

(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。 Int. Cl.⁸
G01G 3/16 (2006.01)

(45) 공고일자 2006년02월20일
(11) 등록번호 10-0552696
(24) 등록일자 2006년02월09일

(21) 출원번호 10-2003-0079898
(22) 출원일자 2003년11월12일

(65) 공개번호 10-2005-0045728
(43) 공개일자 2005년05월17일

(73) 특허권자 삼성전자주식회사
경기도 수원시 영통구 매탄동 416

(72) 발명자 이수석
경기도수원시팔달구영통동벽적골9단지아파트912-1504

문원규
경상북도포항시남구효자동산31

이열호
경상북도포항시남구효자동산31

(74) 대리인 리엔목특허법인
이혜영

심사관 : 장종윤

(54) 발진회로가 적용된 미세 질량 측정 장치 및 방법

요약

발진회로가 적용된 미세 질량 측정 장치 및 방법이 개시되어 있다.

이 개시된 측정 장치는, 피검체가 부착되는 외팔보; 상기 외팔보 위에 구비되는 압전체; 상기 외팔보를 능동적으로 진동시킴과 아울러 피검체로 인한 외팔보의 변화된 공진주파수를 제공하는 발진 회로; 상기 외팔보의 공진주파수를 측정하기 위한 주파수 측정기;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

상기 구성에 의해, 단일 압전체를 이용하여 외팔보의 능동 구동과 공진주파수의 측정 모두를 수행하기 때문에 가진기와 공진주파수 변화량을 측정하는 장비가 독립적으로 구비될 필요가 없고, 이에 따라, 측정 장치의 설비가 단순해지고, 미세 외팔보는 MEMS 공정기술을 이용하여 초소형화 할 수 있다.

대표도

도 2

명세서

도면의 간단한 설명

- 도 1은 종래의 미세 외팔보 센서의 개략적인 구성도이다.
- 도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 미세 질량 측정 장치의 개략적인 구성도이다.
- 도 3(a) 및 도 3(b)는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 외팔보의 형상을 나타낸 것이다.
- 도 4는 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 외팔보의 길이에 대한 분해능을 나타낸 것이다.
- 도 5는 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 외팔보의 길이에 대한 폭의 비에 따른 분리 계수(separation factor)를 나타낸 것이다.
- 도 6은 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 압전체가 증착된 외팔보의 유한요소 모델을 나타낸 것이다.
- 도 7a는 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 압전체의 두께에 대한 출력 전류를 나타낸 것이다.
- 도 7b는 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 압전체의 길이에 대한 출력 전류를 나타낸 것이다.
- 도 8은 MEMS 공정에 의해 제작된 압전체가 증착된 외팔보의 사진을 나타낸 것이다.
- 도 9는 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치에 채용되는 발진회로에 의한 자가 진동 신호와 피드백 신호를 나타낸 것이다.

<도면 중 주요 부분에 대한 설명>

- 50...외팔보, 53...압전체
- 57...증폭부, 58...피드백부
- 60...발진회로, 65...주파수 측정기

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 유전자나 단백질과 같이 미세한 생체물질의 질량을 측정하기 위한 장치 및 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 발진 회로를 이용하여 미세 외팔보를 가진시킴과 아울러 미세 질량을 측정할 수 있는 장치 및 방법에 관한 것이다.

질량 마이크로-밸런싱(Mass micro-balancing) 기법은 미세 구조물의 공진주파수가 구조물의 질량 증가로 인해 변화한 것을 측정하고, 변화된 공진주파수로부터 증가된 질량을 알아내는 방법이다.

질량 마이크로-밸런싱 기법을 이용하여 미세 질량을 측정하는 대표적인 방법으로 QCM(Quartz Crystal Mass micro-balancing)이 있다. QCM에서의 공진주파수 변화와 질량 증가 사이의 관계는 Sauerbrey에 의해 체계적으로 정립되었으며, 이 이론에 따르면 공진주파수는 질량이 증가함에 따라 선형적으로 감소된다.

QCM은 주로 박막 형태의 피검체에서 단위 면적당 분포하는 질량을 측정하는데 이용되며, 수정진동자의 전단 모드(shear mode)의 변화를 통해 증가된 질량을 측정한다. QCM은 전기적 신호의 입출력이 쉽고 민감도가 뛰어난 장점을 갖고 있으나, 수정진동자 표면에 질량이 고르게 분포되어야 하며, 높은 공진주파수의 전단 모드를 이용한다는 점이 단점이다.

이밖에 질량 마이크로-밸런싱 기법을 이용하여 질량을 측정하는 대표적인 방법으로 광을 이용하는 방법과 압저항을 이용하는 방법이 있다.

종래에 광을 이용하여 미세 질량을 측정하는 센서가 U.S. No. 5,719,324호에 개시되어 있다. 이 센서는 도 1에 도시된 바와 같이, 외팔보(12)가 압전체(10)에 의해 지지되고, 상기 외팔보(12)의 끝부분에 레이저 다이오드(19)에 의해 레이저를 주사하도록 되어 있다. 그리고, 오실레이터(14)로부터의 펄스파(16)에 의해 상기 압전체(10)가 가진되어 외팔보(12)가 함께 가진된다.

상기 외팔보(12)에 피검체가 올려짐으로써 피검체의 질량 증가로 인해 외팔보에 변형이 발생했을 때, 상기 외팔보(12)로부터 반사되는 레이저(20)를 제1 및 제2 셀(23)(29)을 가진 광검출기(27)에 의해 검출한다. 상기 광검출기(27)에 의해 검출된 광량에 기초하여 외팔보(12)의 변위를 측정함으로써 변화된 질량을 알아낸다. 미설명 부호 30 및 34는 카운팅 회로를, 36 및 37은 미분회로를, 38 및 39는 미분회로부터 출력되는 신호를 각각 나타낸다.

그런데, 광을 이용하는 방법은 레이저와 광검출기의 정확한 위치제어가 요구되기 때문에 위치 제어를 위한 장치가 별도로 필요하다. 또한 외팔보를 가진시키기 위한 수단과 질량을 측정하기 위한 수단이 독립적으로 구비되므로 장치가 복잡하고, 부피가 큰 단점이 있다.

또한, 압저항을 이용하는 방법으로는, 외팔보에 압저항 물질을 도핑(doping)하여 증가된 질량으로 인한 외팔보의 변형으로 저항이 변하고, 그로 인해 변화된 출력 전압을 측정하여 질량을 측정하는 방법이 있다.

그러나, 상기와 같은 방법들은 외팔보를 능동적으로 가진하지 않기 때문에 외팔보의 변위가 작아 미세 질량을 정밀하게 측정하는 것이 어렵다. 또한, 변화된 저항을 측정하기 위한 측정 장비 및 가진을 위한 입력신호와 질량의 증가로 인해 변화된 공진주파수의 출력신호를 비교하는 장치 등 필요한 주변 장비가 많아 제작 비용이 많이 들고, 장치의 부피가 커지는 단점이 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명은 상기한 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 미세 외팔보에 발진회로를 적용하여 외팔보를 능동적으로 자가 진동함과 아울러 별도의 측정 장비의 추가없이 피검체의 미세 질량을 측정함으로써 장비가 간단하면서도 정밀하게 미세 질량을 측정할 수 있는 장치 및 측정 방법을 제공하는데 목적이 있다.

발명의 구성 및 작용

상기한 목적을 달성하기 위하여 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치는, 피검체가 부착되는 외팔보; 상기 외팔보 위에 구비되는 압전체; 상기 외팔보를 능동적으로 진동시킴과 아울러 피검체로 인한 외팔보의 변화된 공진주파수를 제공하는 발진회로; 상기 외팔보의 공진주파수를 측정하기 위한 주파수 측정기;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

상기 발진회로는, 상기 외팔보로부터의 출력 신호를 증폭하는 증폭부와, 상기 증폭부로부터의 신호를 상기 외팔보에 입력하는 피드백부를 구비한다.

상기 외팔보의 형상비는 민감도와 분리 계수에 의해 정해지는 것이 바람직하다.

상기 분리 계수는 외팔보의 첫 번째 공진 주파수와 피검체로 인해 변화된 두 번째 공진주파수의 차를 첫 번째 공진주파수로 나눈 값인 것을 특징으로 한다.

상기 외팔보의 형상비가 길이 : 폭 : 두께 = (20 : 6 : 1)~(20:18:1)의 범위를 가지는 것이 바람직하다.

상기 목적을 달성하기 위하여 본 발명에 따른 방법은, 질량 마이크로-벨런싱을 이용하여 미세 질량 측정을 하는 방법에 있어서,

발진 회로에 의해 압전체를 통해 외팔보를 첫 번째 공진주파수로 자가 진동시키는 단계; 상기 외팔보에 피검체를 부착하고, 상기 피검체로 인해 변화된 첫 번째 공진주파수로 상기 외팔보를 자가 진동시키는 단계; 상기 첫 번째 공진주파수와 변화된 첫 번째 공진주파수를 측정하고, 피검체로 인한 공진주파수의 변화량을 이용하여 피검체의 질량을 측정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

이하, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 미세 질량 측정 장치 및 방법에 대해 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치는, 도 2를 참조하면 피검체(p)의 질량을 측정하기 위해 미세 외팔보(50)와, 이 미세 외팔보(50)를 능동적으로 자가 진동함과 아울러 미세 외팔보의 변화된 공진주파수를 측정할 수 있는 발진 회로(60)를 포함한다.

상기 피검체(p)로는 예를 들어, 유전자나 단백질과 같은 미세한 생체 물질이 될 수 있다.

상기 외팔보(50) 상에 압전체(53)가 구비되고, 상기 압전체(53)에 발진 회로(60)가 결합된다. 상기 압전체(53)는 PZT가 상기 외팔보(50)상에 증착되어 형성될 수 있다.

상기 발진 회로(60)는 증폭부(amplifier)(57)와 피드백부(feedback)(58)를 포함한다. 상기 증폭부(57)는 상기 압전체(53)에서 출력되는 미세 외팔보(50)의 첫 번째 공진주파수를 증폭시키고, 상기 피드백부(58)는 압전체(53)가 외팔보(50)를 첫 번째 공진주파수로 계속 진동시킬 수 있도록 한다.

또한, 상기 발진 회로(60)에 상기 외팔보(50)의 공진주파수 변화량을 측정하기 위한 주파수 측정기(65)가 결합된다. 상기 주파수 측정기(65)는 예를 들어, 펄스 카운터(pulse counter)를 이용하여 간단한 전기 회로로 구성될 수 있다. 상기 주파수 측정기(65)를 상기 발진 회로(60)에 결합하면 외팔보(50)에 유전자나 단백질과 같은 미세한 생체 피검체(p)를 올려 놓았을 때, 피검체(p)의 질량 증가로 인한 작은 크기의 공진주파수 변화를 쉽게 측정할 수 있다.

상기한 바와 같이, 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치는, 압전체(53)가 결합된 미세 외팔보(50)에 발진 회로(60)를 적용함으로써, 외팔보가 첫 번째 공진주파수로 지속적으로 진동할 수 있도록 한다. 그리고, 미세 외팔보(50)에 피검체(p)를 올려놓은 다음, 이 피검체(p)에 의해 변화된 공진주파수를 상기 주파수 측정기(65)를 이용하여 구한다. 이와 같이 함으로써, 단일 압전체를 통한 외팔보의 자가 진동 및 질량 측정이 가능하게 된다.

그리고, 본 발명의 측정 장치는 상기 미세 외팔보(50)가 자가 진동을 할 때 외팔보에 부착된 피검체(p)로 인해 변화된 공진주파수를 측정하기 위한 주파수 측정기(65), 측정된 주파수 변화량을 컴퓨터에 전송하기 위한 데이터 전송 장치(미도시)를 더 포함한다.

본 발명에 따른 방법은 유전자나 단백질과 같이 미세한 생체질량을 측정하기 위해 발진 회로(60)가 적용된 미세 외팔보(50)의 단부에 단백질이나 DNA와 같은 생체 피검체(p)를 부착하고, 질량 마이크로-밸런싱(mass micro-balancing) 기법을 통하여 부착된 피검체의 미세 질량을 측정한다.

압전체(53)가 증착된 미세 외팔보(50)는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 공정을 통하여 제작이 가능하고, 피검체(생체 물질)(p)는 생화학적 반응을 통해 상기 미세 외팔보(50)의 끝에 부착시킬 수 있다.

상기 발진회로(60)는 상기 미세 외팔보(50)로부터의 신호를 증폭하는 증폭부(57)와, 이를 다시 미세 외팔보(50)에 입력하는 피드백부(58)를 포함한다. 그리고, 발진회로(60)에 전압을 공급하기 위한 전원(59)이 구비된다. 여기서, 상기 전원(59)으로는 펄스 또는 스텝형 전원인 것이 바람직하다. 또한, 소형 건전지로도 구동이 가능하다.

미세 외팔보(50)는 간단한 기계적 구조물이면서 그 변위가 크게 나타나고, MEMS 공정을 통하여 초소형화할 수 있으므로 유전자나 단백질과 같은 생체 물질의 질량을 측정할 수 있는 LOC(Lab-On-a-Chip)에 적용 가능하다.

상기 미세 외팔보(50)는 미세 질량 측정에 유리한 민감도를 갖도록 하는 형상 및 크기를 갖는 것이 바람직하다. 예를 들어, 유전자나 단백질의 질량 밀도가 $10^{-15} \text{g}/\mu\text{m}^2$ 일 때, 대략 $10^{-15} \text{g}/\text{Hz}$ 의 분해능, 대략 $1 \text{Hz}/10^{-15} \text{g}$ 의 민감도를 가지는 형상 및 크기를 가지는 것이 좋다.

다시 말하면, 외팔보의 형상은 미세 질량을 측정할 때 요구되는 민감도를 만족하는 한도 내에서 가능한 간단한 형상과 크기를 갖는 것이 바람직하다. 외팔보가 간단한 형상과 크기를 가진다면 MEMS 제조 공정을 단순화하는데 유리하다.

더 나아가, 미세 외팔보(50)는 미세 질량을 측정하기에 적당한 분리계수(separation factor)를 만족시키는 형상과 크기를 갖는 것이 바람직하다. 민감도와 분리계수를 같이 만족시키는 다양한 형상이 가능하지만, 예를 들어, 상기 외팔보(50)는 삼각형과 사각형 형상을 가질 수 있다. 이하, 외팔보(50)의 형상이 삼각형일 때와 사각형일 때의 민감도와 분리계수(separation factor)에 대해 살펴본다.

상기 미세 외팔보(50)에 피검체(p)가 부착되지 않은 경우, 외팔보가 직사각형일 때의 공진주파수를 f_r , 강성(stiffness)을 k_r , 질량을 m_r 이라 하고, 삼각형일 때의 공진주파수를 f_t , 강성을 k_t , 질량을 m_t 라고 할 때, 직사각형 형상의 외팔보와 삼각형 형상의 외팔보 각각의 공진주파수는 다음과 같다.

수학식 1

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{0.24m_r}}$$

수학식 2

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{0.07m_t}}$$

다음, 상기 외팔보에 피검체(p)를 부착하여 질량의 변화(Δm)가 있을 때, 변화된 공진주파수 f_{0r} 과 f_{0t} 는 각각 다음과 같다.

수학식 3

$$f_{0r} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{\Delta m + 0.24m_r}}$$

수학식 4

$$f_{0t} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{\Delta m + 0.07m_t}}$$

상기 수학식 1 및 3을 이용하여 외팔보가 사각형 형상일 때 피검체(p)로 인한 미세 질량의 변화에 따른 공진주파수의 변화량 Δf_r 을 구하면 다음과 같다.

수학식 5

$$\Delta f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{0.24m_r}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta m / 0.24m_r}} \right)$$

또한, 수학식 2 및 4를 이용하여 외팔보가 삼각형일 때 피검체(p)로 인한 미세 질량의 변화에 따른 공진주파수의 변화량 Δf_t 를 구하면 다음과 같다.

수학식 6

$$\Delta f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{0.07m_t}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta m / 0.07m_t}} \right)$$

여기서, 외팔보의 질량(m_r)(m_t)이 피검체(p)의 질량(Δm)에 비해 충분히 크므로 $\Delta m / m \ll 1$ 이라는 가정을 수학식 5 및 6에 적용하고, Taylor's expansion에 따라 정리하면, Δf_r 과 Δf_t 는 근사식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 7

$$\Delta f_r \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{0.24m_r}} \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta m}{0.24m_r} \right)$$

수학식 8

$$\Delta f_t \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{0.07m_t}} \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta m}{0.07m_t} \right)$$

수학식 1 및 2와 수학식 7 및 8에 의하면, 피검체(p)로 인한 질량 변화 Δm 에 따른 공진주파수 변화 Δf 와, 질량 증가 전 외팔보의 질량 m 과 공진주파수 f 사이의 관계는 하기의 수학적식과 같이 나타난다.

수학식 9

$$\frac{\Delta m}{\Delta f} \propto \frac{m}{f}$$

상기 수학식 9에서 $\Delta m/\Delta f$ (g/Hz)는 분해능을 나타내며, 민감도는 분해능의 역수로 분해능이 낮을수록 좋은 민감도를 갖는다. 즉, 단위 질량당 공진주파수의 크기가 크게 변하는 경우가 민감도가 큰 것을 의미한다.

또한, 미세 외팔보의 분해능은 외팔보 자체의 m/f 에 비례하며, 민감도는 f/m 에 비례한다. 따라서, 질량이 작고 공진주파수가 크도록 된 크기와 형상을 가지는 외팔보가 미세 질량 측정기에 적당하다.

다음, 도 3(a) 및 도 3(b)에 도시된 바와 같이, 상기 수학식 7 및 8에서 외팔보의 강성(k_r)(k_t)과 질량(m_r)(m_t)을 외팔보(50)의 길이(L), 폭(b), 두께(t)로 표현함으로써 동일한 재질과 길이, 폭 및 두께를 갖는 사각형의 외팔보와 삼각형의 외팔보에 대한 민감도를 비교해 보고자 한다.

먼저, 외팔보의 강성(k_r)(k_t)은 그 형상이 사각형일 때와 삼각형일 때 각각 다음과 같다. 여기서, E, I, ρ 는 각각 외팔보의 탄성계수, 면적관성 모멘트(second moment of inertia of area), 밀도를 나타낸다.

수학식 10

$$k_r = \frac{3EI}{L^3} = \left(\frac{E}{4}\right)\left(\frac{bt^3}{L^3}\right)$$

수학식 11

$$k_t = \left(\frac{E}{6}\right)\left(\frac{bt^3}{L^3}\right)$$

다음, 외팔보의 질량(m_r)(m_t)은 그 형상이 사각형일 때와 삼각형일 때 각각 다음과 같다.

수학식 12

$$m_r = \rho bLt$$

수학식 13

$$m_t = \frac{1}{2} \rho bLt$$

그리고, 상기 수학식 7에 수학식 10과 12를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

수학식 14

$$\left(\frac{\Delta f}{\Delta m}\right)_r \approx 2.1 \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left(\frac{E^{1/2}}{\rho^{3/2}}\right) \left(\frac{1}{bL^3}\right)$$

다음, 수학식 8에 수학식 11과 13을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

수학식 15

$$\left(\frac{\Delta f}{\Delta m}\right)_t \approx 30 \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left(\frac{E^{1/2}}{\rho^{3/2}}\right) \left(\frac{1}{bL^3}\right)$$

수학식 14와 15를 비교해 보면, 외팔보의 형태가 삼각형일 때의 민감도($\Delta f/\Delta m$)_t가 사각형일 때의 민감도($\Delta f/\Delta m$)_r보다 상대적으로 크다. 따라서, 외팔보는 다양한 형상을 가질 수 있지만 바람직하게는 삼각형 형상을 갖는 것이 좋다. 하지만, 미세 질량 측정에 요구되는 민감도와 분리계수를 만족시키는 한 사각형의 미세 외팔보도 가능성은 물론이다.

한편, 도 4는 외팔보의 형상이 삼각형일 때와 사각형일 때 외팔보의 길이에 대한 분해능을 각각 나타낸 것이다. 분해능은 민감도의 역수로 그 크기가 작을수록 보다 좋은 민감도를 갖는 것이다. 도 4를 참조하면, 외팔보가 동일한 길이(L)를 가질 때, 삼각형 형상의 외팔보가 사각형 형상의 외팔보 보다 상대적으로 더 양호한 민감도를 나타낸다.

외팔보가 삼각형 형상을 가질 때, 외팔보의 구체적인 크기는 다음과 같이 구해질 수 있다. 먼저, 분리 계수(separation factor)라는 설계 인자를 정의하고, 분리 계수(separation factor)와 민감도를 만족하는 외팔보의 길이, 폭, 두께의 형상비를 결정한다. 분리 계수는 외팔보의 첫 번째 공진 주파수와 두 번째 공진 주파수의 차를 첫 번째 공진 주파수로 나눈 값으로 정의하며, 그 크기는 첫 번째 공진 모드가 나타난 후 두 번째 공진 모드가 발생할 때 두 공진 모드의 인접 정도를 나타낸다.

분리 계수(Separation factor)를 정의하는 이유는 다음과 같다. 무한 개의 진동 모드가 복합적으로 발생하는 연속체 구조물의 진동에서의 검출용 센서로 사용되는 외팔보는 첫 번째 공진 모드가 이용된다. 이때 두 번째 공진 주파수가 첫 번째 공진 주파수에 너무 근접해 있으면 첫 번째 공진 주파수를 측정하는데 혼란이 발생할 수 있다. 따라서 첫 번째 공진 주파수의 정확한 측정을 위해서 두 번째 공진 주파수와 첫 번째 공진 주파수가 어느 기준 이상의 차이가 나도록 하는 것이 필요하며, 그 기준을 제시하기 위해 분리 계수를 정의한다. 분리 계수는 삼각형 형상의 외팔보의 첫 번째 공진 주파수(f_{t1})와 두 번째 공진 주파수(f_{t2})의 차를 첫 번째 공진 주파수로 나눈 값으로 정의하였으므로, 다음의 수학식 16과 같이 표현될 수 있다.

수학식 16

$$\frac{f_{t2}-f_{t1}}{f_{t1}}$$

삼각형 외팔보의 형상은 길이, 폭, 두께의 형상비를 통해 구체적으로 결정되며, 형상비는 민감도와 분리 계수가 소정 범위 값을 만족시키도록 결정된다. 먼저, 삼각형 외팔보의 분리 계수에 대해 살펴본다.

도 5는 삼각형 외팔보의 분리 계수를 도시한 것으로, 가로축은 외팔보의 폭(b)을 길이(L)로 나눈 값(b/L)을, 세로 축은 (b/L)의 변화에 따른 분리 계수를 나타낸 것이다. 그리고 두께(t)에 대한 길이(L)의 비(t/L)가 각각 1/20, 1/50, 1/100 인 경우에 대해 각각 계산한 결과를 나타낸 것이다.

또한, 상기 수학식 2에 수학식 11 및 13을 대입하여 정리하면 다음과 같은 공진 주파수 f_t 를 구할 수 있다.

수학식 17

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho} \left(\frac{t}{L^2} \right)}$$

그리고, 미세 외팔보가 생체물질의 검출을 위해 작동하는 환경이 액체 속이므로 질량 증가 효과(Mass added effect)를 고려한다. 질량 증가 효과(Mass added effect)는 액체 속에서 미세 외팔보가 진동을 할 때 액체의 질량으로 인해 마치 외팔보의 질량이 증가된 것과 같은 효과를 나타내는 것을 말한다. 외팔보의 질량이 증가되면 외팔보의 공진 주파수가 감소된다. 상기 수학식 15에 따르면, 공진 주파수가 감소되면 민감도가 감소된다.

외팔보의 길이에 대한 두께 비(t/L)를 크게 함으로써 외팔보의 강성(stiff)을 충분히 크게 만들면 질량 증가 효과를 극복할 수 있다. 따라서, t/L이 1/20, 1/50, 1/100 인 것 중에서 가장 큰 값을 가지는 1/20을 t/L의 비로 정하는 것이 바람직하다.

한편, 도 5를 참조하면, t/L에 관계없이 분리 계수가 일정한 값(최대값)을 가지는 구간이 있다. b/L이 0.3 < b/L < 0.9 가 되는 구간에서 분리 계수가 최대가 된다.

상기 결과를 정리하면, t/L=1/20이고 b/L이 0.3~0.9의 범위를 가질 때 분리 계수와 민감도를 만족시키므로, 외팔보의 형상비는 L:b:t=(20:6:1)~(20:18:1)의 범위를 가지도록 결정되는 것이 바람직하다.

이러한 형상비를 바탕으로 상기 외팔보의 길이(L), 폭(b), 두께(t)의 구체적인 크기를 결정한다. 도 8은 MEMS 공정을 이용하여 제작한 미세 외팔보를 나타낸 것으로, 외팔보(50)의 끝단에 프로브(probe)(54)를 구비하고, 이 프로브(54)에 유전자나 단백질과 같은 생체 피검체(p)를 올려놓는다. 이 프로브(54)는 외팔보(50)의 끝단에 구비되어 피검체(p)를 가능한 한 외팔보의 가장 끝단에 부착시킬 수 있도록 하기 위한 것으로, 이 프로브를 통해 피검체를 외팔보의 최단부에 부착시킴으로써 질량 증가 효과가 가장 크게 나타나도록 할 수 있다. 상기 프로브(54)는 예를 들어, 외팔보 전체 면적의 대략 1/10의 면적을 갖도록 한다.

상기 프로브(54)는 생화학 반응으로 그 위에 단백질 및 유전자가 부착될 수 있게 되어 있고, 그럼으로써 최대한 외팔보의 끝단에만 집중적으로 생체물질이 부착되게 하여 질량 증가 효과가 가장 크게 나타나도록 할 수 있다.

(실시예)

유전자는 $6 \times 10^{-15} \text{g}/\mu\text{m}^2$, 단백질은 $2 \times 10^{-15} \text{g}/\mu\text{m}^2$ 의 질량 밀도를 나타낸다. 이 값을 민감도를 표현한 상기 수학적 식 15에 대입하여 외팔보의 질량을 구할 수 있다. 유전자 및 단백질이 부착되는 프로브(54)의 면적이 외팔보 면적의 1/10이라고 할 때, 외팔보의 형상비에 따라 $\text{left} (1/10 \text{ right}) \text{ left} (\text{bL}/2 \text{ right}) = \text{left} (1/10 \text{ right}) \{ \text{left} (3\text{L}/10 \text{ right}) \text{L}/2 \} = 3\text{L}^{\{ 2 \}} / 200$ 와 같이 표현할 수 있다.

외팔보는 실리콘(silicon)을 재료로 MEMS 공정을 이용하여 제작된다. 그리고, 실리콘의 물성치인 $E=112\text{GPa}$, $\rho=2330\text{kg}/\text{m}^3$ 를 수학적 식 15에 대입하면 삼각형 외팔보의 길이(L), 폭(b), 두께(t)를 결정할 수 있다.

이때, 공진주파수 변화량 Δf_c 는 150Hz로 가정한다. 이는 피검체(p)가 프로브(54)의 전체 면적에 부착되는 것이 아니라 일부에만 부착될 수 있는 가능성을 고려하여 0~150Hz 범위에서 공진주파수 변화가 나타날 수 있음을 가정한 것이다. 이러한 공진주파수 측정을 통해, 유전자나 단백질과 같은 피검체(p)가 프로브(54)에 어느 정도 부착되었는지를 판단할 수 있다. 이 공진주파수 범위는 본 발명을 LOC(Lab On a Chip)에 적용하여 LOC의 일부로서 검출하고자 하는 특정한 생체물질의 존재 유무 판단 및 존재 유무의 판단을 할 수 있는 기준을 제시하기 위해 결정한 크기이다. 상기 프로브(54)에는 소정의 생화학 처리를 하여 이 프로브에만 생체 물질이 부착되도록 하였기 때문에, 공진주파수의 변화량에 의해 피검체가 프로브에 어느 정도 부착되었는지를 알 수 있다.

예를 들어, 공진주파수 변화량이 50Hz일 때 프로브에는 프로브 면적의 약 1/3 정도 생체물질이 부착된 것으로 간주할 수 있다. 또한, 공진주파수 변화량이 75Hz일 때, 프로브 면적의 반정도에 피검체가 부착된 것을 의미한다. 공진주파수의 변화량이 0~150Hz인 것은 유전자나 단백질의 질량 증가에 따른 외팔보의 첫 번째 공진주파수의 변화가 아주 작다는 것을 고려하면 충분히 큰 값이다.

위의 모든 조건을 바탕으로 삼각형 외팔보의 크기를 구해 보면, 먼저 유전자를 검출할 경우 외팔보의 길이, 폭, 두께는 각각 $40\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ 이고, 단백질을 검출할 경우 길이 외팔보의 폭, 두께는 각각 $100\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ 가 되도록 하는 것이 바람직하다. 이러한 값들은 같은 형상비를 갖는 여러 가지 경우의 외팔보에 대해 단백질과 유전자의 면적 밀도를 고려하여 수치해석한 결과, MEMS 공정으로 제작이 가능하면서도 민감도가 양호하게 나타나는 값을 구한 것이다.

다음은 압전체(53)의 두께와 길이를 정한다. 상기 압전체(53)는 PZT로 형성되는 것이 바람직하다. 압전체의 크기는 큰 출력 전류를 얻을 수 있는 크기로 결정되는 것이 좋다. 출력 전류가 클 때, 피검체의 질량의 검출 성능이 향상된다.

이를 알아보기 위한 수치해석에서는 Q factor=1000, 입력 전압을 200mV로 입력하였다. 도 6은 수치해석을 위한 유한요소 모델로서 PZT 압전체(53)가 증착된 외팔보(50)를 나타낸 것이다. 여기서, 압전체(53)는 외팔보(50)를 가능한 많이 덮을 수 있는 형상을 갖는 것이 바람직하다. 압전체로부터의 출력 전류는 압전체의 크기에 가장 큰 영향을 받으므로, 압전체의 크기를 가능한 한 크게 하는 것이 미세 질량의 변화에 따른 공진주파수 측정에 유리하다. 예를 들어, 압전체(53)는 사다리꼴 형상을 가질 수 있다.

상기 압전체(53)의 두께에 따른 출력전류에의 영향을 알아보기 위해서 압전체의 길이(L1)를 $30\mu\text{m}$ 로 일정하게 유지한 상태에서 두께만(t1)(도 3 참조)을 서서히 변화시켜 보았다. 도 7a는 압전체(53)의 두께에 따른 출력 전류의 변화를 나타낸 것이다. 이 그래프에 따르면, 두께(t1)가 $2.5\mu\text{m}$ 일 때 가장 큰 출력전류를 얻을 수 있다.

또한, 압전체(53)의 길이(L1)에 따른 출력 전류의 변화를 알아보기 위해 두께(t1)를 $2.5\mu\text{m}$ 로 유지하고, 압전체(53)의 길이를 증가시키면서 출력전류의 변화를 도 7b에 나타내었다. 여기서, 압전체의 길이(L)가 대략 $60\mu\text{m}$ 까지 증가할 때, 출력 전류가 단순 증가(monotonic increasing)하다가 그 이후에는 오히려 작아짐을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 수치해석한 결과, 미세 외팔보의 진동을 위한 압전체의 두께는 외팔보 두께의 40-60%, 압전체의 길이는 외팔보 길이의 50-60%가 적합하다. 즉, MEMS 제작 공정을 통해 제작된 미세 외팔보의 특성이 수치해석의 결과 및 수학적인 압전모델링과 매우 유사하게 나온 경우들에 근거하여 압전체와 외팔보의 두께비 및 길이비 범위를 구할 수 있다.

도 8은 MEMS 공정을 이용하여 제작한 미세 외팔보를 나타낸 것이고, 도 9는 발진 회로로부터 오실로스코프를 통해 출력되는 신호를 보여주는 것이다. 도 9에서 아래쪽 그래프의 신호는 미세 외팔보의 진동 신호가 발진 회로를 거쳐 외팔보에

피드백(feedback)된 것이다. 그리고, 위쪽의 그래프 신호는 피드백(feedback) 신호가 미세 외팔보를 거쳐 출력되는 신호이다. 다시 말하면, 위쪽의 그래프는 미세 외팔보(50)가 첫 번째 공진주파수로 지속적인 자가 진동을 하는 것을 보여주는 자가 진동 신호이다.

상기한 바와 같이 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치는 발진회로가 적용된 압전체에 의해 외팔보의 자가 진동과 피검체의 질량 측정이 동시에 같이 이루어질 수 있도록 한다. 이에 따라 본 발명은 파형 발생기(function generator)와 같은 외부의 구동기가 필요 없다.

구체적인 측정예를 살펴보면 다음과 같다. 미세 질량 측정시 가능한 한 많은 양의 단백질(피검체)이 외팔보에 부착될 수 있도록 하는 것이 좋다. 따라서, 가능한 한 많은 단백질을 외팔보에 부착할 수 있도록 접착력이 좋은 홍합 단백질을 이용한다. 상기 미세 외팔보(50)의 끝에 피검체(홍합 단백질)가 들어 있는 수용액을 묻히고 발진회로에 연결하여 주파수 변화를 측정한다. 이때, 주파수 측정기(65)에 의해 측정된 첫 번째 공진주파수는 1.238544(MHz)이다. 그리고, 홍합 단백질을 부착한 후에 공진주파수의 변화량은 85Hz이고, 민감도를 나타내는 수학적 식 15를 이용하여 홍합 단백질의 질량을 계산하면 약 0.179483×10^{-12} (g) 정도가 된다.

다음, 본 발명에 따른 미세 질량 측정 방법은, 발진회로(60)를 이용하여 외팔보(50)를 첫 번째 공진주파수로 자가 진동시키고, 상기 외팔보(50)에 피검체(p)를 올려놓은 후에 변화된 첫 번째 공진주파수로 외팔보를 자가 진동시킴과 아울러 이 변화된 공진주파수를 이용하여 피검체의 질량을 측정한다.

피검체(p)가 없는 상태에서 상기 발진회로(60)에 의해 상기 압전체(53)를 통해 상기 외팔보(50)를 지속적으로 가진시키고, 이때 외팔보(50)의 첫 번째 공진주파수를 측정한다.

그리고, 피검체(p)를 상기 미세 외팔보(50)에 부착시킨 후, 이 피검체(p)로 인하여 변화된 미세 외팔보(50)의 공진주파수를 측정하여 공진주파수의 변화량을 알아낸다. 그리고, 공진 주파수의 변화량을 바탕으로 수학적 식 15를 참조하여 상기 피검체(p)의 질량을 측정한다. 이와 같이 본 발명에 따른 측정 방법은 발진회로를 이용하여 외팔보를 능동적으로 구동할 뿐만 아니라 피검체로 인한 공진주파수의 변화에 따른 피검체의 질량 측정을 별도의 측정 장비 없이 실행하는 것이다.

발명의 효과

이상에서 살펴본 바와 같이 본 발명에 따른 미세 질량 측정 장치 및 방법은 단일 압전체를 이용하여 외팔보의 구동과 공진주파수의 측정 모두를 수행하기 때문에 가진기와 공진주파수 변화량을 측정하는 장비가 독립적으로 구비될 필요가 없다. 따라서, 측정 장치의 설비가 단순해지고, 미세 외팔보는 MEMS 공정기술을 이용하여 초소형화 할 수 있다. 또한, 복수개 배열의 외팔보를 통해 동시에 다양한 생체물질의 질량 검출이 가능하다. 그러므로 초소형화 된 외팔보를 LOC(Lab-On-a-Chip)에 적용하면 휴대용 유전자나 단백질 검출기에 사용될 수 있다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

피검체가 부착되는 외팔보;

상기 외팔보 위에 구비되는 압전체;

상기 외팔보를 능동적으로 진동시킴과 아울러 피검체로 인한 외팔보의 변화된 공진주파수를 제공하기 위해 상기 외팔보로부터의 출력 신호를 증폭하는 증폭부와, 상기 증폭부로부터의 신호를 상기 외팔보에 입력하는 피드백부를 구비하는 발진회로;

상기 외팔보의 공진주파수를 측정하기 위한 주파수 측정기;를 포함하는 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 2.

삭제

청구항 3.

제 1항에 있어서,

상기 외팔보의 형상비는 민감도와 분리 계수에 의해 정해지는 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 4.

제 3항에 있어서,

상기 분리 계수는 외팔보의 첫 번째 공진 주파수와 피검체로 인해 변화된 두 번째 공진주파수의 차를 첫 번째 공진주파수로 나눈 값인 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 5.

제 1항에 있어서,

상기 외팔보가 삼각형 형상을 가지는 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 6.

제 5항에 있어서,

상기 외팔보의 형상비가 길이 : 폭 : 두께 = (20 : 6 : 1)~(20:18:1)의 범위를 가지는 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 7.

제 1항에 있어서,

상기 외팔보에 피검체가 부착되는 면적이 외팔보의 전체 면적의 1/15~1/10 범위 내에 있는 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 8.

제 1항에 있어서,

상기 압전체의 두께는 외팔보 두께의 40~60%인 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 9.

제 1항에 있어서,

상기 압전체의 길이는 외팔보 길이의 50~60%인 것을 특징으로 하는 미세 질량 측정 장치.

청구항 10.

질량 마이크로-밸런싱을 이용하여 미세 질량 측정을 하는 방법에 있어서,

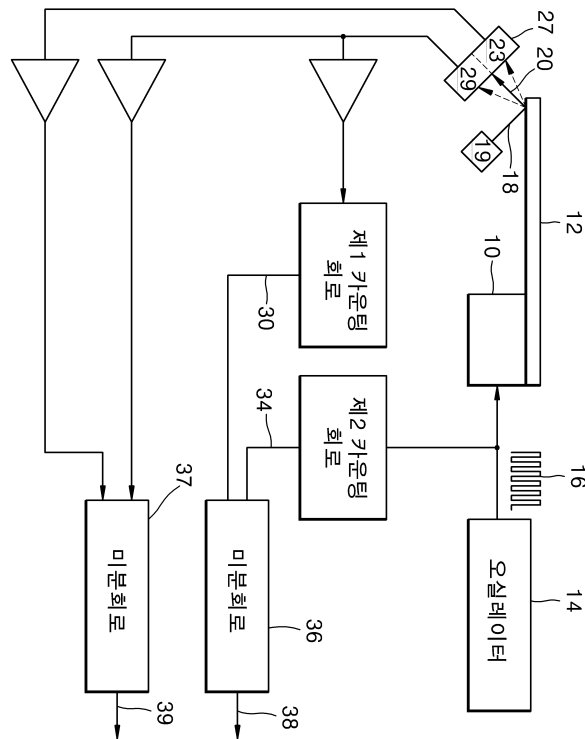
발진 회로에 의해 압전체를 통해 외팔보를 첫 번째 공진주파수로 자가 진동시키는 단계;

상기 외팔보에 피검체를 부착하고, 상기 발진 회로는 상기 외팔보로부터의 출력 신호를 증폭하는 증폭부와, 상기 증폭부로부터의 신호를 상기 외팔보에 입력하는 피드백부를 구비하여 상기 피검체로 인해 변화된 첫 번째 공진주파수로 상기 외팔보를 자가 진동시키는 단계;

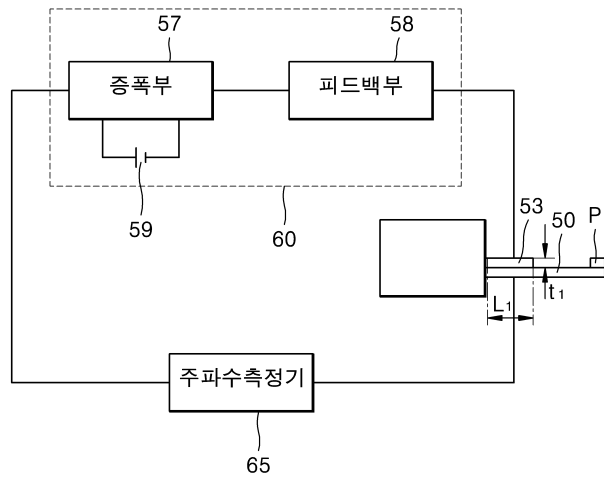
상기 첫 번째 공진주파수와 변화된 첫 번째 공진주파수를 측정하고, 피검체로 인한 공진주파수의 변화량을 이용하여 피검체의 질량을 측정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

도면

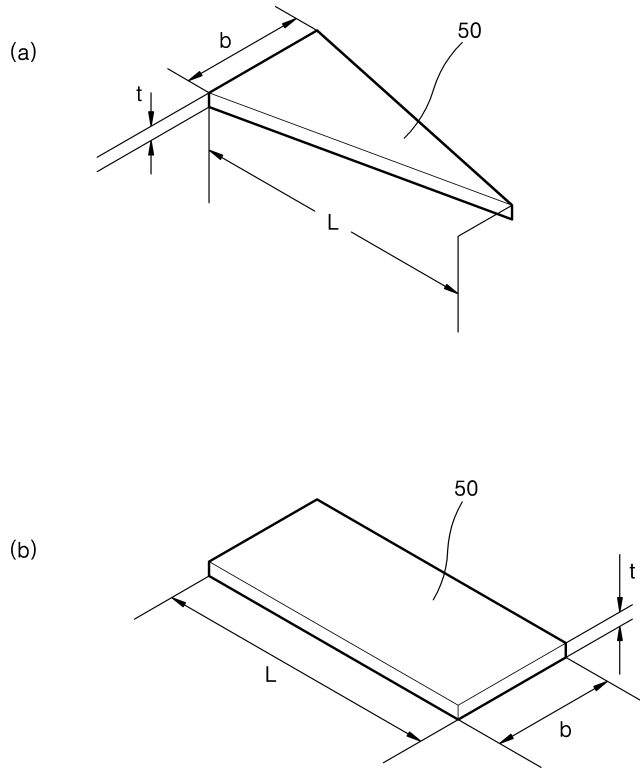
도면1



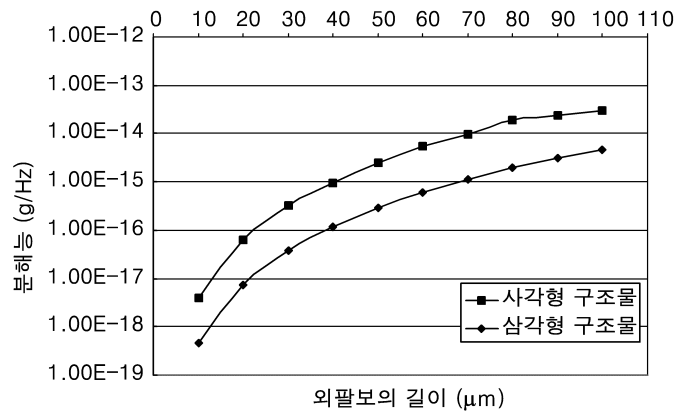
도면2



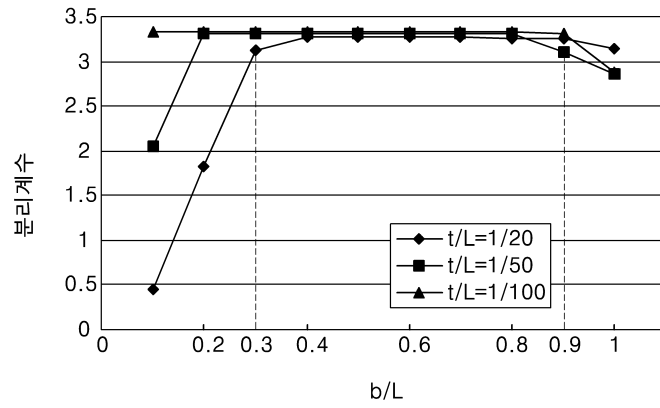
도면3



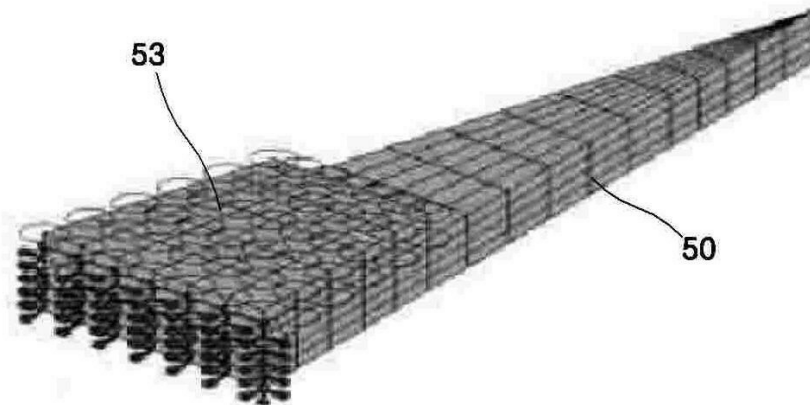
도면4



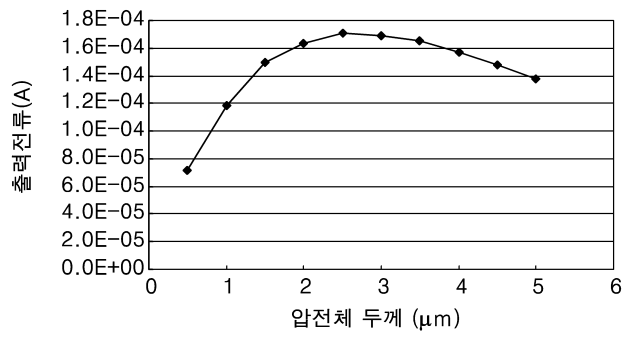
도면5



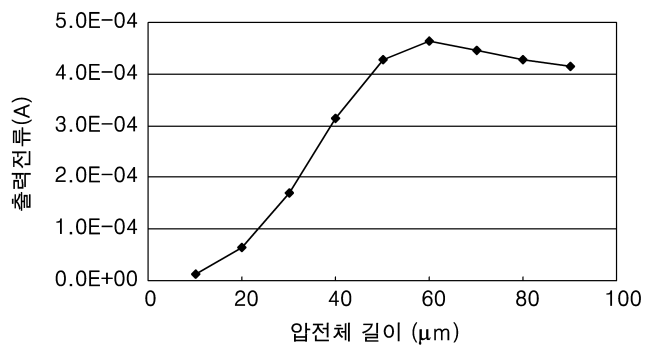
도면6



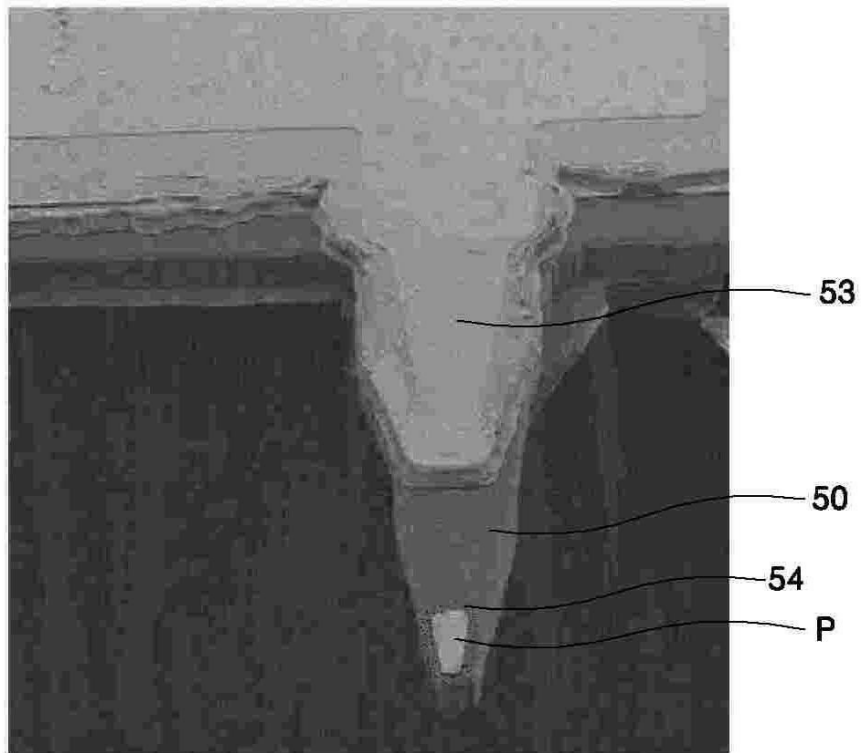
도면7a



도면7b



도면8



도면9

