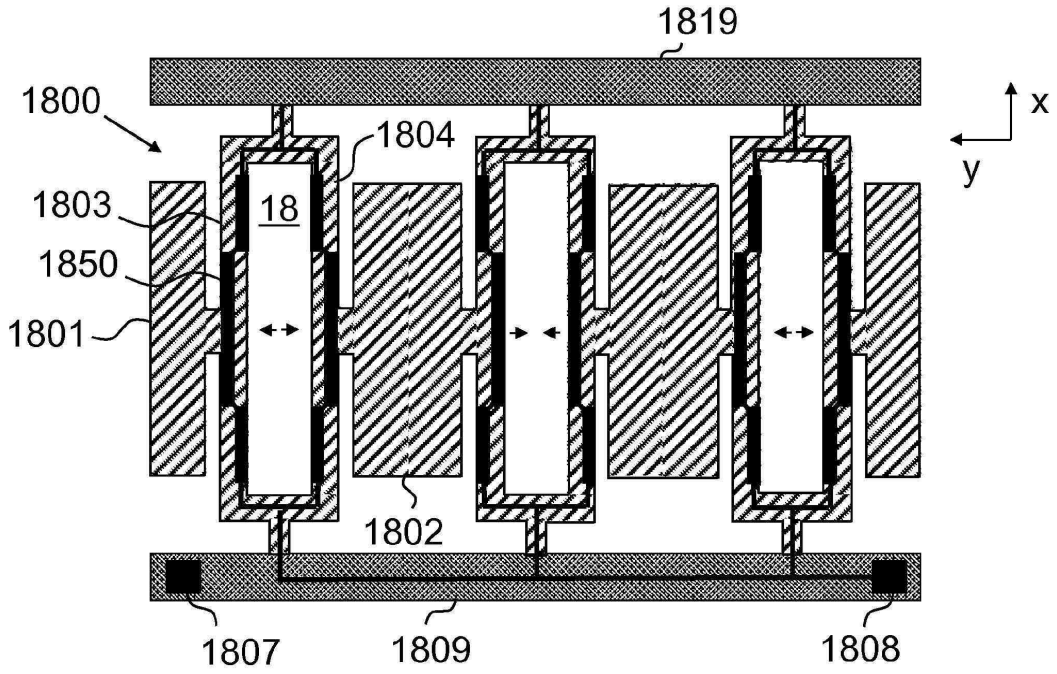
도면18a


x
y
1801
1802
1819
18
1803
1804
1800
1809

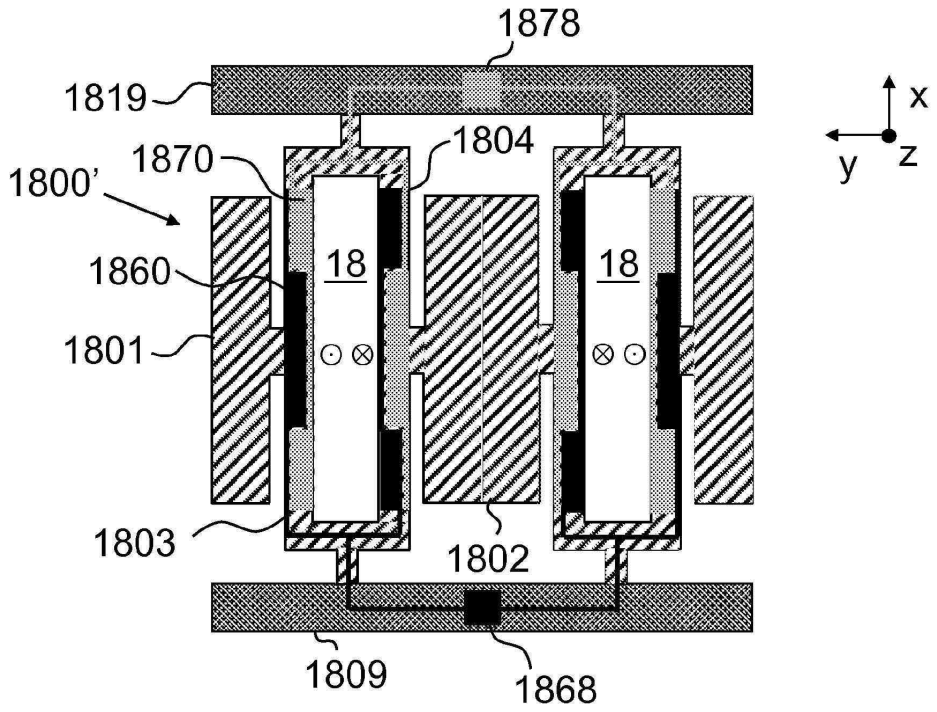
도면18b


x
y
z
1819
1801
1802
18
1803
1804
1800
1809

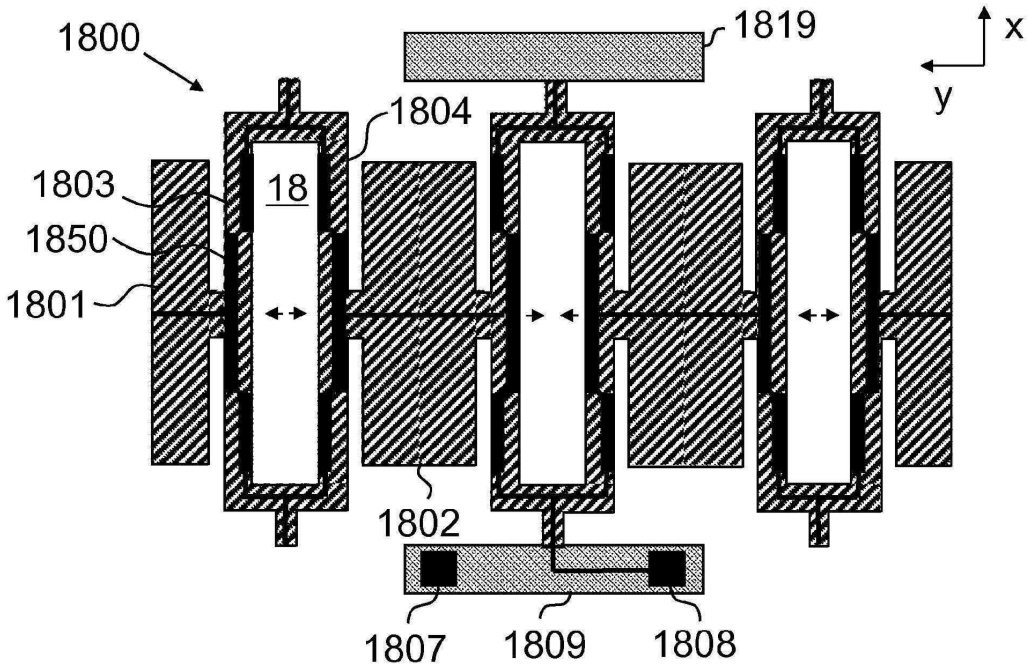
도면19a


1819
1800
x
y
1804
18
1803
1850
1801
1802
1807
1809
1808

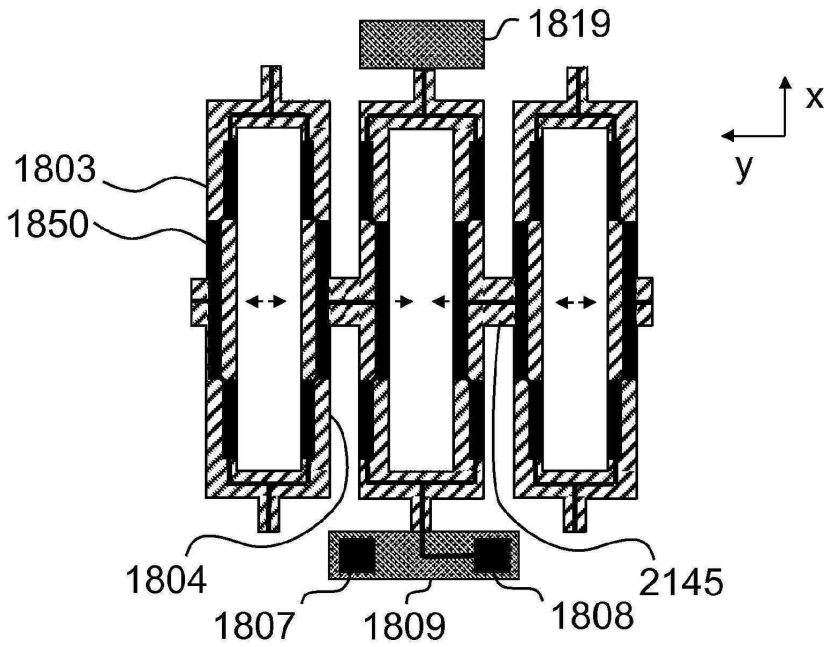
도면19b


1878
1819
1804
1870
1800'
18
18
1860
1801
1803
1802
1809
1868
x
y
z

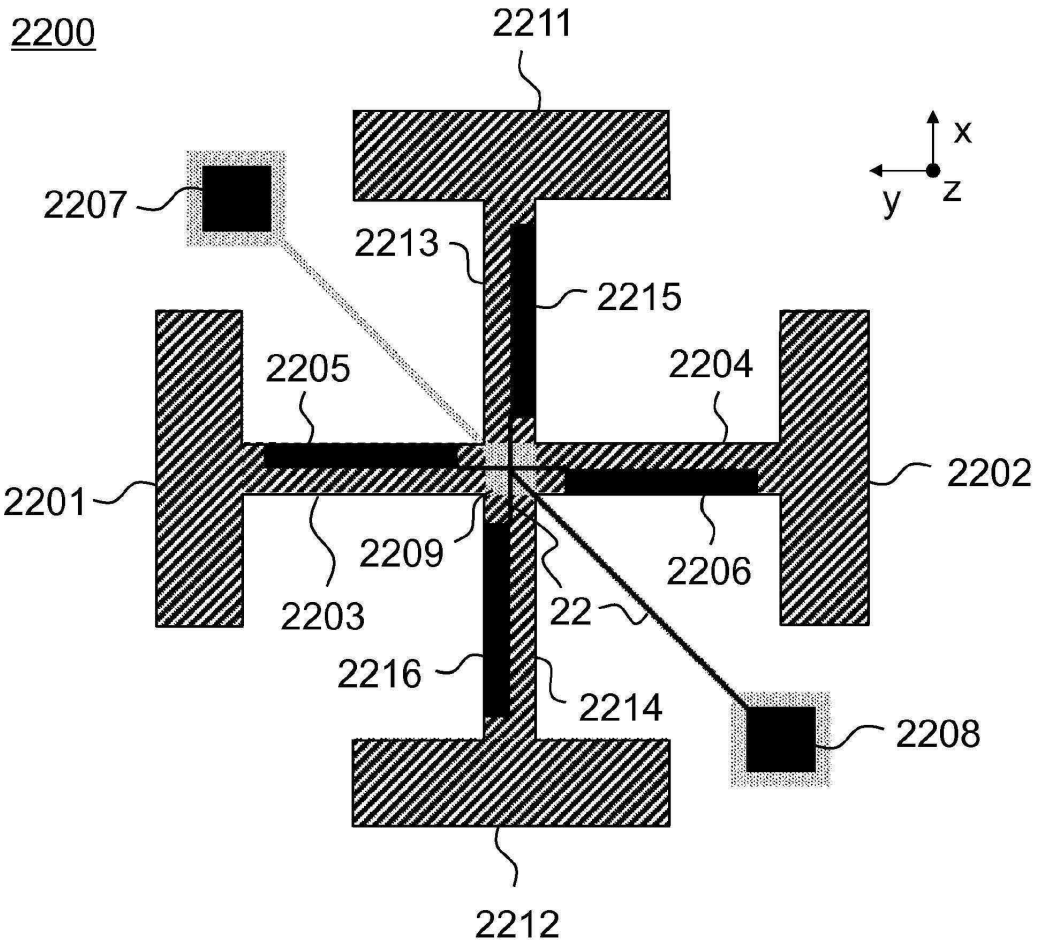
도면20


1800
1819
x
y
1804
1803
18
1850
1801
1802
1807
1809
1808

도면21


1819
x
y
1803
1850
1804
1807
1809
1808
2145

도면22


2200
2211
x
y
z
2207
2213
2215
2205
2204
2202
2201
2209
2206
2203
22
2216
2214
2208
2212