비정질 수정 캔틸레버의 식각 공정 최적화 및 Q-factor 연구

논 문

60-2-22

Optimization of Fused Quartz Cantilever DRIE Process and Study on Q-factors

송 은 석* · 김 용 권** · 백 창 옥†

(Eun-Seok Song · Yong-Kweon Kim · Chang-Wook Baek)

Abstract - In this paper, optimal deep reactive ion etching (DRIE) process conditions for fused quartz were experimentally determined by Taguchi method, and fused quartz-based micro cantilevers were fabricated. In addition, comparative study on Q-factors of fused quartz and silicon micro cantilevers was performed. Using a silicon layer as an etch mask for fused quartz DRIE process, different 9 flow rate conditions of C_4F_8 , O_2 and He gases were tested and the optimum combination of these factors was estimated. Micro cantilevers based on fused quartz were fabricated from this optimal DRIE condition. Through conventional silicon DRIE process, single-crystalline silicon micro cantilevers whose dimensions were similar to those of quartz cantilevers were also fabricated. Mechanical Q-factors were calculated to compare intrinsic damping properties of those two materials. Resonant frequencies and Q-factors were measured for the cantilevers having fixed widths and thicknesses and different lengths. The Q-factors were in a range of 64,000 - 108,000 for fused quartz cantilevers and 31,000 - 35,000 for silicon cantilevers. The experimental results supported that fused quartz had a good intrinsic damping property compared to that of single crystalline silicon.

Key Words : Fused quartz, DRIE, Taguchi method, Single-crystalline silicon, Cantilevers, Q-factor

1. 서 론

오늘날 자이로스코프 및 가속도계와 같은 관성 센서(inertial sensor)는 군사 분야는 물론 민간 항공기, 자동차, 로봇 및 게임기에 이르기까지 그 수요가 점점 늘어나고 있다. 그 중 MEMS 기술을 기반으로 한 관성센서는 최근 각종 모바일 디바이스의 사용자 편의 인터페이스를 구현하기 위한 필수 소자로 각광 받고 있다. 그동안 대부분의 MEMS 관성 센서는 기존의 반도체 미세 공정 기술을 적용하기 위하여 실리콘을 기반으로 하여 다양한 소자들이 개발되어 왔다. 하지만 실리콘은 반복 구동 시 피로로 인한 에이징(aging) 현상, 온도 변화에 따른 진동수 변동과 같은 물질 자체로의 한계로 인해 군사 및 우주 항공과 같이 고성능을 요구하는 분야에 적용하기에는 어려움이 있다 [1]. 이러한 실리콘의 물질적 한계를 극복하고자 많은 연구들이 진행되어 왔는데, 최근 Boeing사에서는 비정질 수정을 이용하여, 디스크형 자이로스코프를 개발한 바 있다[2, 3]. 비정질 수정은 단결정 실리콘과 비슷한 열용량, 밀도 특성을 보이지만, 작은 열팽창 계수(실리콘의 약 1/5)와 Young's modulus(실리콘의 약 1/2)로 인해 우수한 열탄성 감쇠 특성을 갖는 것으로 알려져 있기 때문에 MEMS 기반의 공진을 이용한 관

성센서에서 에너지 손실을 현저히 줄일 수 있는 물질로 사용이 기대되고 있다. 이에 본 논문에서는 비정질 수정 기반의 고성능 관성 센서를 개발하기 위한 기초 실험으로서, 다구치 방법을 이용하여 고종횡비 수정 DRIE 건식 식각 조건을 실험하였다. 또한 비슷한 크기의 비정질 수정 캔틸레버와 실리콘 캔틸레버를 제작하고, 각각의 Q-factor를 측정하여 두 물질의 감쇠 특성을 비교하였으며, 이를 통해 비정질 수정의 우수한 물질 특성을 실험적으로 확인하였다.

2. 다구치 방법에 의한 비정질 수정 건식 식각 최적화

2.1 비정질 수정 건식 식각 메커니즘

수정의 건식 식각 공정은 일반적으로 Bosch process로 알려진 실리콘의 건식 식각 방식과 다른 메커니즘을 갖는다. Bosch process는 C_4F_8 가스를 이용한 폴리머(polymer) 증착, SF_6 가스에 의한 아랫면 폴리머 식각, 실리콘 층 식각의 단계로 이루어져 있으며, 이를 반복하여 고종횡비 구조물을 형성하게 된다. 반면에 수정 건식 식각 공정은 폴리머가 증착된 상태에서 process의 구분 없이 진행된다[4, 5].

일반적으로 수정 건식 식각에 식각 가스는 C_2F_6 , C_4F_8 와 같은 탄화불소(fluorocarbon) 가스가 이용된다. 탄화불소 가스는 플라즈마 상태에서, F, CF_x 와 같은 라디칼(radical)과 CF^+ , CF_2^+ , CF_3^+ 와 같은 이온들로 해리된다. 이 때 폴리머 층은 C_xF_y 와 같은 라디칼의 증착을 통해 SiO_2 표면에 형성된다. 또한 낮은 에너지의 이온 충격(ion bombardment)은 폴리머 층을 활성화 시켜 라디칼들의 흡착을 더욱 활성화시

* 정 회 원 : 서울대 공대 전기공학부 박사과정

** 펠로우회원 : 서울대 공대 전기공학부 교수

† 교신저자, 정회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 교수

E-mail : cwbaek@cau.ac.kr

접수일자 : 2011년 1월 11일

최종완료 : 2011년 1월 19일

킨다. 한편 이온 스퍼터링(sputtering)이나 F 원자의 물리적 식각과 폴리머 층과 SiO_2 계면에서 이온 에너지에 의해 발생하는 화학 반응을 통해 폴리머 층은 감소하게 되고, 이와 동시에 SiO_2 의 식각이 이루어지게 된다. 즉, 식각에 관여하는 물질의 공급과 식각에 필요한 이온 에너지의 전달이 폴리머 층을 통해 이루어지므로 폴리머 층의 식각과 증착이 평형 상태를 유지하면서, 충분한 이온 에너지의 전달이 이루어질 수 있는 폴리머 층의 두께를 유도하는 것이 중요하다[5].

O_2 가스는 폴리머 층의 제거를 위해 첨가하게 된다. 그러나 O_2 가스의 유량이 많을 경우 F 원자를 만들게 되고, SiO_2 식각 마스크로 이용되는 실리콘 패턴과 반응하게 되어 선택비를 낮추게 되는 역효과를 낼 수 있다[6].

He 가스는 고종횡비 구조 식각 시 탄화불소 가스에 의한 그림자 효과로 인해 야기되는 변단면(tapered profile) 효과를 완화하고 구조물 측면의 직각도를 향상시키기 위해 첨가하게 된다.

2.2 다구치 방법에 의한 실험 계획

2.2.1 실험 변인 및 직교 배열표

앞서 설명한 SiO_2 식각 메커니즘을 통하여 수정 건식 식각의 최적화를 실험하기 실험 변인은 C_4F_8 , O_2 , He 가스의 유량으로 설정하였으며, 다구치 방법을 사용하여 식각의 최적화 조건 실험을 진행하였다. 식각 실험은 STS사에서 개발한 AOE(Advanced Oxide Etcher)를 이용하였으며, 고정 조건으로 안테나 파워(antenna power; plasma source)로 1300 W(@13.56 MHz), 웨이퍼 척 바이어스 파워(wafer chuck bias power)로 300 W를 인가하였으며, 챔버 내부의 진공도는 4 mTorr, 웨이퍼 척의 온도는 60 °C로 유지하였다.

또한 수정 건식 식각에 관여하는 3가지 실험 변인에 대해 9개의 실험 조건에 따른 직교배열표를 구성할 수 있었다. 직교배열표는 각각의 실험마다 2개의 실험 변인의 수준이 변화되도록 구성되어 있다. 이를 통해 1개의 실험 변인을 고정했을 때 다른 2개의 변인에 대한 중복 실험 없이 효율적으로 실험을 수행할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 또한 1개의 고정된 실험 변인에 대하여 나머지 2개의 실험 변인의 수준 변화를 동일하게 가져감으로써 각 실험 변인에 의한 실험 결과의 기여도를 산출할 수 있게 된다 [7, 8].

2.2.2 표본 제작 및 측정 요소

마스크로 사용할 실리콘 웨이퍼와 수정 웨이퍼를 접합하기 위해 RCA1 세정공정과 O_2 플라스마 처리 과정을 통해 웨이퍼 표면을 처리한 후, 상압에서 접촉시켜 자발적 접합이 이루어지도록 한다. 이후 웨이퍼를 300 °C의 온도에서 어닐링하여 접합력을 강화시킨다. 이후 접합된 실리콘 웨이퍼를 CMP하여 식각 마스크 층을 형성한 후, 실리콘 DRIE 공정으로 마스크를 패턴하여 실험의 표본을 완성하게 된다. 제작된 표본의 비정질 수정 층에 표 1의 직교배열표의 조건에

의하여 건식 식각을 진행하고, 남아있는 실리콘 마스크 층은 KOH 습식 식각으로 제거한다. 수정을 20 μm 깊이로 식각하기 위한 실리콘 마스크는 식각 이후에 남아 있게 하여 선택비를 산출할 수 있도록 30 μm 의 두께로 설계하였으며, 구조물 간격의 변화에 따른 식각 양상을 살펴보기 위하여 패턴의 폭을 5 μm , 10 μm , 20 μm , 30 μm 로 설계하였다. 또한 구조물의 간격 변화에 따른 커스핑(cusping) 현상 및 측면 식각의 양상을 실험하기 위하여 패턴 사이의 간격을 5 μm , 10 μm , 30 μm , 50 μm 로 변화하여 표본을 제작하였다.

직교배열표에 의한 실험 측정 요소는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 마스크의 선폭 대비 양옆으로 식각되는 구조물 폭의 변화(이하 측면식각)와 직각에서 구조물의 경사각(α)을 뺀 값(이하 측면각도)을 측정요소로 설정하였다. 이는 잡음 요소의 크기를 최소화 하는 실험 조건을 도출하기 위하여 망소특성(smaller-the-better)으로 실험 데이터를 분석하기 위해서이다. 이와 더불어 각 실험에 대하여 실리콘 마스크와 비정질 수정의 식각 선택비, 그리고 구조물 사이의 간격이 좁아질 경우 나타나는 커스핑 현상을 분석하였다.

그림 1 측정 요소

Fig. 1 Measurement factors

2.3 실험 결과 및 분석

2.3.1 측면 식각 및 측면 각도 S/N 비 산출 결과

S/N (signal/noise) 비에서 signal은 각 실험의 변인을 의미하는 것으로 본 실험에서는 가스의 유량 변화를 signal로 볼 수 있다. 다구치 방법에서 노이즈(noise)는 각 변인들에 대해서 실험상의 목표값에서 벗어나게 하는 잡음요인(noise factor)을 의미한다. 마스크의 선폭 및 직각이 유지되는 식각을 실험의 목표라 정할 때, 측면 식각과 측면 각도를 목표값에서 벗어나게 하는 잡음요인으로 볼 수 있다. 그리고 잡음요인에 대한 S/N 비를 구하여 노이즈를 최소화 하는 실험 조건을 산출할 수 있게 된다.

각 실험의 측면 식각과 측면 각도에 대해서 측정한 결과, 표 1과 같이 9개의 실험 결과를 정리할 수 있었다. 각 실험마다 24개의 표본을 추출하여 평균값을 구하였으며, 측면 각도를 측정할 경우 촬영된 단면 이미지 사진에 의한 각도의 편차를 고려하여 그림 2와 같이 좌우 측정된 각도의 평균을 반영하였다.

그림 2 최소 측면 식각 결과
(식각조건: $C_4F_8:O_2:He=20:0:25$ (sccm))

Fig. 2 Result of minimum side etch profile

측면 식각의 경우 $0.9 \sim 3.5 \mu m$ 의 다양한 변화 양상을 보였으나 측면 각도의 경우 8번과 4번 실험을 제외하고 모두 음의 경사각(negative slope)을 보였다. 산출된 결과 값은 식 (1)과 같은 망소 특성으로 S/N 비를 계산하였으며, 표 1과 같이 정리할 수 있었다.

$$n_j = -10 \log \left(\left(\sum_{i=1}^N Y_{ij}^2 \right) / N \right) \quad (1)$$

(Y : 측정값, N : 표본 개수, j : 실험번호)

표 1 직교배열표와 S/N 비 산출 및 선택비 측정 결과
Table 1 Orthogonal array and measurement results
(S/N ratio and selectivity)

실험 번호	직교배열표			S/N 비		선택비 (수정 식각깊이 실리콘 식각깊이)
	C_4F_8 (sccm)	O_2 (sccm)	He (sccm)	측면식각	측면각도	
1	60	40	75	-12.643	-6.427	2.3
2	60	20	25	-12.677	-8.682	4.1
3	60	0	125	-9.017	-6.561	5.5
4	40	40	25	-11.158	-4.484	1.2
5	40	20	125	-6.964	-11.739	6.2
6	40	0	75	-8.931	-6.219	15.6
7	20	40	125	-9.807	-11.526	1.2
8	20	20	75	-17.003	-23.264	1.2
9	20	0	25	-5.635	-7.679	8.8

2.3.2 선택비 및 커스핑 효과

선택비는 수정 구조물의 식각 깊이를 식각 이후 줄어든 실리콘 마스크의 식각 깊이로 나눈 값으로 계산하였다. 표 1의 1번, 4번, 7번 실험에서 볼 수 있듯이, 선택비는 O_2 의 유량이 커질수록 크기가 점점 작아지는 양상을 보이고 있다. 이는 O_2 의 유량이 증가함에 따라 C_4F_8 이 해리될 때 나타나는 F 라디칼의 비율이 높아지기 때문에 실리콘 마스크의 식

각이 진행되어 나타나는 현상으로 보인다. 또한 구조물의 $10 \mu m$ 이하의 간격에서 그림 3 같은 커스핑 효과가 관찰되었다. 이 같은 결과는 C_4F_8 의 유량이 충분하지 못하여 좁은 선폭 사이로 폴리머가 효과적으로 확산되지 못한 채 식각이 진행되었기 때문인 것으로 분석된다.

그림 3 실험 6의 커스핑(cusping) 효과

Fig. 3 Cusping effect of the 6th experiment

2.3.3 S/N 비 분석

S/N비 산출값을 토대로 하여 한 변인에 대한 S/N비 합을 계산하면 표 2와 표 3과 같이 측면 식각과 측면 각도에 대한 S/N 비 분석표를 작성 할 수 있다. 또한 S/N 비 합계의 편차 제곱값을 통해 각 실험 변인의 기여율을 산출 할 수 있다. 이 같은 결과에 따라 측면 식각의 조건은 C_4F_8 , O_2 , He,의 수준이 각각 2, 1, 3이었으며 이에 해당하는 각 요인의 유량은 각각 40 sccm, 0 sccm, 125 sccm에 해당한다. 또한 측면 각도에 대한 조건은 C_4F_8 , O_2 , He,의 수준이 각각 3, 1, 1이었으며, 이에 해당하는 유량은 각각 60 sccm, 0 sccm, 25 sccm으로 산출되었다. 측면 식각과 측면 각도의 공정 최적 조건이 서로 다르지만, 각 변인의 공정에 대한 기여도를 감안할 때 두 공정 조건의 최적화된 조건을 C_4F_8 , O_2 , He,의 유량을 각각 40 sccm, 0 sccm, 125 sccm으로 결정할 수 있었다.

표 2 측면 식각에 대한 S/N 비 분석

Table 2 S/N ratio analysis for side etch

실험 변인		C_4F_8	O_2	He
1개의 변인에 대한 S/N비 합	수준1	-10.815	-7.861	-9.823
	수준2	-9.018	-12.215	-12.859
	수준3	-11.446	-11.203	-8.596
	합계	-31.278	-31.278	-31.278
S/N비 합계의 편차 제곱합	수준1	3.229	18.954	9.214
	수준2	5.895	1.024	18.170
	수준3	0.398	11.168	1.506
	합계	9.522	31.146	28.890
기여율 (%)		13.69	44.78	41.53

표 3 측면 각도에 대한 S/N 비 분석

Table 3 S/N ratio analysis for profile angle

실험 변인		C ₄ F ₈	O ₂	He
1개의 변인에 대한 S/N비 합	수준1	-14.156	-6.819	-6.948
	수준2	-7.481	-14.561	-11.970
	수준3	-7.223	-7.479	-9.942
	합계	-28.860	-28.859	-28.860
S/N비 합계의 편차 제곱합	수준1	44.556	59.944	25.219
	수준2	0.066	50.165	4.114
	수준3	48.062	0.435	8.962
	합계	92.685	110.544	38.294
기여율 (%)		38.38	45.77	15.85

2.4 토의 및 결론

표 1에서 실험 4, 7, 8 과 같이 O₂가스의 유량이 C₄F₈가스 유량과 비슷하거나 많은 경우, 오히려 실리콘마스크의 식각을 유도하여 선택비를 낮추는 결과를 볼 수 있었다. 또한 같은 실험에서 측면 식각 S/N 비 값이 낮게 산출결과를 볼 때 O₂가스의 유량의 증가로 인한 실리콘 마스크의 식각은 측면 식각의 양상을 증가시키는 것으로 사료된다. 따라서 실리콘을 마스크로 사용할 경우 O₂가스를 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

표 2에서 기여율을 고려할 때 C₄F₈의 가스 유량 변화는 식각에 대해 가장 적게 영향을 주는 것으로 산출되었다. 이는 표 1에서 실험 3과 실험 6의 측면 식각 S/N 비를 볼 때, C₄F₈의 가스 유량이 증가했음에도 불구하고, 비슷한 수준의 S/N 비 값이 도출된 것으로 보아 확인할 수 있었다. 또한 구조물의 직각도를 높이기 위해 투여한 He 가스의 경우, 대부분의 실험 결과에서 측면 각도의 값이 4° 미만의 값을 보이는 것으로 볼 때, 예상과는 달리 구조물의 직각도에 큰 영향을 주지 않았음을 알 수 있었다.

표 1에서 O₂가스를 제외한 실험 3, 6, 9의 결과를 볼 때 C₄F₈과 He 의 유량 비율에 따라 선택비가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 실험 9의 경우 C₄F₈의 유량이 작아 폴리머층의 두께가 얇게 형성이 되어 식각에 관여하는 있는 물질이 공급이 원활하지 못했음을 알 수 있다. 반대로 실험 3의 경우는 폴리머층의 두께가 오히려 두껍게 형성되어, 식각에 필요한 이온 에너지의 전달이 원활히 이루어지지 못한 것으로 판단된다. 실험 6의 경우 적정 두께의 폴리머층 형성으로 식각에 관여하는 물질 및 이온 에너지의 공급이 균형을 이루어, 가장 높은 선택비가 형성되었다고 판단된다. 하지만, 그림 3과 같이 실험 6에서 발생한 커스핑 효과를 방지하기 위해서는 He의 유량을 증가시켜 물리적 식각의 활성화를 유도할 필요가 있을 것으로 사료된다. 이상의 논의를 바탕으로 할 때, 다구치 방법에 의해 도출된 식각 가스 유량 조건 (C₄F₈:O₂:He=40:0:125 (sccm))은 나름의 타당성을 갖는 것으로 판단된다.

3. 비정질 수정과 실리콘 마이크로 캔틸레버의 Q-factor 비교

3.1 에너지 손실 메커니즘

진동자의 에너지 손실 요인은 크게 공기 감쇠(air damping, Q_{air})에 의한 외부적 요인(extrinsic factor)과, 열탄성 감쇠(thermoelastic damping, Q_{TED}), 지지부 감쇠(support damping, $Q_{support}$), 표면 감쇠(surface damping, $Q_{surface}$)와 같은 내부적 요인(intrinsic factor)들로 구성되며, 이러한 요인들을 고려한 Q-factor 값은 식 (2)와 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{Q_{total}} \approx \frac{1}{Q_{air}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{support}} + \frac{1}{Q_{surface}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q_{intrinsic}} \approx \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{support}} \quad (3)$$

이러한 에너지 손실 요인들 중 surface damping에 의한 에너지 손실의 원인은 캔틸레버 구조물의 빔 두께가 sub-micron 단위로 작아질 경우 부피 대비 표면적 비율(surface-to-volume ratio)이 높아짐에 따라 주된 에너지 손실 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다[9]. 본 실험에서 제작된 마이크로 캔틸레버의 경우 빔 두께가 25 μ m로서 설계되어, 표면 감쇠에 의한 에너지 손실이 전체 Q 값의 형성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 가정하였으며, Q 형성의 주된 내부 요인으로 Q_{TED} 와 $Q_{support}$ 를 설정하였다.

3.1.1 열탄성(thermoelastic) 감쇠에 의한 에너지 손실

열탄성 감쇠에 의한 에너지 손실은 일반적으로 진동하는 구조물에서 내부적으로 소진되는 에너지를 말한다. 그림 10과 같이 구조물이 진동할 때, 장력을 받는 면은 온도가 하강하고, 압축력을 받는 면은 온도가 상승하게 된다. 이 때 구조물 내부적으로 열이 전도되면서 열적 불균형 상태가 평형상태로 바뀌게 되는데, 이 과정에서 외부에서 공급된 진동 에너지가 열 에너지로 소진된다[10, 11].

그림 4 열탄성 감쇠의 시뮬레이션

Fig. 4 Thermoelastic damping simulation

캔틸레버 구조물의 경우 열탄성 감쇠에 의한 손실 에너지는 식 (6)과 같이 Zener equation [11]으로 계산될 수 있는데, 진동자의 공진 주파수 f 와 진동자의 물리적 특성에 의한 온도 변화 주파수 f_0 의 함수로 표현된다. 이 때, 그림 11과 같이 캔틸레버의 구조물이 정의된 경우, f_0 는 식 (4)와 같이 열 전도율(λ), 비열(C_p), 밀도(ρ), 그리고 구조물의 진동방향 두께(t)에 의한 함수로 정의된다. 한편, 캔틸레버 구조물의 공진 주파수 f 는 식 (5)와 같이 Young's modulus (E),와 밀도 (density), 구조물의 길이(l), 구조물의 진동방향 두께(t)에 의한 함수로 표현이 가능하다. 본 실험에서와 같이 캔틸레버의 빔의 진동방향 두께(t)를 고정한다면, 길이 l 의 변화에 대한 열탄성 에너지 손실량을 이론적으로 추정할 수 있다.

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{1}{t^2} \quad (4)$$

$$f_n = \frac{\pi \beta_n^2}{2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \frac{t}{l^2} \quad (5)$$

$$Q_{TED} = \frac{\rho C_p}{\alpha^2 TE} \left(\frac{f_0}{f_n} + \frac{f_n}{f_0} \right) \quad (6)$$

$$= A \left(\frac{Bl^2}{t^3} + \frac{t^3}{Bl^2} \right)$$

(단, A, B 는 상수: $A = \frac{\rho C_p}{\alpha^2 TE}$, $B = \frac{\sqrt{12\lambda}}{\beta_n^2 C_p \sqrt{E\rho}}$)

3.1.2 지지부(support) 감쇠에 의한 에너지 손실

외부 에너지가 구조물의 빔(beam)의 진동으로 나타나게 되면, 빔과 구조물의 support 부분에서 전단응력(shear force)과 모멘트를 야기하게 된다. 이 때 생기는 전단응력은 지지부에서 탄성파(elastic wave)로 작용하게 되며 지지부 내부로 흡수되어 에너지 손실이 발생한다[10]. Yang, et al.[10]은 캔틸레버 구조물에서 $Q_{support}$ 계산식을 식 (7)과 같이 유도하였다.

$$Q_{support} = 0.336 \left(\frac{l}{w} \right)^3 (\text{Silicon}) \quad (7)$$

$$Q_{support} = 0.408 \left(\frac{l}{w} \right)^3 (\text{Fused quartz}) \quad (8)$$

그림 5 지지부 감쇠 모식도

Fig. 5 Schematic view of support damping

식 (7)에서 볼 수 있듯이 $Q_{support}$ 는 길이 l 과 너비 w 에 관한 식으로 표현할 수 있으며, 앞의 상수 0.336은 실리콘 캔틸레버의 지지부에 들어온 탄성과 에너지가 반사되지 않고, 내부에서 소진된다는 가정 아래 유도된 고유값이다. 따라서 fused quartz의 물리적 상수들을 새로 도입하여 마찬가지로 고유값을 구하여 다음 식 (8)과 같이 다시 계산할 수 있었다.

3.2 캔틸레버 제작 및 공진 특성 측정

3.2.1 비정질 수정 캔틸레버 제작 공정

먼저 실리콘 웨이퍼에 공동(cavity)을 형성한 후, 비정질 수정 웨이퍼와 함께 RCA1 세정과 O_2 플라즈마 처리를 하여 표면을 친수성으로 개질한다. 상압에서 초기접합(initial bonding)을 실시한 후, 어닐링(annealing)으로 접합력을 증가시킨다. 접합된 SoQ 웨이퍼의 수정면을 CMP하여 원하는 캔틸레버의 두께(진동방향 두께)를 형성한 후(그림 6(a)) 다시 SoQ 저온 접합 공정으로 실리콘 마스크층을 형성한다(그림 6(b)). 비정질 수정 건식 식각을 실시하여 캔틸레버를 식각 한 후(그림 6(c)), 캔틸레버 끝부분에 알루미늄을 패터닝한다(그림 6(d)). 이는 캔틸레버의 공진 특성을 측정할 때 레이저의 반사를 유도하기 위한 패터닝이다.

그림 6 비정질 수정 캔틸레버 제작 공정

Fig. 6 Fabrication process of fused quartz cantilevers

3.2.2 실리콘 캔틸레버 제작 공정

SioG (Silicon-on-Glass) 접합 공정으로 캔틸레버의 지지판(glass)을 형성한 후 CMP공정으로 비정질 수정 캔틸레버와 같은 두께를 형성한다. 이후 감광막 (AZ 4330)을 패터닝하고, 실리콘 DRIE 공정을 통해 캔틸레버의 구조물을 형성한다. 이후 HF 습식 식각을 통해 구조물을 부양시켜 시편을 제작한다[6].

그림 7 비정질 수정 캔틸레버 제작 결과
Fig. 7 Fabricated fused quartz cantilever

3.2.3 캔틸레버 제작 결과

제작된 비정질 수정 캔틸레버는 그림 7과 같이 촬영되었다. 그림 7(b)는 제작된 캔틸레버의 전체 모습을 보여주고 있으며, 그림 7(a)의 확대 그림을 통해 끝단에 형성된 알루미늄 패턴을 확인할 수 있다. 또한 그림 7(c)의 확대 그림에서 캔틸레버의 지지부분 밑에 형성되어 있는 공동(cavity)을 볼 수 있다. 이와 더불어 캔틸레버의 지지기판인 실리콘 층의 손상된 모습을 확인 할 수 있는데, 이는 비정질 수정 캔틸레버 위에 남아있던 실리콘 마스크를 제거하기 위하여 수산화칼륨(KOH) 용액으로 습식 식각을 진행하면서 바닥면이 손상된 모습을 나타내 주고 있다.

3.2.4 실험 방법 및 공진 특성 측정 결과

공진 특성 측정을 위한 실험 장치의 개략도를 그림 8에 나타내었다. 제작된 캔틸레버 구조물을 압전소자 위에 고정시킨 후, 진공 챔버에 내부에 넣고 20 mTorr 까지 진공을 뽑는다. 신호 분석기에서 출력한 AC 신호(20 mV)를 압전소자에 가하여 진동시키고 캔틸레버의 움직임을 레이저 변위 장치로 측정한다. Doppler 효과를 이용하여 측정된 캔틸레버의 진동 속도 신호는 변위 측정 장치를 거쳐 전압으로 변환된다. 이 전압을 다시 신호분석기에 입력하여 FFT 신호처리 과정을 통해 처음 압전소자에 인가된 AC 신호 대비 이득(Gain)과 위상(phase)으로 캔틸레버의 공진 특성을 분석할 수 있었다. 제작된 캔틸레버의 크기와 신호분석기를 통해 측정된 공진 주파수 및 Q -factor 값은 표 4와 표 5와 같이 정리할 수 있었다.

그림 8 측정 실험 장치
Fig. 8 Measurement set-up

표 4 비정질 수정 캔틸레버의 제작 결과 및 공진 특성 측정 결과

Table 4 Dimensions of fused quartz cantilever and resonance frequencies

설 계 (두께: 25 μm 너비: 100 μm)		제 작 (두께: $24.87 \pm 0.08 \mu\text{m}$ 너비: $98.7 \pm 0.5 \mu\text{m}$)		Q -factor
길이 (μm)	주파수 (kHz)	길이 (μm)	주파수 (kHz)	
800	36.02	796.3	34.89	67,957
1000	23.05	996.7	22.49	64,373
1200	16.01	1195.6	16.04	89,343
1400	11.76	1395.3	11.53	108,819
1600	9.00	1596.7	8.97	77,944
1800	7.12	1796.1	7.22	72,555

표 5 실리콘 캔틸레버의 크기 및 공진주파수

Table 5 Dimensions of Si cantilevers and resonance frequencies

설 계 (두께 : 25 μm 너비 :100 μm)		제 작 (두께: $24.58 \pm 0.09 \mu\text{m}$ 너비: $96.9 \pm 1.1 \mu\text{m}$)		Q -factor
길이 (μm)	주파수 (kHz)	길이 (μm)	주파수 (kHz)	
1200	20.96	1195.2	20.55	31,541
1400	15.40	1395.1	15.18	35,302
1600	11.79	1595.5	11.64	31,900
1800	9.32	1795.7	9.22	31,110

3.3 Q -factor 측정 결과 및 분석

3.3.1 공기 감쇠 요소의 고려

비정질 수정 및 실리콘으로 만들어진 캔틸레버의 내부적 요인에 의한 Q 값은 10^{-3} Torr 이상의 고진공 조건에서 공기 감쇠의 영향을 배제 할수록 쉽게 비교, 분석할 수 있다. 하지만 본 실험에서 진행한 20 mTorr 압력 조건에서는 공기 분자와 구조물간의 충돌에 의한 모멘텀 감쇠(momentum damping)가 작용하는 것으로 알려졌다[12], 이에 따른 에너지 손실을 무시할 수 없으므로 공기 감쇠 요소를 고려하였다. M. Bao 등은 공기 분자의 momentum damping 에 의한 Q -factor를 구하기 위해 식 (9)와 같이 christian modeling을 통해 Q_{air} 값을 계산하였다 [13].

$$Q_{air} = (2\pi)^{2.5} \left(\frac{d}{l} \right)^{0.75} \sqrt{\frac{RT}{M_m}} \frac{1}{P} \quad (9)$$

위 식에서 d 는 공동의 높이, l 은 캔틸레버의 길이, t 는 캔틸레버의 진동방향 두께, f 는 공진 주파수를 각각 의미한다. 또한, R , T , M_m , P 는 각각 기체상수, 절대온도, 공기의 몰랄질량, 압력을 나타낸다.

3.3.2 Q-factor 분석

실리콘 및 비정질 수정 캔틸레버의 공진 실험을 통해 산출한 Q -factor 값의 분포 및 감쇠 요소에 의한 이론적인 Q -factor의 분포양상은 그림 9과 그림 10에서와 같이 각각 그래프로 표현할 수 있었다. 20 mTorr의 진공 상태에서 비정질 수정과 실리콘 캔틸레버 모두 공기에 의한 감쇠 영향이 Q -factor의 분포에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 비정질 수정 캔틸레버의 경우 길이 1200 μm 이하의 구조에서는 캔틸레버의 길이가 증가할수록 Q -factor 값이 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 캔틸레버의 길이가 길수록 지지부 감쇠에 의한 Q_{support} 값이 커지므로 앞부분에서의 식 (3)과 같이 내부적 감쇠 요인을 가정한 경우, 상대적으로 높은 값 ($>10^6$)을 보이는 열탄성 감쇠에 의한 Q_{TED} 값이 반영되는 것으로 판단된다. 반면에 1200 μm 이상의 캔틸레버에서는 내부적 감쇠 요인보다 공기 감쇠에 의한 영향이 상대적으로 크게 반영되고 있음을 알 수 있으며, 이에 따라 길이가 증가할수록 Q -factor 값이 점차 감소하고 있는 양상을 확인 할 수 있었다. 또한 실리콘 캔틸레버의 경우 공기 감쇠에 의한 Q -factor는 길이 1200 μm 이상의 비정질 수정 캔틸레버의 값과 비교할 때 비슷한 값을 갖는 것으로 드러났으나, 비정질 수정 캔틸레버에 비해 상대적으로 낮은 Q_{TED} 의 분포 ($4 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$)로 인해 intrinsic Q -factor의 분포가 Q_{air} 보다 낮은 값을 보이고 있음을 알 수 있었다.

이와 같은 실험값의 분포를 살펴볼 때 동일 구조물의 경우 비정질 수정 캔틸레버의 Q 값이 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 실리콘 구조물 대신 비정질 수정 기반의 구조물을 제작할 경우 보다 우수한 공진 특성을 보일 것으로 예상된다.

그림 9 실리콘 캔틸레버 Q 측정 결과

Fig. 9 Q -factor of silicon cantilever

그림 10 비정질 수정 캔틸레버 Q 측정 결과

Fig. 10 Q -factor of fused quartz cantilever

3. 결 론

수정 물질은 실리콘에 비해 온도 변화에 대해 안정적이며, 좋은 기계적 특성을 보이고 있어 실리콘 기반의 관성센서가 갖는 단점을 극복할 수 있으며, MEMS 가공 기술과 접목될 경우 군사, 항공우주 산업에 적용 가능한 고성능 센서의 개발이 가능할 것으로 여겨지고 있다. 최근 식각 장비 기술의 발달에 힘입어 수정 기반 물질에 대한 건식 식각이 가능해지면서, MEMS 분야의 다양한 활용이 기대되고 있다. 본 연구는 이러한 수정 기반 MEMS 시스템을 개발하기 위해 단결정 실리콘 마스크를 이용한 비정질 수정 건식 식각 공정 최적화 조건을 다구치 방법을 이용하여 산출하였다. 또한 이를 적용하여, 비정질 수정 캔틸레버를 제작하였고, 비슷한 크기의 실리콘 캔틸레버를 제작하여 각각의 Q -factor를 실험적으로 측정하였다. 그 결과 비정질 수정 캔틸레버의 경우 길이에 따라 약 64,000 ~ 108,000의 Q -factor가 측정되었으며, 단결정 실리콘 캔틸레버의 경우 약 31,000~35,000으로 측정되었다.

두 물질의 캔틸레버가 비슷한 크기의 Q_{air} 값을 가짐에도 불구하고 intrinsic- Q 값의 차이에 따라 전체 Q -factor의 크기가 것임을 간접적인 분석을 통해 알 수 있었다. 비정질 수정의 경우 열탄성 감쇠에 의한 에너지 손실이 매우 적기 때문에 이론적으로는 1×10^6 이상의 높은 Q_{TED} 특성을 보인다. 하지만, 지지부 감쇠에 의한 에너지 손실에 따라 intrinsic- Q 의 값이 낮아지게 되는 양상을 볼 수 있다. 따라서 비정질 수정을 이용하여 고성능 관성센서의 제작을 위해서는 지지부 감쇠에 의한 에너지 손실을 줄일 수 있는 구조물 설계가 반드시 필요할 것으로 보인다. 이와 더불어 10^{-3} Torr 이상의 고진공 실장을 통해 공기 감쇠에 의한 에너지 손실 요소를 배제할 수 있다면, 비정질 수정의 우수한 공진 특성을 이용한 고성능 MEMS 관성센서를 충분히 개발할 수 있으리라 생각된다. 또한 이번 실험 결과는 향후 비정질 수정 물질을 이용한 고성능 관성센서 제작 시 Q -factor를 고려한 구조물 설계의 기초자료로 활용 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 지정 국방 MEMS 특화연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Partridge, J. McDonald "Silicon MEMS Oscillators to Replace Quartz Crystals", SiTime corporation's technical paper, 2006.
- [2] Kubena et. al., 2007 US Patent, us2007/0017287 A1.
- [3] D. Chang, et. al., "Optimized DRIE etching of ultra-small quartz resonators," Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 829-832, 2003. Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.
- [4] H. Chen, et. al, "An investigation into the characteristics of deep reactive ion etching of quartz using SU-8 as a mask", J.Micromech.microeng. vol 18, pp.1-8, 2008
- [5] Da Zhang and Mark J.Kushner, "investigations of surface reactions during C2F6 Plasma etching of SiO2 with equipment and feature scale models", J. Vac. Sci. Technol. A 19(2), Mar/Apr 2001 pp 524-538.
- [6] H. -K. Jung et al., "Silicon/Quartz bonding for Quartz Deep RIE for the Fabrication of Quartz resonator structures" Proc. IEEE NEMS, pp. 1172-1175, 2008.
- [7] Puneet Sharma, Amitabh Verma, R.K. Sidhu, O.P. Pandey, "Process parameter selection for strontium ferrite sintered magnets using Taguchi L9 orthogonal design," J.Materials Processing Technology, Vol. 168, pp. 147-151, 2005.
- [8] Park, S. H., "Morden Design of Experiments", Minyongsa, pp. 305-329, 2001.
- [9] J. Yang, et.al., "Energy dissipation in Submicrometer Thick Single-Crystal Silicon cantilevers" J.Microelectrochem.Syst. 11(6) pp. 775-783, 2002.
- [10] J. Yang, et. al., "Energy dissipation in Submicrometer Thick single-Crystal Silicon Cantilevers" J. Microelectrochem. Syst.11(6) pp. 775-783, 2002.
- [11] C. Zener, "Internal friction in solids II: General theory of thermoelastic internal friction," Phys. Rev., vol. 53, pp. 90-99, 1938.
- [12] J. D. Zook, et. al., "Characteristics of Polysilicon Resonant Microbeams", Sensors and Actuators, A 35, 51-9, 1992.
- [13] M. Bao, et. al., "Energy Transfer Model for Squeeze-film Air Damping in Low Vacuum", J. Micromech. Microeng., 12 341-6, 2002.

저 자 소 개

송 은 석 (宋 垠 錫)

1977년 11월 20일생. 2007년 서울대 전기공학부 졸업. 2009년 서울대 전기컴퓨터공학부 석사. 2011년 1월-현재 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 박사과정

김 용 권 (金 容 權)

1960년 10월 23일생. 1983년 서울대 공과대학 전기공학과 학사. 1985년 동대학원 석사. 1990년 동경대학교 대학원 전기공학과 박사. 1990년 4월 - 1992년 1월 일본 히타치제작소 중앙연구소 연구원. 1992년 2월 - 1996년 9월 서울대학교 전기공학부 조교수. 1996년 10월 - 2002년 9월 서울대학교 전기공학부 부교수. 2002년 10월 - 현재 서울대학교 전기공학부 정교수.

백 창 욱 (白 昌 煜)

1970년 11월 12일생. 1993년 서울대 전기공학과 졸업. 2000년 서울대 전기컴퓨터공학부 대학원 졸업 (공학박사). 2000년 - 2002년 서울대 반도체공동연구소 특별연구원. 2002년 - 2005년 서울대 전기컴퓨터공학부 BK 조교수. 현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수.