

< 논 문 >

수평공진형 다결정실리콘 미소액추에이터의 설계, 제작 및 시험

조 영 호*

(1994년 7월 19일 접수)

Design, Microfabrication and Testing of Laterally-Resonating Polysilicon Microactuators

Young-Ho Cho

Key Words : Microactuators(미소액추에이터), Microfabrication Process(미소제조공정), Surface-Micromachining(표면미세가공), Resonant Microstructures(미소공진구조물), Electrostatic Actuation(정전구동), Micromachine(미소기계), Microelectromechanics(미소기전역학)

Abstract

This paper presents the design, fabrication, and testing of polysilicon electrostatic microactuators that resonate in the direction parallel to the silicon substrates. A set of six different designs has been developed using a theoretical model and design formulae developed for the microactuators. Microactuator prototypes are fabricated from a 2.1 μm -thick LPCVD polysilicon film, using a 4-mask surface-micromachining process. The prototypes are tested under a d.c. bias voltage of 45 V with an a.c. drive voltage amplitude of 20 V. Measured resonant frequencies are in the ranges of 40~60 kHz, showing a good agreement to their theoretical estimates within error bounds of $\pm 5\%$. Important issues in the design and microfabrication of the microactuators are discussed, together with potential applications of the key technology involved.

기 호 설 명

A : 미소구조물 단면적

b : 미소구조물 두께

C : 정전용량

C_x : 점성감쇠계수

E : 영 계수

F : 정전구동력

f_r : 공진주파수

h : 미소구조물의 높이 혹은 간격

I : 단면 이차모멘트

K : 강성계수

L : 미소구조물 길이

M : 평판구조물 질량

Q : Q 인자(quality factor)

S : 평판구조물 면적

U : 축전에너지

V : 전위차

x : 평판구조물 변위

그리스문자

β : 보 길이비(L_2/L_1)

κ : 보 높이비(h_1/h_2)

ν : 보 강성비(I_1L_2/I_2L_1)

ρ : 밀도

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

σ : 응력

ω : 주파수

LPCVD: 저압화학기상증착(low-pressure chemical vapor deposition)

MEMS: 미소기전집적 시스템(micro electro mechanical systems)

PSG: 인이 첨가된 실리콘유리(phospho silicate glass)

RIE: 반응이온식각(reactive ion etching)

SEM: 주사형 전자현미경 사진(scanning electron micrograph)

1. 서론

미소액추에이터 의해 가진 되는 미소 기계구조물은 자체 공진주파수가 주위의 물리량 혹은 화학량의 변화에 따라 매우 민감하게 변하는 특성으로 인해 각종 공진형 센서^(1,2)에 널리 이용되어 왔다. 최근 고성능 반도체센서⁽³⁻⁵⁾의 경우, 종래 정적, 수동적 감지방식의 센서에 액추에이터를 첨가하여 동적, 능동적 감지방식으로 진화함으로써 감지기능의 정확성 및 신뢰성 향상을 꾀하고 있으며, 미소기전집적시스템(MEMS)⁽⁶⁻¹⁰⁾의 동작방식 또한 종전의 캐피터 방식에서 지보 기능을 가진 캐피터방식으로 발전함에 따라 미소액추에이터의 중요성이 날로 증대되고 있다.

미소구조물 구동을 위한 미소액추에이터는 주로 정전력,⁽¹¹⁾ 압전력,⁽¹²⁾ 전자기력⁽¹³⁾ 등을 이용하고 있으며, 이들 중 정전구동방식의 액추에이터는 기타 다른 구동방식에 비해 액추에이터 구조가 간단하고, 제조공정이 단순하며, 구동특성이 주위 온도변화에 민감하다는 장점으로 인해 최근 반도체센서^(2,5) 및 미소기전소자⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 등에 널리 사용되고 있다. 특히 1980년대 초 집적회로 제조공정을 응용한 표면 미세가공(surface-micromachining)기술^(17,18)이 개발됨에 따라, 미소구조물의 구동방향이 실리콘 기판과 평행한 수평구동방식^(19,20)의 미소공진 액추에이터가 개발되었다. 수평구동방식은 종전의 수직구동방식⁽¹⁴⁾에 비해 에너지 소모⁽²¹⁾가 적고, 구조 및 제조공정이 간단하며,⁽²⁾ 선형동작영역⁽²¹⁾이 넓다는 장점이 있고 제조공정 자체가 이미 양산성이 입증된 집적회로 제조공정을 기반으로 하고 있어 가속도

계,⁽⁴⁾ 자이로,⁽²²⁾ 광통신용 미소기전소자^(15,23) 등 기전집적형 실용제품에 빠른속도로 적용되고 있다.

본 논문은 수평구동방식의 공진형 미소정전 액추에이터의 설계, 제작, 시험 및 측정에 관한 것으로, 각 단계별 주요기술 및 특성 소개와 개발과제에서의 고려점 토의에 중점을 둔 것이다. 먼저 공진형 미소정전 액추에이터의 이론적 모델과 관련이론을 소개한 후, 이전 연구⁽²⁴⁾의 씬층보 미소현수시스템(crab-leg microsuspension) 설계를 기본으로 세가지 크기의 등가현수시스템을 구하고, 이를 이용하여 두가지 종류의 평판질량을 구동할 수 있는 등 6층의 미소정전 액추에이터를 설계한다. 그후 제작단계에서는 표면미세가공기술^(17,18)을 이용하여 다결정 실리콘 다층박막을 순차적으로 가공함으로써 미소정전 액추에이터를 제작하는 일련의 공정을 기술한다. 시험 및 측정단계에서는 제작된 미소정전 액추에이터의 성능시험을 통해 얻은 실험적 측정치와 설계이론으로 예측한 이론적 예상치를 비교 분석함으로써 설계이론의 실용성과 적용 타당성을 검증한다. 끝으로 설계, 제작, 시험 및 측정단계 등 일련의 개발과제에서 관찰되는 수평공진형 미소정전 액추에이터의 특성과 주요 고려점을 토의하고 관련기술의 응용을 제시한다.

2. 이론적 모델 및 기초이론

본 논문에서 다루고자 하는 수평공진형 미소정전 액추에이터이하 '정전공진 액추에이터'라 칭함)는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 두쌍의 그자형 미소씬은보 현수시스템(Fig. 2)을 대칭적으로 배치하여 좌구동-평판질량 구조물 전체를 실리콘 기판으로부터

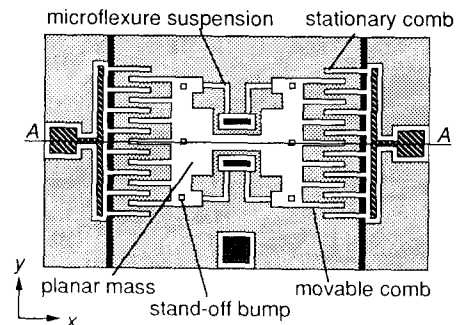


Fig. 1 Schematic of electrostatic resonant micro-actuators

일정높이 위의 수평면상에 현수(suspension)시킨 후, 빗살모양의 구조물(Fig. 3)에서 발생하는 정전력을 이용하여 평판구조물 전체를 실리콘 기판면과 평행한 x 방향으로 공진 구동하게끔 되어 있다.

이때 x 방향으로 공진운동하는 정전공진 액추에이터(Fig. 1)의 동역학적 모델은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 질량-스프링-댐퍼로 구성된 1자유도 시스템으로 단순화할 수 있으며, 계의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

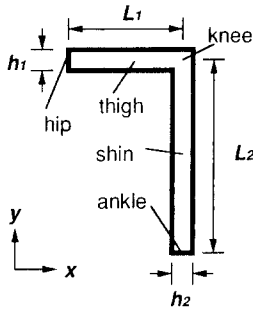


Fig. 2 A crab-leg microflexure suspension

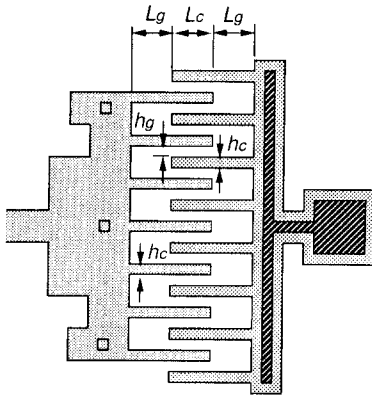


Fig. 3 Electrostatic comb-structures

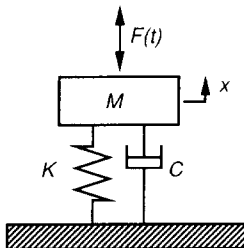


Fig. 4 A lumped microdynamic model of the electrostatic resonant microactuator

$$M\ddot{x} + C_x\dot{x} + K_x x = F(t) \quad (1)$$

여기서, M , C_x , K_x , $F(t)$ 는 Fig. 1에서의 피구동 평판구조물의 질량, x 방향의 운동에 대한 계의 점성감쇠계수, 미소검은모 현수시스템 전체의 x 방향 강성, 빗살구조물에서 발생하는 정전구동력을 각각 의미한다.

균일두께 b 로 제작된 정전공진 액추에이터의 경우, 막막소재의 밀도, 영계수, 피구동 평판구조물의 면적을 각각 ρ , E , S 라 할때, 운동방정식 (1)의 계수는 다음과 같은 이론식으로 정의된다. 먼저 피구동 평판구조물의 질량(M)과 x 방향 점성감쇠계수(C_x)는 각각

$$M = \rho b S \quad (2)$$

$$C_x = \sqrt{\frac{MK_x}{Q^2}} \quad (3)$$

로 표시되고, 식 (3)의 Q 는 점성감쇠에 의한 계의 Q 인자(quality factor)⁽²¹⁾를 의미한다. 여기서, 피구동 평판구조물과 실리콘기판 사이의 공기층, 평판구조물 상부의 무한공기층, 빗살구조물 사이의 공기층에 의한 Q 인자의 성분을 각각 Q_a , Q_∞ , Q_c 라 할때, 전체계의 Q 인자는 다음과 같이 표현된다.⁽²¹⁾

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_a} + \frac{1}{Q_\infty} + \frac{1}{Q_c} \quad (4)$$

그자형 미소검은모 현수시스템 전체(Fig. 1)의 x 방향 강성(K_x)는 이전 연구⁽²⁴⁾에서

$$K_x = \frac{48EI_2}{L_2^3} \left(\frac{1+\nu}{4+\nu} \right) \quad (5)$$

로 얻었고, L_1 및 I_2 를 각각 Fig. 2의 그자형 미소검은모 현수시스템의 요소 1의 길이와 단면이차모멘트라 할때, 식 (5)에서의 요소 1과 요소 2의 감성비(ν)는 다음과 같이 정의된다.

$$\nu = \frac{I_1 L_2}{I_2 L_1} \quad (6)$$

한편, Q 인자가 큰 경우, Fig. 4 혹은 식 (1)에서 정의되는 정전공진 액추에이터의 x 방향 공진주파수(f_r)는 다음과 같이 표시된다.

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x}{M}} \quad (7)$$

여기서, M 과 K_x 는 각각 식 (2)와 식 (5)의 형태로 주어진다.

3. 설 계

정전공진 액추에이터(Fig. 1)의 설계를 위해서는 3대 구성요소인 미소보 현수시스템, 빗살구조물, 피구동 평판구조물의 치수와 소재를 각각 설정하여야 한다.

먼저 정전공진 액추에이터의 소재를 결정함에 있어서, 각 구성요소들이 기계적 기능과 전기적 기능을 동시에 담당하게 되므로, 소재의 기계적 성질과 전기적 성질이 비교적 잘 파악되어 있고 기계요소와 전자요소 제작공정의 호환성(compatibility) 측면에서 유리하다고 할 수 있는 다결정 실리콘(polycrystalline silicon)을 소재로 정하였다.

이어 미소보 현수시스템의 치수를 결정함에 있어서, 이전 연구⁽²⁴⁾의 결과에 따라 등강성비 및 등응력조건을 만족하는 7자형 미소 썬은보 현수시스템을 구현후, 이를 기준으로 최장요소길이(Fig. 2의 L_2)가 각각 80, 90, 100 μm 인 세가지 크기의 등가 현수시스템을 설계하였다. 하나의 평판길당 각각에

대해 서로다른 세가지 크기의 7자형 미소 썬은보 현수시스템 설계치수와 이론식⁽²⁵⁾에 의한 x , y -방향 각각의 강성, K_x 및 K_y , 그리고 단위변위당 발생하는 최대응력, σ_{\max}/x 등의 성능예측치는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

정전구동력 발생을 위한 빗살구조물(Fig. 3)의 치수는 Table 3과 같이 결정하였으며, 가동빗살수와 고정빗살수는 각각 25개와 26개로 설계하였다. 또한 세가지 크기의 7자형 썬은보 현수시스템(Table 1)에 대해 질량이 각각 0.077 μg , 0.092 μg 인 두 종류의 평판구조물(Table 4)을 설치함으로써, 총 6종의 서로다른 공진형 미소정전 액추에이터를 설계하였다.

설계된 미소공진 액추에이터는 Table 2에서 보는 바와 같이, 실리콘 기판면과 평행한 x - y 평면상에서 원하지 않는 구동방향(Fig. 1의 y 방향)과 원하는 구동방향(Fig. 1의 x 방향)의 현수시스템의 강성비는 모두 500 이상을 유지하고 있으며, 이는 동일 평판질량을 구동하는 경우 두 방향 구동모드의 공진주파수의 비를 20배 이상으로 분리함을 의미한다.

Table 1 Dimensions of equal-stress crab-leg microsuspensions*

Microsuspension type	L_2 [μm]	L_1 [μm]	h_2 [μm]	h_1 [μm]	b [μm]
1	80	6.4	2.2	2.0	2.1
2	90	7.2	2.2	2.0	2.1
3	100	7.8	2.2	2.0	2.1

* Refer to Fig. 2

Table 2 Estimated performance* of the equal-stress crab-leg microsuspensions

Microsuspension type	K_x [N/m]	K_y [N/m]	σ_{\max}/x [MPa/ μm]
1	20.33	10361.	132.
2	14.28	7277.	104.
3	10.46	5713.	84.6

* Based on the polycrystalline silicon of $\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$, $E = 150 \text{ GPa}$

Table 3 Electrostatic comb-structures*

No. of movable combs[EA]	No. of stationary combs[EA]	L_c [μm]	L_g [μm]	h_c [μm]	h_g [μm]	b [μm]
25	26	30.	30.	4.0	2.0	2.1

* Refer to Fig. 1 and Fig. 3

4. 제조공정

표면미세가공기술^(17,18)을 이용하여 다층박막층을 순차적으로 가공함으로써 설계된 총 6종의 정전공진 액추에이터를 제작하였으며, 제조공정의 흐름도는 Fig. 5에 도시하였다. 정전공진 액추에이터 제작에 사용된 마스크수는 총 4장이었으며, Fig. 5의 공정단면도는 정전공진 액추에이터(Fig. 1)의 대칭축 A-A의 단면 왼쪽 부분을 나타낸 것이다.

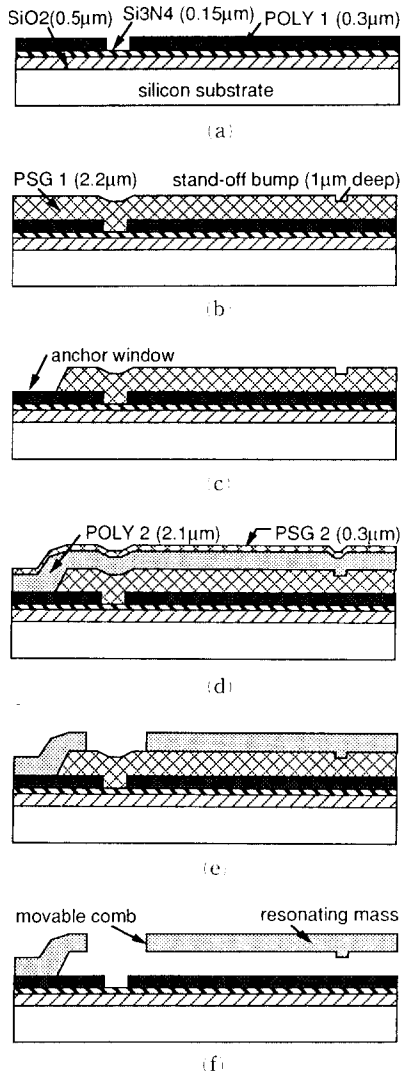


Fig. 5 Microfabrication process for the electrostatic resonant microactuators

먼저 Fig. 5의 제조공정 (a)단계에서 실리콘기판 위에 건식 산화실리콘(SiO_2)박막, LPCVD(low-pressure chemical vapor deposition), 질화실리콘(Si_3N_4) 보호막, LPCVD 다결정실리콘(POLY1) 박막을 순차적으로 형성한후, POLY1 박막을 RIE(reactive ion etching) 공정으로 건식식각하여 마다전극⁽²⁵⁾을 형성하였다. 제조공정 (b)단계에서 LPCVD PSG(phospho silicate glass) 회생층(PSG1)을 증착한후, 접착방지대(stand-off bump)⁽¹¹⁾를 형성할 부분을 식각하였다. 제조공정 (c)단계에서는 PSG1의 일부를 식각하여 공진구조물의 고정부를 형성한 후, 제조공정 (d)단계에서 정전공진 액추에이터의 소재인 LPCVD 다결정실리콘(POLY2) 박막을 형성하고, 그 위에 LPCVD PSG 박막(PSG2)을 증착한 후 1000°C 질소분위기에서 1시간 동안 어닐링(annealing)하였다. 이어 제조공정 (e)단계에서 PSG2 박막을 식각해 낸후, RIE 광경으로 POLY2 박막을 건식식각함으로써, 정전공진 액추에이터의 핵심부인 미소보 현수시스템, 및

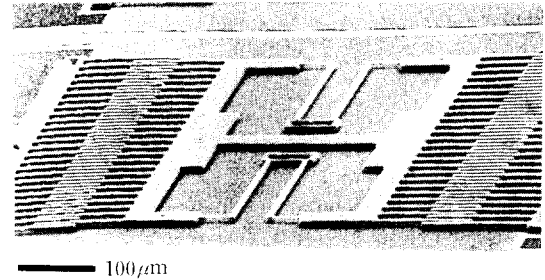


Fig. 6 SEM of the microactuator with the mass-type A (Table 3) and the microsuspension-type 3 (Table 1)

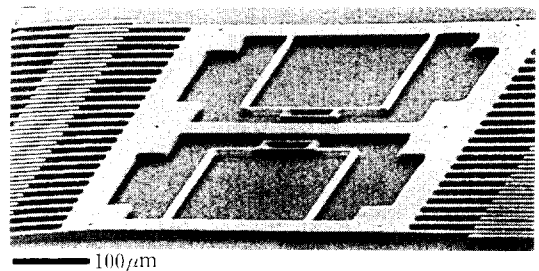


Fig. 7 SEM of the microactuator with the mass-type B (Table 3) and the microsuspension-type 3 (Table 1)

Table 4 Two types of planar mass structures

Mass type*	S[μm^2]	b[μm]	M[μg]
A	15736.	2.1	0.077
B	18864.	2.1	0.092

* Refer to Fig. 6 and Fig. 7

살구조물 및 평판질량 구조물을 동시에 형성하였다. 마지막 제조공정 (f)단계에서 PSG1층을 식각하여 없애고 정수세척후 건조시킴으로써, 총 6종의 정전공진 액추에이터 제작을 완료하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 제작한 6종의 정전공진 액추에이터 중 Table 1의 7자형 썬은보 현수시스템 형태 3(suspension type 3)과 Tabel 3의 빗살구조물로 제작된 정전공진 액추에이터의 전자현미경 사진이다. Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 현수시스템을 사용하되 설치방식만 변경한 것으로 이들의 기본적인 모델 및 현수시스템의 예상성능은 모두 Fig. 1(혹은 Fig. 4) 및 Table 2에 준한다. 다만 Fig. 6은 Table 4의 질량형태 A(0.077 μg)를, Fig. 7은 질량형태 B(0.092 μg)를 각각 구동시키기 위해 제작된 것이다.

5. 시험 및 측정

제작한 총 6종의 정전공진 액추에이터에 전기적 신호를 인가하여 성능시험을 행하였다. 시험시 한쌍의 빗살구조물중 한쪽부분의 고정빗살과 가동빗살 사이에 45V의 직류바이어스와 진폭 20V의 교류전압(peak-to-peak)을 가한 상태에서, 교류전압의 주파수를 변화(sweep)시키면서 피구동 평판구조물의 진폭을 관찰하였다. 피구동 평판구조물의 진폭변화를 고배율 현미경에 부착된 CCD 카메라를 TV 화면에 연결하여 관찰하였으며, 진폭이 최대가 되는 점에서의 교류전압 주파수를 읽어 공진 주파수를 측정하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 정전공진 액추에이터의 성능시험에서 측정한 공진주파수와 Tables 1, 2, 3 및 이론식을 기초로 추정한 이론예상치를 비교한 것이다. 먼저 Fig. 8은 Table 1의 비소 현수시스템과 Table 2의 빗살구조물을 이용하여 Table 3의 평판질량 형태 A를 공진구동시킨 경우이고, Fig. 9는 Table 3의 평판질량 형태 B를 공진구동시킨 경우

를 각각 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9의 공진주파수 측정치는 측정오차 ± 0.1 kHz로 관찰한 것으로, 이론예상치와는 모두 $\pm 5\%$ 범위 이내에서 일치함을 보여준다.

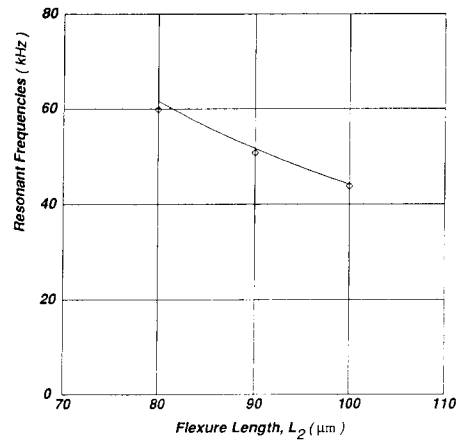


Fig. 8 Predicted and measured resonant frequencies of the microactuators with mass-type A(Table 3)

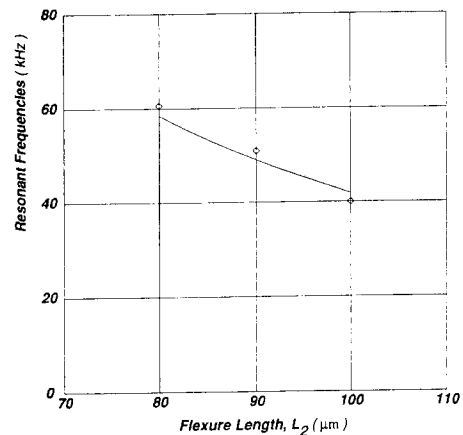


Fig. 9 Predicted and measured resonant frequencies of the microactuators with mass-type B(Table 3)

6. 토의 및 고찰

총 6종의 공진형 미소정전 액추에이터를 제작하여 실험적 방법으로 얻은 공진주파수 측정치와 이론적 예상치가 모두 $\pm 5\%$ 범위 이내로 일치함 (Fig. 8 및 Fig. 9 참조)을 확인하였다. 이는 액추에이터 설계시 사용한 동역학적 모델과 이론식의 유용성과 정확성 뿐만 아니라 미세가공 기술의 정밀성 또한 입증해주고 있다. 이러한 설계이론의 실험적 검증을 기초로 하여, 정전공진 액추에이터의 설계, 제작, 시험 및 측정 등 일련의 개발과정상에서의 주요 고려점을 토의한다.

먼저 정전공진 액추에이터 설계시 공진진폭의 증가를 위해서는, 이론적으로 정진구동력 혹은 Q 인자를 증가시키거나 구동방향의 강성을 감소시켜야 한다. 정진구동력 증가를 위해서는 정전용량 변화율($\partial C/\partial x$) 혹은 인가전압(V_D)를 증가시켜야 하는데, 인가전압을 일정수준으로 제한할 경우 빗살구조물의 두께(b)를 증가시키거나 빗살구조물 사이의 간격(Fig. 3의 h_g)을 감소시켜야 한다. 또한 식 (5)에서 보면, 구동방향의 강성을 감소시키기 위해서는 미소보 현수시스템의 요소 2의 폭과 길이의 비(h/L)를 감소시키는 것이 가장 효과적이다. 이상의 고찰을 종합해 보면, 공진진폭 증가를 위해서는 박막형 공진구조물의 두께(b)의 증가와 폭(h_g 혹은 h_2)의 감소가 요구되므로 고단면비(b/h) 미소구조물이 유리함을 알 수 있다. 따라서 정전공진액추에이터의 제조공정(Fig. 5) 중 POLY2 박막을 가공하여 공진구조물을 형성하는 공정 (d)와 (e)단계에서 미소기계의 구조물 고단면비를 유지함이 매우 중요하다. 본 연구에서는, RIE 공정을 이용하여 두께 $2.1 \mu\text{m}$ 의 다결정실리콘 박막을 가공하여 최소폭 $2.0 \mu\text{m}$ 의 미소 기계구조물 수직단면을 가공 오차 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 이내로 제작함으로써, RIE 표면미세가공법을 이용한 고단면비 미소구조물 제작 가능성을 제시하였다. 이러한 고단면비 미소 기계구조물 제작기술은 정전공진 액추에이터 뿐만 아니라, 수평구동 방식의 MEMS^(15,21~25)에 있어서 미소기계의 수평 유연성 및 운동의 방향성 유지측면에서도 매우 중요한 의미를 가진다.

한편 정전공진 액추에이터의 공진주파수 설계측면에서 식 (2), (5)를 살펴보면, 수평공진형 박막액추에이터의 공진주파수(f_r)는 공진구조물의 두께

(b)와는 무관함⁽²⁶⁾을 알 수 있다. 따라서 공진주파수 설계는 구조박막면 상에서 공진구조물의 면적설계에 의해 결정되며, 제조공정(Fig. 5)의 (d)단계의 POLY2 형성공정에서 발생하는 박막두께 오차는 공진주파수에 아무런 영향을 미치지 않음을 의미한다.

본 논문에서의 정전공진 액추에이터의 구조설계 및 제작공정상의 또다른 특성중 하나는, 액추에이터 성능을 좌우하는 미소보 현수시스템, 빗살구조물 및 피구동 평판구조물 등 주요구성요소 모두가 동일한 구조박막에 의해 정의된다는 것이다. 따라서 액추에이터의 주요 구성 요소들을 제조공정(Fig. 5)의 (e)단계에서 한장의 마스크를 이용하여 동시가공함으로써, 제조공정별 가공오차의 불균일성과 제조공정간의 미소구조물 정렬(align) 불일치 등의 문제를 제거할 수 있다. 또한, 정전공진액추에이터의 제작단계에 있어서 유의하여야 할 점은 미소구조물의 잔류응력을 조절하는 것으로, 이는 집적회로 제조기술과 미소기계를 제작하기 위한 표면미세가공 기술간의 중요한 차이점이 된다. 즉 집적회로의 경우는 미소 전자구조물이 모두 실리콘 기판면에 고정되어 있으나, MEMS 에서 요구되는 미소기계구조물은 최종적으로 실리콘 기판면에서 분리되어야 하므로 미소 구조박막내의 잔류응력을 제거하지 않고서는 성공적인 미소기계구조물을 얻을 수 없다. 본 논문에서는 제조공정(Fig. 5) (d)단계에 기술한 방법으로 미소구조물의 잔류응력을 조절함으로써, 약 $300 \mu\text{m}$ 길이의 미소기계구조물(free-standing micromechanical structure)을 휘어짐없이 실리콘기판과 분리된 상태로 제작할 수 있다.

본 논문에서 다룬 수평공진형 미소액추에이터의 설계, 제작, 시험 및 측정관련 기술은 레이저 단속용 고속셔터,⁽¹⁵⁾ 주파수분할 필터⁽²³⁾ 등 수평공진형 미소 광 통신시스템과 수평구동방식의 기전집적형 가속도계,⁽⁴⁾ 미소자이로,⁽²²⁾ 미소물성 측정기,^(21,25) 유량센서⁽²⁾ 등 미소 반도체센서 개발에 직접적으로 응용할 수 있다.

7. 결 론

이론 설계식을 이용하여 두가지 형태의 평판질량과 3종의 현수시스템의 조합으로 서로 다른 총 6종의 수평공진형 미소정전기 액추에이터를 설계한후,

표면미세가공기술을 이용하여 LPCVD 다결정실리콘 박막을 소재로 한 미소액추에이터를 제작하였으며, 성능시험을 통하여 공진주파수를 측정하였다. 실험적으로 얻은 공진주파수는 40~60 kHz 범위였으며, 이론적 예상치와는 오차범위 5% 이내로 일치함을 확인함으로써 미소 정전공진 액추에이터의 동역학적 모델 및 설계이론의 유용성과 정확성 그리고 미세가공의 정밀성을 입증하였다. 본 논문에서 정전공진 액추에이터의 설계, 제작, 시험 및 측정 등 일련의 개발과정을 통하여 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 수평구동방식의 미소 기계구조물의 경우, 공진진폭의 증대, 수평구동의 유연성향상, 운동의 방향성 유지 등의 측면에서 고단면비 형상의 미소구조물이 요구되며, 본 논문에서 사용한 RIE 표면미세가공공정이 고단면비 미소구조물의 제작 및 단면의 수직성 유지에 매우 효과적이었다.

(2) 수평구동방식의 박막형 미소 기계구조물의 공진주파수는 구조박막면 상에서의 공진구조물 면적설계에 의해 결정되며, 구조박막 형성공정에서의 박막두께 오차에 의해서는 영향을 받지 않는다.

(3) 본 논문의 수평공진형 미소정전액추에이터는 구조 및 제조공정의 특성으로 인해, 액추에이터 성능이 공정별 가공오차의 불균일성과 공정간의 정렬 오차와는 무한하게 안정적임을 유지될 수 있었으며, $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 가공오차로 제작한 경우 액추에이터의 측정 공진주파수와 설계치 사이의 오차를 $\pm 5\%$ 이내로 줄일수 있었다.

(4) 잔류응력 분포의 대칭성을 이용한 미소박막의 잔류응력 처리공정은 MEMS 등에서 요구되는 미소기계 구조물 제작에 매우 효과적임을 관찰하였다.

이상의 주요 결과 및 관련핵심기술은 수평공진형 광통신용 MEMS과 기전집적형 반도체센서 개발에 응용이 가능하다.

참고문헌

- (1) Langdon, R. M., 1985, "Resonator Sensors-A Review," *J. Phys. E. : Sci. Instrum.*, Vol. 18, pp. 103~115.
- (2) Howe, R. T., 1987, "Resonant Microsensors," *Tech. Digest, 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, Tokyo, Japan, pp. 843~848.
- (3) Satchell, D. W. and Greenwood, J. C., 1987, "Silicon Microengineering for Accelerometers," *Proc. Int. Conf. on Mech. Technol. of Inertial Devices*, Newcastle, U. K., pp. 191~193.
- (4) Payne, R. S. and Dinsmore, K. A., 1991, "Surface Micromachined Accelerometer: A Technical Update," *SAE Int. Auto. Eng. Congr.*, Detroit, MI, U. S. A., pp. 127~135.
- (5) 조영호, 1993, "자동차용 반도체 집적센서 및 마이크로 액추에이터," *한국자동차공학회지*, 제14권, 제3호, pp. 12~25.
- (6) O'Connor, L., 1992, "MEMS: MicroElectroMechanical Systems," *ASME Mechanical Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 40~47.
- (7) 조영호, 1992, "미소 기계-전자 집적시스템의 응용과 실제," *대한기계학회지*, 제32권, 제7호, pp. 588~603.
- (8) 조영호, 1993, "미소 기전집적시스템에서의 미소기계공학: 기술특성, 응용제품, 관련 연구분야 및 기술과제," *대한기계학회지*, 제33권, 제6호, pp. 552~570.
- (9) Bryzek, J., Pertersen, K. E. and McCulley, W., 1994, "Micromachines on the March," *IEEE Spectrum*, Vol. 31, No. 5, pp. 20~31.
- (10) 조영호, 1993, "IEEE/ASME MEMS'93 Workshop에 참가하고," *대한기계학회지*, 제33권, 제9호, pp. 823~826.
- (11) Fan, L.-S., Tai, Y.-C. and Muller, R. S., 1988, "IC-Processed Electrostatic Micromotors," *Tech. Dig. IEEE IEDM*, San Francisco, CA, U. S. A., pp. 666~669.
- (12) Söderkvist, J., 1989, "Design of a Solid-State Gyroscopic Sensor Made of Quartz," *Proc. Transducers'89 and Eurosensors III*, Vol. 2, Montreux, Switzerland, pp. 293~296.
- (13) Guckel, H., Christenson, T. R., Skrobis, K.J., Jung, T. S., Klein, J., Hartojo, K. V. and Widjaja, I., 1993, "A First Functional Current Excited Planar Rotational Magnetic Micromotor," *Proc. MEMS Workshop*, Ft. Lauderdale, FL, U. S. A., pp. 7~11.
- (14) Nathanson, H. C. Newell, W. E., Wickstrom, R. A. and Davis, J. R., 1967, "The Resonant Gate

- Transistor," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-14, pp. 117~133.
- (15) Jaecklin, V. P., Linder, C., de Rooij, N. F., Moret, J.-M. and Vuilleumier, R., 1993, "Optical Microshutters and Torsional Micromirrors for Light Modulator Arrays," *Proc. MEMS Workshop*, Ft. Landerdale, FL, U. S. A., pp. 124~127.
- (16) Sampssell, J. B., 1993, "The Digital Micromirror Device and Its Application to Projection Displays," *Tech. Digest, Transducers'93*, Yokohama, Japan, pp. 24~27.
- (17) Howe, R. T. and Muller, R. S., 1982, "Polycrystalline Silicon Micromechanical Beams," *Extended Abstracts, Electrochemical Society Meeting*, Vol. 82-1, Motreal, Canada, pp. 184~185.
- (18) 조영호, 1993, "마이크로머시닝 기술과 마이크로머신," 월간기계기술, 제20권, 제12호, pp. 35~43.
- (19) Tang, W. C., Nguyen, T.-C. H., Judy, M. W. and Howe, R. T., 1989, "Electrostatic-Comb Drive of Lateral Polysilicon Resonators," *Proc. Transducers'89 and Eurosensor III*, Montreux, Switzerland, Vol. 2, pp. 328~331.
- (20) Pisano, A. P. and Cho, Y.-H., 1989, "Mechanical Design Issues in Laterally-Driven Microstructures," *ibid*, pp. 1060~1064.
- (21) Cho, Y.-H., Kwak, B. M., Pisano, A. P. and Howe, R. T., 1993, "Viscous Energy Dissipation in Laterally Oscillating Planar Microstructures: A Theoretical and Experimental Study," *Proc. MEMS Workshop*, Ft. Landerdale, FL, U. S. A., pp. 93~98.
- (22) Bernstein, J., Cho, S., King, A. T., Kourepenis, A., Maciel, P. and Weinberg, M., 1993, "A Micromachined Comb-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope," *Proc. MEMS Workshop*, Ft. Landerdale, FL, U. S. A., pp. 143~148.
- (23) Lim, L., Nguyen, C. T.-C., Howe, R. T. and Pisano, A. P., 1992, "Micro Electromechanical Filters for Signal Processing," *Proc. MEMS Workshop*, Travemunde, Germany, pp. 226~231.
- (24) 조영호, 1994, "수평공진형 미소 정전기액추에이터를 위한 미소보 현수시스템의 설계," 대한기계학회논문집 부고중.
- (25) Fan, L.-S., 1989, *Integrated Micromachinery: Moving Structures on Silicon Chips*, Ph. D. Dissertation, University of California at Berkeley, CA, U. S. A.
- (26) Cho, Y.-H., 1994, "Geometric Constraints on Planar Microstructures and Their Influence on the Dynamics of Resonant Microstructures," *Proc. ISEM'94, Elsevier*, Amsterdam, The Netherlands.