



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

호형태의 스프링 구조물을 포함하는
압저항형 마이크로폰

Piezoresistive Microphone with Arc-shaped
Springs

2021 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 · 정보공학부

김애련



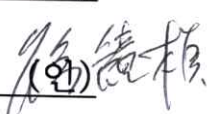
호형태의 스프링 구조물을 포함하 는 압저항형 마이크로폰

지도 교수 조 동 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2021년 2월

서울대학교 대학원
전기 · 정보공학부
김 애 련(성명)

김애련의 공학석사 학위논문을 인준함
2021년 2월

| | | |
|------|-----|---|
| 위원장 | 정덕균 | (인)  |
| 부위원장 | 조동일 | (인)  |
| 위원 | 서종모 | (인)  |

초 록

미세전자기계시스템 (microelectromechanical system; MEMS) 센서는 사물인터넷 (internet of things; IoT)의 급성장을 중심으로 다품종, 고성능 제품에 대한 수요가 크게 증가하여 새로운 호황을 맞이하고 있다. 특히, MEMS 마이크로폰의 경우 스마트폰 출시와 더불어 최근 스마트모빌리티, AI 기술 기반 음성인식으로의 적용으로 급격한 시장 성장세를 보인다. MEMS 마이크로폰은 감지방식에 따라 정전용량형, 압전형, 압저항형 3가지로 구분된다. 정전용량형 마이크로폰의 경우 면적이 크고 공정의 복잡성이 높은 단점이 있다. 압전형의 마이크로폰의 경우 압전층을 구성하는 물질 중 박막형태로 가공가능한 종류가 제한적이며 저주파의 신호 측정에는 특성이 불안정하다는 단점이 있다. 압저항 감지방식은 위 두가지 방식의 단점을 해결할 수 있으나 도핑 방법으로는 압저항 효과를 증가시키는데 한계가 있으며, 이로 인해 센서의 민감도 향상에 제한적이다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 수행한 “스마트센서용 초소형 NEMS 공정플랫폼 개발” 과제의 일환으로 관련 공정설계를 하였으며 최종적으로 마이크로폰을 제작하여 성능의 측정을 진행하였다. 과제에서 제안된 마이크로폰은, 멤브레인의 가장자리에 위치한 스프링 구조물을 호형태로 구부려 멤브레인을 둘러싸는 구조로 설계하여 면적을 최소화할 수 있으며, 우수한 압저항 특성을 가진 실리콘 나노와이어를 호형태 스프링 구조물의 최대응력이 발생하는 위치에 배치해 높은 민감도를 확보할 수 있도록 하였다. 공정은 본 연구진 고유의 실리콘 나노와이어 제조 공정 기술을 응용하여 2~300 nm 급 크기를 가지며 Si₃N₄ 기반 스프링 구조물 및 멤브레인과 함께 부유된 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 공정설계를 하고 제작하였다. 최종적으로, 제작한 마이크로폰에 대해 성능평가를 진행해 민감도 52.94 mV/Pa 및 SNR 52.89 를 확보하였고, 이는 타연구진의 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰 연구결과보다 우수하며, 상용 마이크로폰에 준하는 특성을 보인다.

주요어 : 실리콘 나노와이어, 마이크로폰, MEMS 공정
학 번 : 2019-25509

목 차

| | | |
|----------|----------------------------|----|
| 제 1 장 서 | 론 | 1 |
| 제 1 절 | 연구의 배경 | 1 |
| 제 2 절 | 연구의 내용 | 5 |
| 제 2 장 본 | 론 | 7 |
| 제 1 절 | 실리콘 나노와이어 | 7 |
| 제 1 항 | 실리콘 나노와이어의 압저항 효과 | 8 |
| 제 2 항 | 실리콘 나노와이어의 공정 기술 | 8 |
| 제 3 항 | 본 연구진이 보유한 실리콘 나노와이어 공정 기술 | 10 |
| 제 2 절 | 마이크로폰 설계 | 12 |
| 제 1 항 | 마이크로폰의 스프링 및 멤브레인 | 12 |
| 제 2 항 | 마이크로폰의 실리콘 나노와이어 | 15 |
| 제 3 항 | 호형태 스프링 설계 | 17 |
| 제 3 절 | 마이크로폰 공법 | 20 |
| 제 1 항 | 실리콘 나노와이어를 포함하는 마이크로폰 공법 | 20 |
| 제 2 항 | 마이크로폰 제작결과 | 24 |
| 제 4 절 | 마이크로폰 측정 및 분석 | 38 |
| 제 1 항 | 마이크로폰 소자 및 실험환경 구성 | 38 |
| 제 2 항 | 마이크로폰 특성 평가 방법 | 43 |
| 제 3 항 | 마이크로폰 특성 평가 결과 및 분석 | 44 |
| 제 2 장 결 | 론 | 52 |
| 제 1 절 | 결론 | 52 |
| 제 2 절 | 향후 계획 | 53 |
| 참고문헌 | | 54 |
| Abstract | | 60 |

표 목차

| | |
|--|----|
| [표 2-1] 오일러빔 기반 스프링 상수 손계산 및 시뮬레이션 값 비교 | 14 |
| [표 2-2] 음압별 SiNW 기반 마이크로폰 저항변화량 예측정리..... | 17 |
| [표 2-3] 제작된 마이크로폰의 5회 출력전압 및 평균값..... | 45 |
| [표 2-4] 마이크로폰 소자(Knowles 社, SPW 2430)출력전압.... | 46 |
| [표 2-5] 제작된 마이크로폰 소자의 sensitivity 값 | 48 |
| [표 2-6] 제작된 마이크로폰으로 측정된 EIN값 | 50 |
| [표 2-7] 제작된 마이크로폰으로 측정된 SNR 값..... | 51 |

그림 목차

| | |
|--|----|
| [그림 1-1] MEMS 글로벌 시장 추세 | 1 |
| [그림 1-2] Iphone X에 들어간 MEMS 마이크로폰..... | 2 |
| [그림 1-3] 정전용량형 마이크로폰 예시 | 3 |
| [그림 1-4] 압전형 마이크로폰 예시 | 4 |
| [그림 1-5] 압저항형 마이크로폰 예시 | 5 |
| [그림 2-1] VLS 메커니즘으로 성장시킨 실리콘 나노와이어 | 7 |
| [그림 2-2] 벌크 구조와 차원 감소에 따른 나노구조의 개념도..... | 8 |
| [그림 2-3] 탑-다운 공정 방식으로 제작된 실리콘 나노와이어 | 9 |
| [그림 2-4] 개발한 실리콘 나노와이어 공법..... | 11 |
| [그림 2-5] 열산화 공정을 이용한 나노와이어의 너비 조절 | 11 |
| [그림 2-6] 직선형태 스프링을 포함한 마이크로폰 구조 | 13 |
| [그림 2-7] 본 연구진이 설계한 마이크로폰 | 14 |
| [그림 2-8] 스프링 구조물에서 최대 인장발생 지점 및 최대 압축발 생 지점 | 15 |
| [그림 2-9] SiNW가 compression(좌) 및 tension(우) stress를 받는 디자인에 따른 von-mises stress 및 displacement 분포 그래프 | 16 |
| [그림 2-10] 실리콘 나노와이어 압저항 모델..... | 16 |
| [그림 2-11] 호형태의 스프링 구조물 기반 마이크로폰 형상 | 18 |
| [그림 2-12] A-A' 에서의 von-mises stress 그래프..... | 18 |
| [그림 2-13] 구간 A-A' 에서의 displacement 그래프..... | 19 |
| [그림 2-14] 호형태 스프링 구조물 기반 마이크로폰 schematic... | 19 |
| [그림 2-15] 실리콘 나노와이어를 포함하는 스프링 구조물 기반 NEMS 마이크로폰 공정도..... | 21 |
| [그림 2-16] 마이크로폰 공정 중 실리콘 나노와이어 형성 과정.... | 22 |
| [그림 2-17] 1차 photolithography공정후 멤브레인 부분 | 25 |
| [그림 2-18] 1차 photolithography 공정후 스프링 및 나노와이어 부분 | 26 |
| [그림 2-19] 1차 SiO ₂ dry etch 공정결과 | 27 |
| [그림 2-20] 1차 Si etch 공정결과 | 28 |
| [그림 2-21] 2차 wet oxidation 공정결과..... | 29 |
| [그림 2-22] KOH용액을 이용한 wet etch 공정 결과..... | 30 |
| [그림 2-23] SiO ₂ deposition 공정결과..... | 31 |
| [그림 2-24] Si ₃ N ₄ deposition 공정결과..... | 31 |
| [그림 2-25] 3차 Si etch 공정결과 | 33 |
| [그림 2-26] Lift-off 공정결과 | 35 |
| [그림 2-27] 4차 Si etch후 형성된 cavity | 36 |
| [그림 2-28] 5차 SiO ₂ etch후 박막 | 37 |

| | |
|---|----|
| [그림 2-29] 5차 Si etch후 남은 Si ₃ N ₄ 박막 | 38 |
| [그림 2-30] 마이크로폰 측정 환경 구성 | 39 |
| [그림 2-31] 브릿지 및 IC 회로 구성도 | 39 |
| [그림 2-32] 아크릴 스탠드를 이용한 소자측정 세팅 | 40 |
| [그림 2-33] 마이크로폰 시편 와이어본딩 사진 | 41 |
| [그림 2-34] 마이크로폰 소자 패키징 방법 | 41 |
| [그림 2-35] 아크릴 스탠드 schematic | 42 |
| [그림 2-36] 제작된 마이크로폰 주파수 응답특성(증폭기 이득 200) | 47 |
| [그림 2-37] Knowles 마이크로폰으로 측정한 스피커 주파수 응답특성 (Knowles 7.9 mV/Pa 기준으로 환산) | 47 |
| [그림 2-38] 타 연구진(LETI 연구소)의 마이크로폰 frequency response 그래프 | 49 |
| [그림 2-39] 본 연구진이 작년에 제작한 마이크로폰 frequency response 그래프 | 49 |

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

MEMS 센서는 미세전자 및 미세기계 기술을 사용하여 제조된 새로운 유형의 센서다. MEMS 센서는 소형화가 가능하며, 가볍고, 저전력 소비, 높은 신뢰성, 높은 기술 부가가치, 대량 생산, 쉬운 통합 및 지능 실현에 적합한 특성을 가지고 있다. 그림 1-1과 같이 최근 미세전자기계시스템 장치의 응용 범위는 점점 더 넓어지고 있으며 자동차, 생물 의학, 소비자 전자 제품, 공정, 방위 또는 광학 분야에 관계없이 점점 더 많은 MEMS 장치를 볼 수 있다[1]. 그중 인공지능을 기반한 스마트 스피커 수요가 늘어나면서 마이크로폰 시장도 발전하고 있다. 2017년 MEMS 마이크로폰 시장은 10억 달러 이상을 기록하였고, 2021년은 시장 규모가 20억달러까지 형성될 것으로 예상한다[2]. 시장 수요의 증가에 따라 MEMS 마이크로폰에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.

2015-2021 MEMS market forecast in US\$B

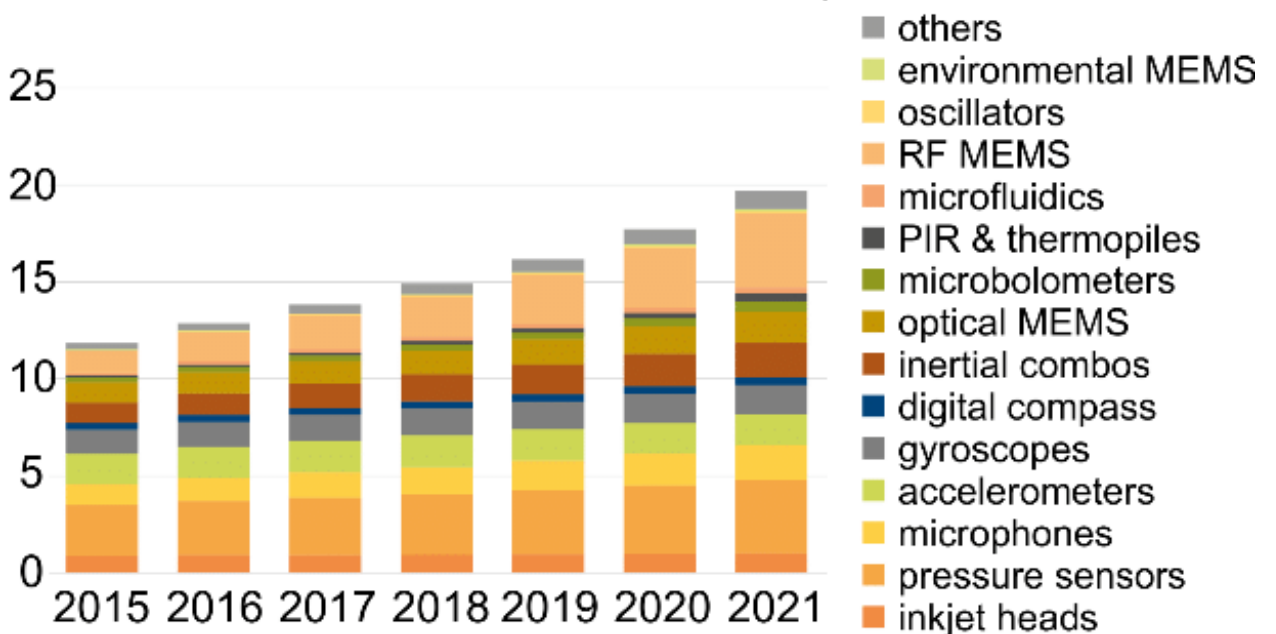


그림 1-1 MEMS 글로벌 시장 추세 [3]

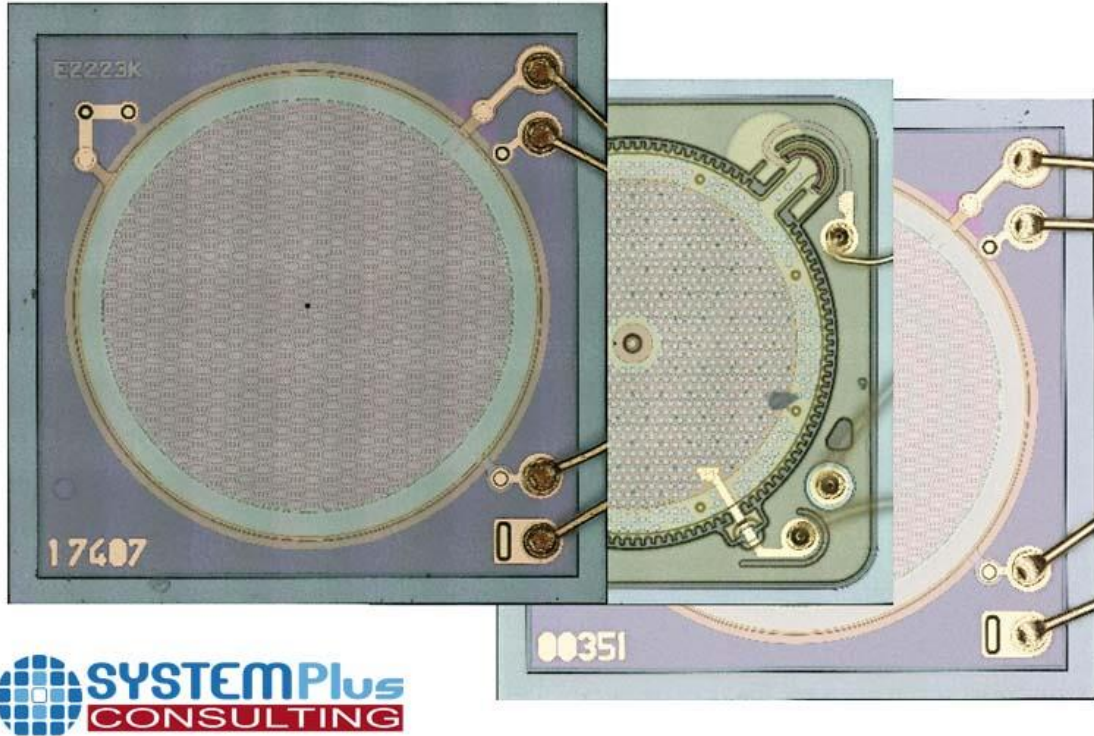


그림 1-2 Iphone X에 들어간 MEMS 마이크로폰 [4]

MEMS 마이크로폰은 주로 정전용량형 (capacitive type), 압전형 (piezoelectric type) 및 압저항형 (piezoresistive type) 감지 방식으로 나뉜다.

정전용량형 감지방식의 마이크로폰의 경우 그림1-3과 같은 형태를 가진다[5]. 두개의 전극 박막으로 구성되며, 박막은 도체특성을 가진 물질로 형성한다. 하부 박막의 경우 압력을 받고 변위가 발생하며 박막의 가장자리에 스프링 구조물을 배치할 수도 있고 압력평형을 위해 뚫힌 구멍을 배치할 수도 있다. 정전용량형 마이크로폰의 감지방식은 이격된 comb구조간의 혹은 두개의 박막 사이의 정전용량변화를 측정하는 방식을 사용한다[6]. 정전용량변화량은 변형에 따라 다르며, 목적하는 변위 및 변형에 따라 comb구조 또는 박막의 크기와 두께를 설계할 수 있다. 그러나 두개의 박막 또는 comb구조간의 이격을 구현하기 위해 웨이퍼를 본딩하는 방식 또는 여러장의 마스크를 사용하는 복잡한 공정이 필요하다[7,8]. 이외의 막박 또는 comb구조간의 일정한 간격을 유지하기 위해 면적을 소형화할 수 없다는 단점이 있다. 수 um 변형이 발생하기 1 pF 기준용량(nomninal capacitance) 변화를

위한 최소박막 크기는 약 700 um by 700 um이다. Comb구조의 경우 박막의 가장자리에 별도의 소자를 배치해야하며 센서를 소형화하는데 제한이 있다.

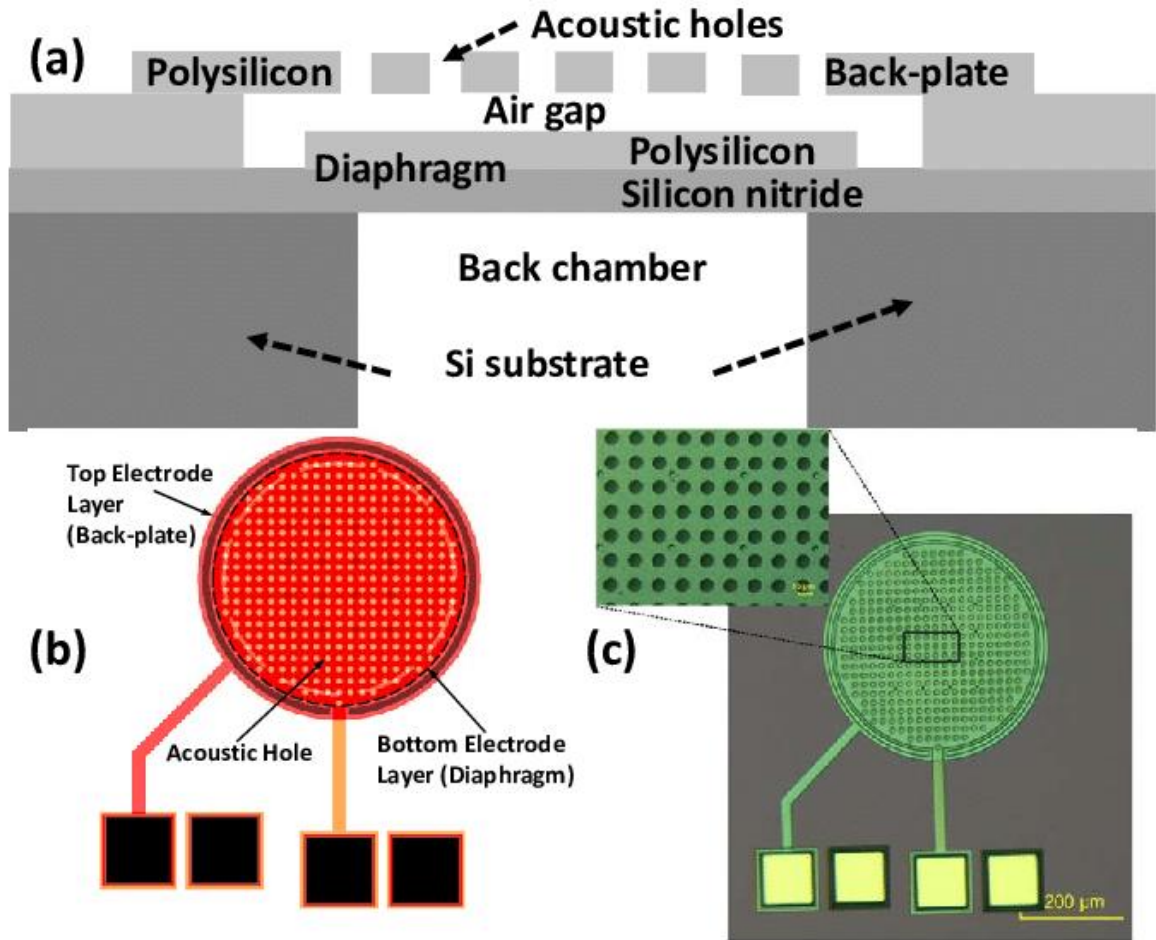


그림 1-3 정전용량형 마이크로폰 예시 [5]

압전형 감지방식의 마이크로폰의 구조는 그림 1-4과 같다 [9]. 실리콘 기판에 절연막을 성형하고 절연막 위에 전극과 AlN(질화알루미늄) 또는 압전 세라믹스 등의 압전물질을 증착한 후 상부 전극을 형성한다. 그후 기판 후면에서 식각을 하여 증착된물질을 포함한 실리콘 박막을 부유시킨다. 압전형 마이크로폰의 감지방식은 압저층이 음압을 받아 전압에 변화가 발생하고 그 전압변화량을 상하부 전극을 통해 외부에 연결된 증폭기에 출력한다. 압전형 마이크로폰은 정전용량형 마이크로폰보다 구조가 간단하고 공정도 간이하지만 저주파 신호 측정에 불안정한 단점이 있다. 또한 압전특성의 한계로 민감도를 향상하려면 멤브레인 크기를 증가해야함으로 소형화가 어렵고

압전특성을 가지면서도 박막형태로 공정이 가능한 물질이 제한적인 단점이 있다.

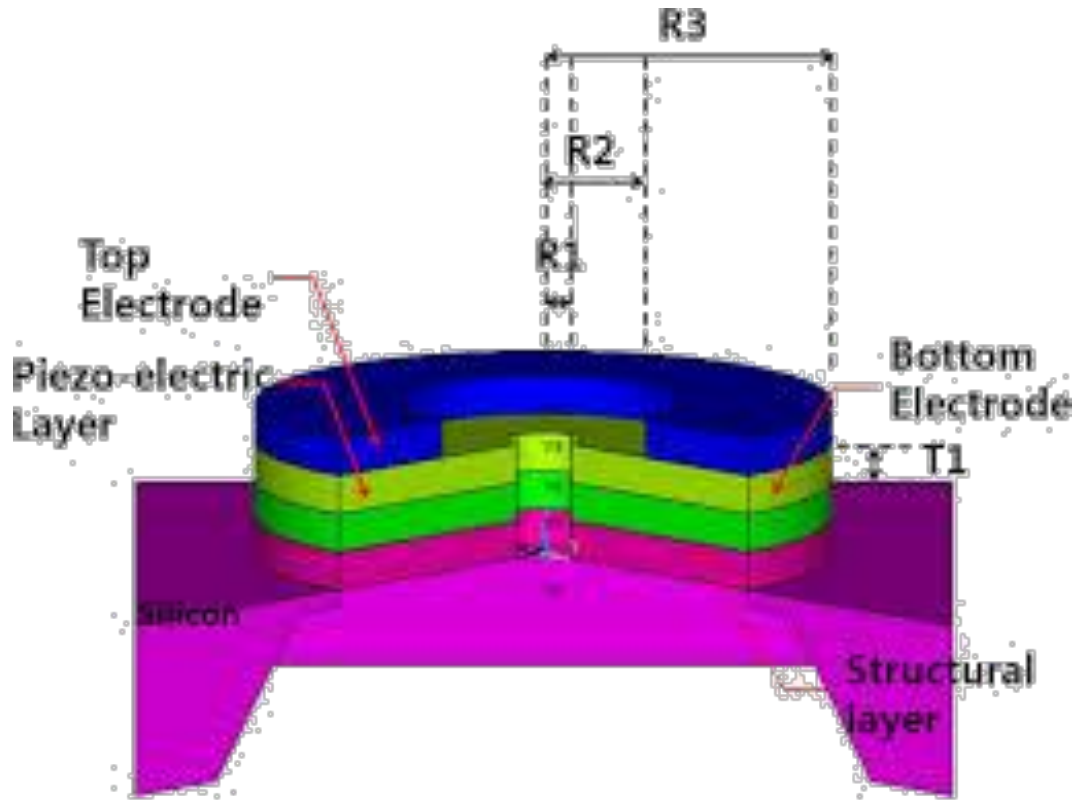


그림 1-4 압전형 마이크로폰 예시 [9]

압저항 감지방식의 마이크로폰의 구조는 그림1-5에서 제시한 바와 같다[10]. 실리콘웨이퍼에서 질화막 또는 산화막으로 박막을 형성하고 그위에 압저항 소자를 형성하거나 도핑하고 메탈을 증착해 전극을 형성한다. 멤브레인 하부에는 식각공정을 통해 캐비티를 형성한다. 압저항형 마이크로폰의 감지방식은 압력이 가해졌을때 발생하는 변위와 스트레스로 인해 압저항 소자의 저항이 변화하고 휘트스톤 브릿지를 이용해 저항변화를 전압변화로 바꾸는 것이다. 압저항 소자를 제작하는 방식에 따라 폴리실리콘(poly-Silicon) 도핑, 베어실리콘(Bare-Silicon) 도핑 및 실리콘 나노와이어 형태로 구분된다. 도핑방식은 센서의 민감도 향상에 제한적이므로 실리콘 나노와이어가 주목을 받게 되었다. 실리콘 나노와이어는 응력집중 효과와 피에조 핀치 효과로 인해 벌크 실리콘보다 부피가 작지만 압저항 효과가 수십배 뛰어나다. 본 연구에서는 우수한 압저항 효과를 가진 실리콘 나노와이어를 호형태의 스프링에 포함시켜 면적을 최소화하면서도 민감도가

높은 MEMS 마이크로폰을 제시하고자 한다.

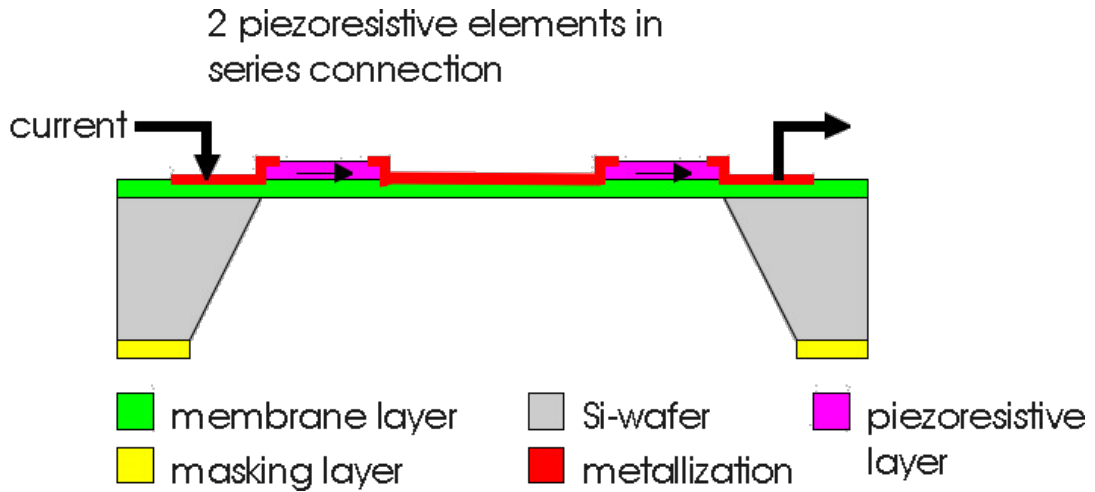


그림 1-5 압저항형 마이크로폰 예시 [10]

제 2 절 연구의 내용

본 논문은 본 연구진이 수행한 스마트센서를 위한 벌크 실리콘 SOLID NEMS 공정 플랫폼 개발(2020.1-2020.8) 과제의 일환으로 진행하였으며 과제 보고의 내용을 상당부분 인용하고 있다. 또한 본 연구진이 참여한 인간중심소프트로봇기술연구센터(2020.1-2020.12) 과제의 압력센서개발 내용도 인용하고 있다. 본 학위 논문의 기여는 마이크로폰 제작 중 공정에 관한 것과 측정결과에 관한 것이다.

상기 과제에서는 호형태 스프링 구조물을 포함하는 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰을 제안하였는데 제안한 MEMS 마이크로폰구조는 멤브레인의 가장자리에 위치한 스프링 구조물을 호형태로 구부려 멤브레인을 둘러싸는 구조로 설계하여 면적을 최소화할 수 있으며, 우수한 압저항 특성을 가진 실리콘 나노와이어를 호형태 스프링 구조물의 최대응력이 발생하는 위치에 배치해 높은 민감도를 확보할 수 있도록 설계하였다. 호형태 스프링 및 실리콘 나노와이어를 통해 타연구진의 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰 연구결과보다 우수하며, 상용 마이크로폰에 준하는 특성을 가진 마이크로폰이 제작될 것으로 기대된다.

상기 과제에서 제안한 MEMS 마이크로폰은 압저항형

마이크로폰으로 후기판이 필요없고 스프링, 멤브레인, 앵커(anchor) 및 캐비티(cavity)로 구성하였으며 실리콘 나노와이어는 스프링 끝부분에 연결하였다. 그 후 본 연구진이 보유한 실리콘 나노와이어 제조 공정 기술을 응용한 공정법을 통해 2~300 nm 급 크기를 가지며 Si₃N₄ 기반 스프링 구조물 및 멤브레인과 함께 부유된 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰을 제작하였다.

본 논문에서는 앞서 언급한 바와 같이 마이크로폰 제작 중 모든 공정에 기여했으며 제작한 마이크로폰에 대해 측정과 분석을 했다. 본 연구진은 마이크로폰 공정 기술을 보유하고 있었지만 본 연구에서 설계한 마이크로폰의 형태와 목표하는 크기, 민감도가 다르며, 전극패드의 크기 및 위치 변경으로 인해 공정진행 중 기존의 장비 레시피를 참고하되 test 공정을 통해 확인하고 상황에 따라 레시피를 개발하여 공정을 진행하였다.

마지막으로 제작된 MEMS 마이크로폰의 성능을 평가하기 위해 측정을 진행하고 감도(sensitivity), 주파수 응답 특성(frequency respons), 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR), 등가입력잡음 (Equivalent Input Noise ; EIN) 등 특성을 분석하였다.

본 논문의 제1장은 서론이며, 제2장은 본론이다. 제2장 1절에서는 실리콘 나노와이어의 압저항 효과와 공정 기술, 본 연구진이 보유한 실리콘 나노와이어 공정 기술에 대해 설명한다. 제2장 2절에서는 제안하는 마이크로폰의 스프링 및 멤브레인과 마이크로폰에 응용한 실리콘 나노와이어, 호형태 스프링 설계에 대해 기술한다. 제2장 3절에서는 실리콘 나노와이어를 포함하는 마이크로폰 공법과 이를 이용하여 제작한 마이크로폰 제작 결과에 대해 설명한다. 제2장 제4절에서는 마이크로폰 소자 및 실험환경 구성과 마이크로폰 특성 평가 방법, 특성평가 결과와 분석에 대해 설명한다. 제3장은 본 연구에 대한 결론과 향후 계획에 대한 설명이다.

제 2 장 본 론

제 1 절 실리콘 나노와이어

정전용량형 센서와 압전형 센서에 대한 연구가 많이 수행되고 있지만 각자 단점이 있다. 정전용량형 감지방식의 센서의 경우 비선형성, nominal cap. 구현을 위한 대면적 필요하다는 단점이 있고 압전형 감지방식 센서의 경우 박막형태 물질이 제한적인 단점이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 최근 압저항 감지방식의 센서가 연구중인데 polysilicon doping같은 제작 방식은 민감도가 제한적이고 민감도를 높이기 위해 소자 크기를 증기시킬 수밖에 없는 문제가 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 실리콘 나노와이어의 압우수한 압저항 특성을 응용한 센서 연구가 수행되고 있다[11].

실리콘 나노와이어는 단면적크기가 수십 내지 수백 마이크로미터인 1차원 구조이다. 벌크 실리콘과 비교하면 실리콘 나노와이어는 압저항 특성이 수십 배 크다는 장점이 있다[12]. 또한 나노와이어는 표면전하효과(surface charge effect)증가와 양자구속효과 (quantum confinement effect), 자기 조립 특성(self-assembly), 응력 완화 특성(stress relaxation), 등 기존의 벌크 소재에서 발견할 수 없는 다양한 특성들이 있다[14].

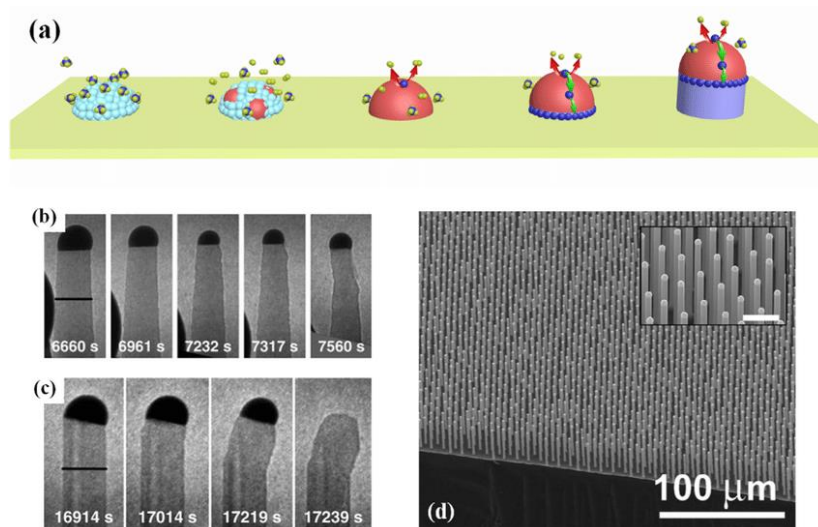


그림 2-1 VLS 메커니즘으로 성장시킨 실리콘 나노와이어 [13]

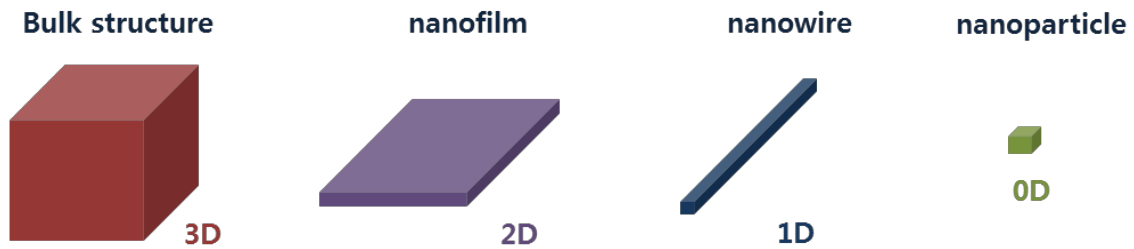


그림 2-2 벌크 구조와 차원 감소에 따른 나노구조의 개념도 [14]

제 1 항 실리콘 나노와이어의 압저항 효과

실리콘 이외에도 신화아연, 백금 나노와이어 등 다양한 물질의 나노와이어를 포함한 센서가 개발되고 있다. 실리콘 나노와이어의 압저항 효과는 압력을 받았을 때 비저항이 변하는 특성을 나타내는 효과다. 2006년 실리콘 나노와이어의 우수한 압저항 효과가 연구된 이후 실리콘 나노와이어가 큰 관심을 받고 있다. 양자구속효과로 실리콘 나노와이어의 압저항 효과를 모델링한 연구와 표면전하 효과로 모델링을 한 연구가 제시된 바 있다 [15-21].

본 연구진은 지난 연구에서 실리콘 나노와이어의 응력집중모델 및 피에조 펀치효과에 대한 모델링 통해 실리콘 나노와이어 특성 예측모델을 제시한 바 있다 [14]. 응력집중효과는 전체 시스템에 가해진 응력 대비 실리콘 나노와이어에 가해진 응력이 커지는 현상을 뜻한다. 응력집중효과는 실리콘 나노와이어의 구조에 의해 영향을 받으며 실리콘 나노와이어의 길이, 단면적 등과 관련이 있다. 피에조 펀치 효과는 응력을 받았을 때 실리콘 나노와이어의 표면전하 분포가 변하게 되며, 이로 인해 표면 공핍 영역의 변화는 나노와이어의 전류 채널의 변화하는 것을 의미한다. 그러나 아직까지는 정확하게 실리콘 나노와이어의 압저항 효과를 설명할 수 있는 모델은 제시되지 않았다.

제 2 항 실리콘 나노와이어의 공정 기술

실리콘 나노와이어 제작방식은 bottom-up 방식과 top-down 방식 두가지로 나뉜다. bottom-up 방식은 vapor-liquid-solid (VLS) 기법으로 대표되며, 금속촉매체를 기반해 실리콘 나노와이어를 성장시키는 방식이다. bottom-up 방식으로 제작된 실리콘 나노와이어는 수 nm 크기로 구현이 가능하나 성장되는

실리콘 나노와이어들 간의 단면적 크기 조절이 어렵다는 점과 실리콘 구조체와의 집적이 부적합하다는 단점이 있다. Top-down 방식의 경우, Thin SOI 웨이퍼 및 E-beam 노광공정을 통해 실리콘 나노와이어를 형성하는 방식이 대표적이다. 그림 2-2 및 2-3을 비교하면, top-down 방식의 경우, bottom-up 방식 대비 실리콘 나노와이어 형성 위치 및 갯수 조절이 가능하다. 그러나 thin SOI 웨이퍼의 device layer 두께로 실리콘 나노와이어의 두께가 한정되며, 공정이 고가이고 느리다는 단점이 있다. 또한, 상기 top-down 방식은 센서 구조체와 통합을 위해서는 별도의 공정이 필요하다.

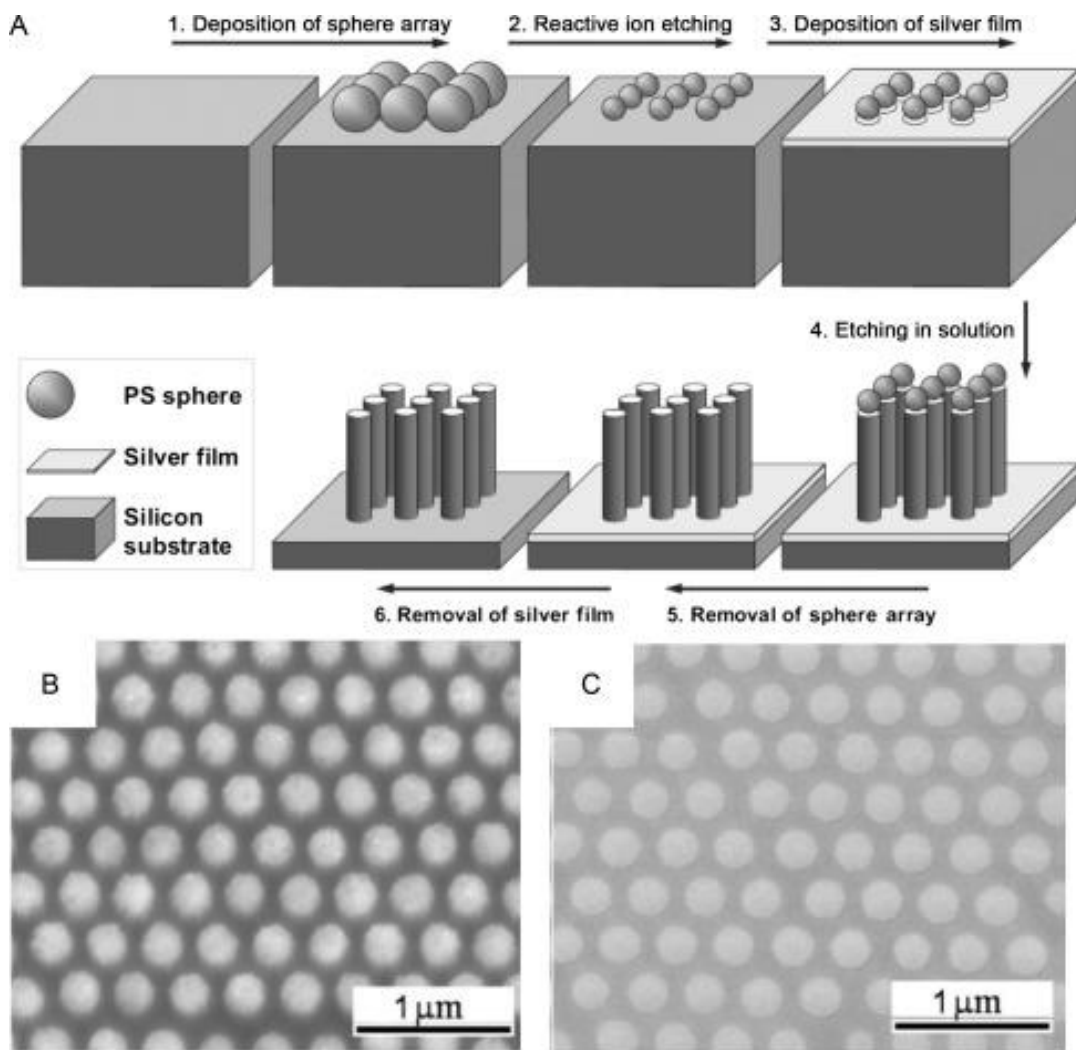


그림 2-3 탑-다운 공정 방식으로 제작된 실리콘 나노와이어[22]

제 3 항 본 연구진이 보유한 실리콘 나노와이어 공정 기술

본 연구에서 사용된 나노와이어 제작 기술은 본 연구진이 보유한 sacrificial bulk micromaching(SBM) 공정법을 응용한 것이다[23-25]. SBM 공정법을 응용해 센서부인 실리콘 나노와이어와 구조체를 동시에 형성할 있으며 공정과정에서 실리콘 나노와이어의 두께와 너비를 각각 조절할 수 있다.

본 연구진이 보유한 실리콘 나노와이어의 공정도는 다음과 같다[14]. 공정은 수십 μm 두께의 디바이스층을 가진 p 타입, (111) SOI 웨이퍼에서 진행된다. 우선 SOI 웨이퍼의 디바이스레이어에 산화막을 증착한다. 이 후 노광공정을 통해 패터닝을 하고 실리콘 산화막 식각공정을 진행한다.(그림 2-4(a)) 다음으로 산화막 패터닝에 따라 실리콘 식각공정을 진행한다.(그림 2-4(b)) 실리콘 식각깊이에 따라 실리콘 나노와이어의 두께에 영향을 받게 된다. 다음으로 열산화공정을 통해 식각된 실리콘의 측면에 산화막을 형성한다.(그림 2-4(c)) 열산화공정 시간에 따라 그림 2-5와 같이 실리콘 나노와이어의 너비를 조절할 수 있으며 실리콘 산화막은 실리콘 나노와이어를 보호할 수 있다. 이어서 실리콘 산화막 건식식각공정을(그림 2-4(d)) 통해 바닥면의 실리콘 산화막을 제거하고 실리콘이 노출되도록 한다. 그 후 다시 실리콘 식각공정을 통해 노출된 실리콘을 제거한다(그림 2-2(e)). 마지막으로 실리콘 습식식각공정을 한다. 실리콘 결정방향에 따라 식각속도가 다른 특성을 이용한 것이다. 습식식각 공정을 통해 실리콘 나노와이어가 형성이 되고 부유되는 형태로 구현이 된다. 습식식각에 사용되는 용액과 공정시간에 따라 나노와이어의 두께조절을 할 수가 있다. 실리콘 습식식각공정이 끝나면 실리콘 나노와이어와 마이크로 스케일 구조체가 동시에 구현이된다. 공정이 완료되고 실리콘 산화막이 필요없는 경우 불산 용액을 활용하여 제거할 수 있다[14].

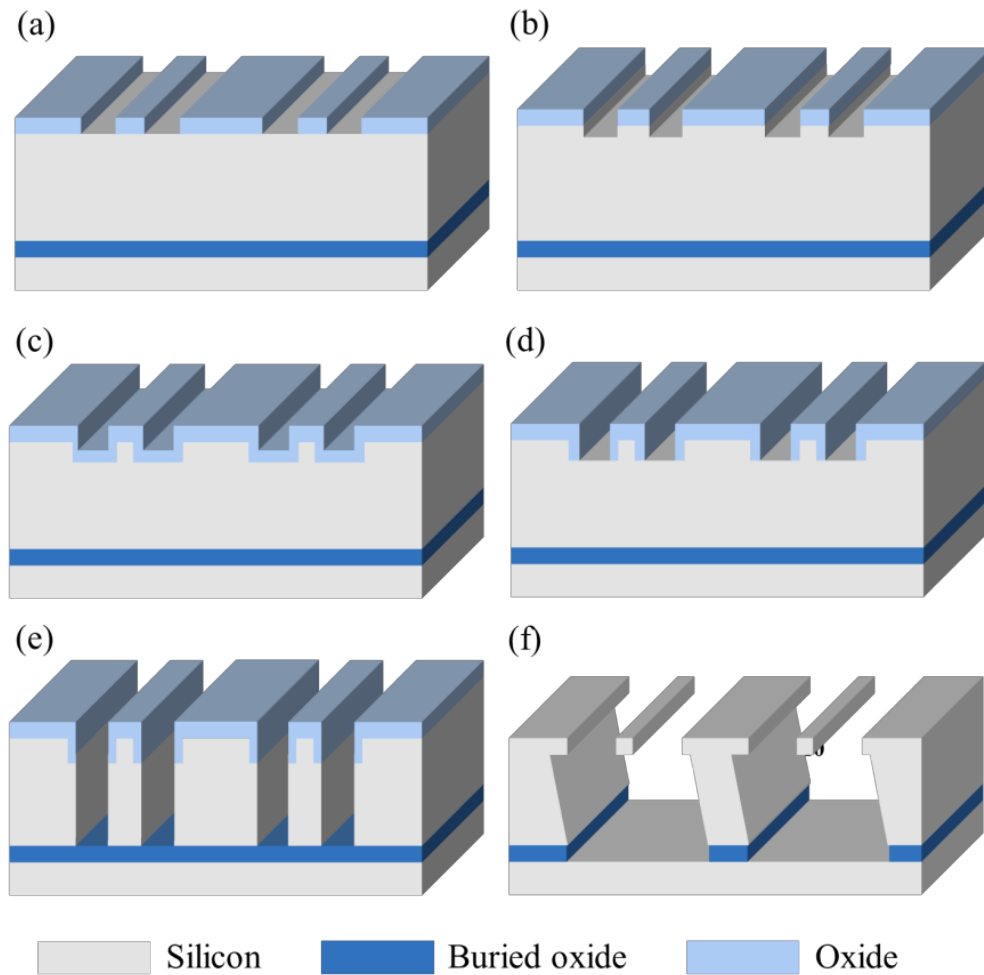


그림 2-4 개발한 실리콘 나노와이어 공법 (a) 산화막 패터닝 (b) 실리콘 건식식각 공정 (c) 열산화 공정 (d) 산화막 건식식각 공정 (e) DRIE 공정 (f) 실리콘 습식식각 및 산화막 제거.
(스케일이 고려되지 않음) [14]

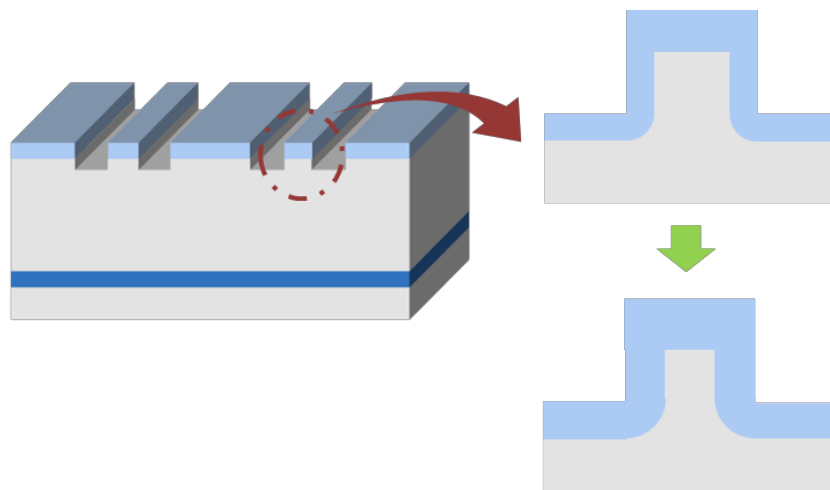


그림 2-5 열산화 공정을 이용한 나노와이어의 너비 조절
(스케일이 고려되지 않음) [14]

제 2 절 마이크로폰 설계

본 연구진이 제안한 MEMS 마이크로폰은 후기판이 없는 멤브레인과 호형태 스프링을 포함하며 실리콘 나노와이어를 센서부로 구성하였다[26]. 멤브레인의 직경은 400um 이며, 스프링을 포함하는 직경은 약 410um다. 스프링은 일직선 형태로 설계후 멤브레인의 둘러싸는 호형태 구조로 설계하였으며 직선형태에서의 스프링 길이는 150um이고 너비는 4um다. 전극 패드의 길이는 150 um x 150 um이며 6개 전극패드를 일렬로 배치하였다[26,30,37].

제 1 항 마이크로폰의 스프링 및 멤브레인

스프링이 없이 멤브레인이 음압을 받아 변위가 발생할 경우 멤브레인의 변위는 매우 제한적이므로 멤브레인 가장자리에 스프링 구조물을 설계하였다. 가장 쉽게 생각할 수 있는 스프링 구조물을 일직선 형태이며 일직선 형태로 설계할 경우 오일러빔으로 모델링을 할 수 있는 장점이 있다.스프링 두개를 180 로 멤브레인 양쪽에 배치를 하게되면 2차모드가 불안정하여 스프링을 세개를 120° C 간격으로 배치하였다. 스프링 디자인의 사진은 그림 2-6와 같다. 전류가 나노와이어를 통해 흐르고 양단에 전극을 통해 측정을 해야되기 때문에 직선 형태를 가지는 스프링 구조물은 두개를 한 쌍으로 설계를 하였다. 설계된 형태의 멤브레인이 음압을 받았을때 멤브레인보다 유연한 스프링 구조물에서 변형이 더 많이 발생하게 된다.

- cut line 시작점
- cut line 끝점

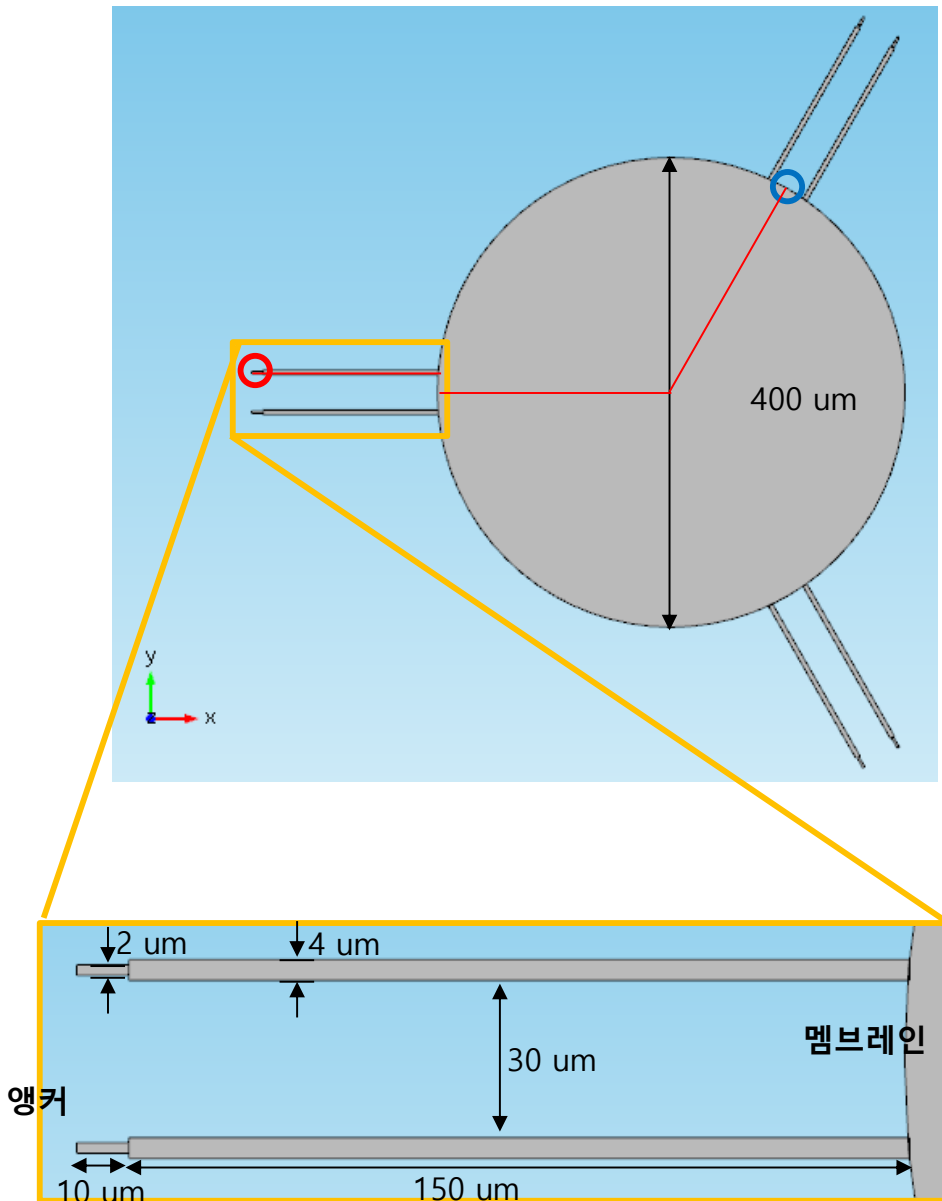


그림 2-6 직선형태 스프링을 포함한 마이크로폰 구조 [26,37]

유한요소법 기반 시뮬레이션을 수행해 모델링으로 1pascal의 음압을 받았을때 발생한 변위 및 스트레스를 분석하였다. 유한요소법 기반 시뮬레이션의 신뢰성을 파악하기 위해 오일러 빔 기반 모델링으로 변위를 계산하였다. 오일러빔 기반 모델링은 표에 정리한 바와 같다. 우선 각각의 스프링에 대해 분석을 하였다. 실리콘 나노와이어를 배치할 스프링 영역의 너비를 좁혀 강성을 낮춤으로써 해당 부분의 displacement를 높이고 stress도 증가할

수 있도록 설계하였기 때문에 스프링 구조물은 정확한 일직선 형태가 아니다. 그후 나노와이어를 배치한 좁은 영역과 나머지 부분의 스프링 구조물에 대해 각각 스프링 상수를 계산하고, 단일 스프링의 토탈 스프링 상수를 계산하였다. 그 후 스프링 개수를 고려하여 3쌍의 스프링에 대해 스프링 상수를 계산하였다. 유한요소법 기반 시뮬레이션을 수행해 모델링한 결과와 시뮬레이션 값을 비교한 결과 스프링은 완벽한 일직선 형태가 아니기 때문에 정확한 모델링은 하기 어려우나 오일러 빔을 이용해 대략적인 모델링을 한 결과 시뮬레이션값과 오더차이가 없어 표에 제시된 시뮬레이션값은 신뢰성이 있다고 판단하였다. 본 연구진의 2019년에 설계한 마이크로폰과 2020년에 설계한 마이크로폰의 오일러빔 기반 스프링 상수 손계산 및 시뮬레이션 값 비교는 다음 표2-1 로 정리하였다.

표 2-1 오일러빔 기반 스프링 상수 손계산 및 시뮬레이션 값 비교

| 스프링 디자인 구분 | 스프링 상수 | | | Total displacement 손계산 값 [um] | Total displacement 시뮬레이션 값 [um] 멤브레인 rigid body |
|---------------|--|-----------|------------------|-------------------------------|--|
| | 활용 수식 | 단일 스프링의 K | 스프링 개수 고려 | | |
| straight beam | $K_1 = \frac{EWH^3}{L^3}, K_2 = \frac{EWH^3}{L^3}$ $K_{total} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}}$ | 4.63 | 27.8 (스프링 3개) | 4.53×10^{-3} | 6.43×10^{-3} |
| Serpentine | $K_3 = \frac{EWH^3}{L^3}, K_4 = \frac{EWH^3}{4L^3}$ $K_{total} = \frac{1}{\frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4}}$ | 35 | 175 (스프링 5개) | 4.04×10^{-4} | 2.73×10^{-4} |

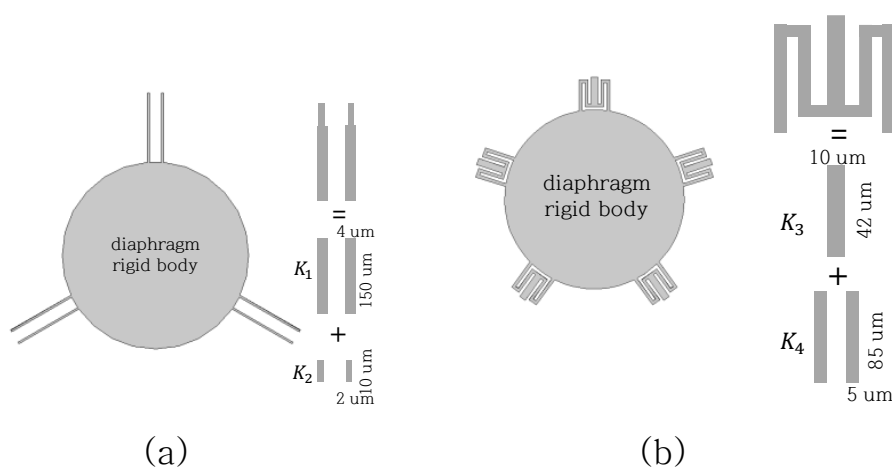


그림 2-7 본 연구진이 설계한 마이크로폰. (a) 2020년 설계, (b) 2019년 설계 [26]

제 2 항 마이크로폰의 실리콘 나노와이어

스프링 구조물의 변형중 최대 응력 지점에 실리콘 나노와이어를 배치하여 게이지의 변화율이 최대가 될 수 있도록 설계하였다. 응력은 그림 2-8 및 그림 2-9와 같이 인장(tension)과 압축(compression) 으로 구분할 수 있으며 응력 종류에 따라 저항 변화량의 극성이 바뀌는 실리콘 나노와이어 특성을 활용하였다[37].

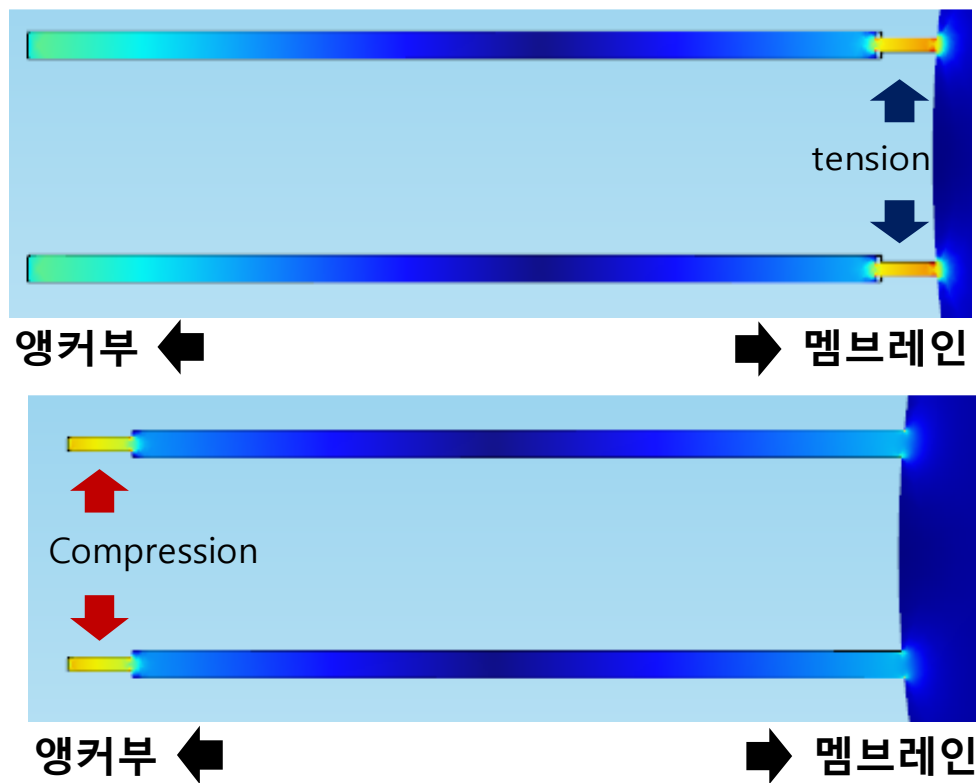


그림 2-8 스프링 구조물에서 최대 인장발생 지점 및 최대 압축발생 지점 [26]

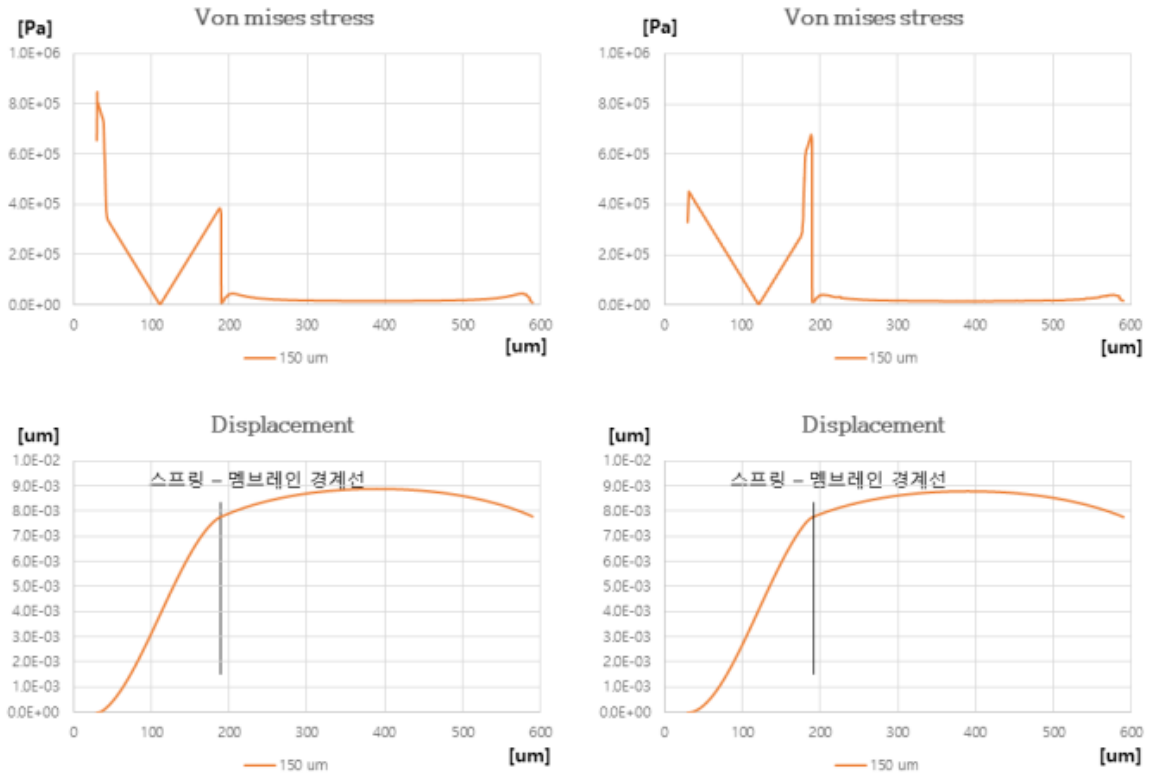


그림 2-9 SiNW가 compression(좌) 및 tension(우) stress를 받는 디자인에 따른 von-mises stress 및 displacement 분포 그래프 [26]

설계된 나노와이어의 길이는 15um이며 너비는 2um다. 음압측정 결과가 수 볼트가 나오려면 수키로옴의 저항 변화량이 발생해야됩니다. 본 연구진이 개발한 연구진이 개발한 실리콘 나노와이어 압저항 모델링으로 실리콘 나노와이어 크기별로 발생한 스트레스에 따른 저항변화율 데이터를 확보할 수 있다[14].

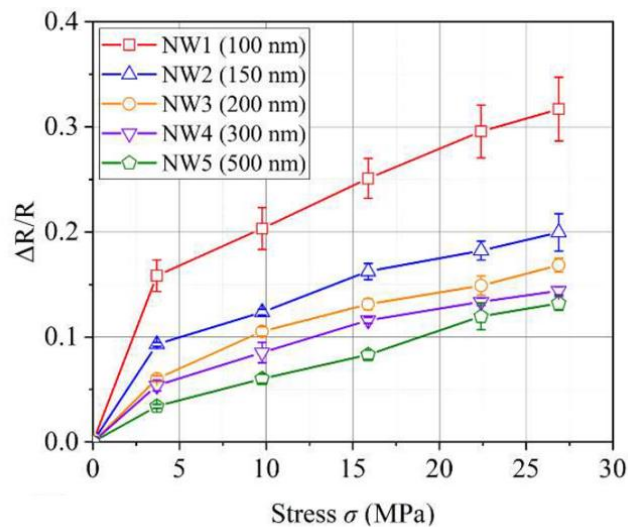


그림 2-10 실리콘 나노와이어 압저항 모델 [14]

압저항 모델 그래프를 참고하면 실리콘 나노와이어 크기별로 발생한 stress에 따른 저항변화율 데이터를 확보하여 표 2-2에 정리하였다. 단 그래프에서 3MPa 이하의 stress에 대해서는 보간법으로 유추하였다. 실리콘 나노와이어의 nominal 저항은 SOI 웨이퍼의 device layer 비저항인 0.02 Ωcm 이며, 크기별로 계산했을 때 표 [2-2]과 같다. 성능평가의 기준이 되는 94dBspl에서는 0.81 Mpa 수준의 stress가 발생하면서 모델링 표로 환산하면 실리콘 나노와이어의 크기에 따라 0.4 키로옴에서 10 키로옴까지 저항 변화량이 발생할 것으로 예측된다. 따라서 나노와이어의 크기를 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 및 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 공정이 진행되는 과정에서 발생하는 오차로 인해 나노와이어의 크기가 정확히 설계치랑 같게 형성되지 않을 것으로 예상되지만 수십 μm 오차가 발생해도 목표하는 수 볼트의 측정결과가 나올 것으로 예상된다.

표 2-2 음압별 SiNW 기반 마이크로폰 저항변화량 예측정리

| 음압 [dBspl] | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 94 | 100 | 110 | 120 | |
|--------------|--------------------------|--------|---------|---------|--------|-----------|--------------|--------|-------|-------|
| 음압 [Pa] | 0.0063 | 0.02 | 0.0632 | 0.2 | 0.632 | 1 | 2 | 6.32 | 20 | |
| stress [MPa] | 0.0051 | 0.0166 | 0.051 | 0.166 | 0.51 | 0.81 | 1.64 | 5.05 | 16.44 | |
| 100 nm | ΔR [k Ω] | 65 | 213 | 655 | 2132 | 6549 | 10402 | 21060 | 50506 | 76424 |
| | $\Delta R/R_0$ | 0.0002 | 0.0007 | 0.0022 | 0.007 | 0.022 | 0.035 | 0.07 | 0.17 | 0.25 |
| 200 nm | ΔR [k Ω] | 6 | 20 | 62 | 203 | 622 | 988 | 2001 | 5267 | 9952 |
| | $\Delta R/R_0$ | 0.0001 | 0.00027 | 0.00083 | 0.0027 | 0.0083 | 0.013 | 0.027 | 0.070 | 0.13 |
| 300 nm | ΔR [k Ω] | 2 | 8 | 25 | 80 | 247 | 392 | 794 | 2024 | 3914 |
| | $\Delta R/R_0$ | 0.0001 | 0.0002 | 0.0007 | 0.0024 | 0.0074 | 0.0118 | 0.0238 | 0.061 | 0.12 |

제 3 항 호형태 스프링 설계

면적을 최소화 하기 위해 직선형태로 설계된 스프링 구조물을 호형태로 구부렸다. 설계된 호형태의 스프링 구조물 기반 마이크로폰 형상은 그림 2-11와 같다. 스프링 형태를 호형태로 변형함으로써 음압을 받았을 때 나노와이어를 배치하는 부분의 displacement 및 stress가 직선형태 스프링에 비해 얼마나 차이가 나는지 분석하기 위해 유한요소법 기반 시뮬레이션을 진행했다. 직선형 스프링과 호형태 스프링의 시뮬레이션 결과는 유사하였으므로 스프링을 구부리는 설계는 면적을 최소화하면서도 우수한 성능은 유지할 수 있었다.

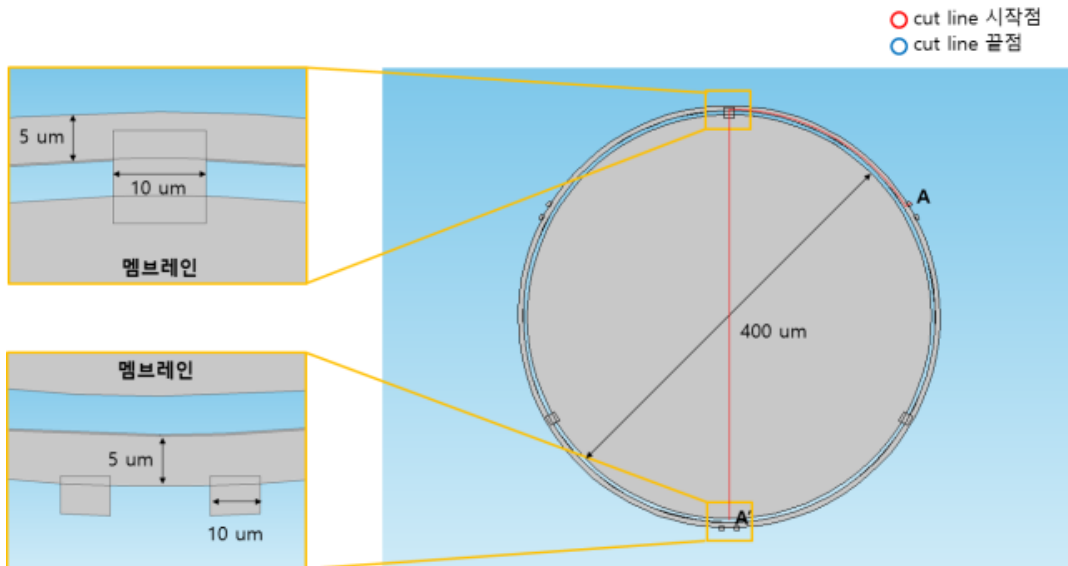


그림 2-11 호형태의 스프링 구조물 기반 마이크로폰
형상[26]

그림 2-12 미 그림 2-13과 같이 시뮬레이션 분석을 통해 호형태 스프링 구조물 기반 마이크로폰 구조물 dimension 확립하였다. 멤브레인 직경은 400 μm 으로 유지하고 SiNW가 형성될 부분은 $15 \times 3 \mu\text{m}^2$, 실리콘 구조물이 형성될 부분은 $210 \times 3 \mu\text{m}^2$ 이며 , 스프링 및 멤브레인 두께는 2.5 μm 으로 직선형태와 동일하다.

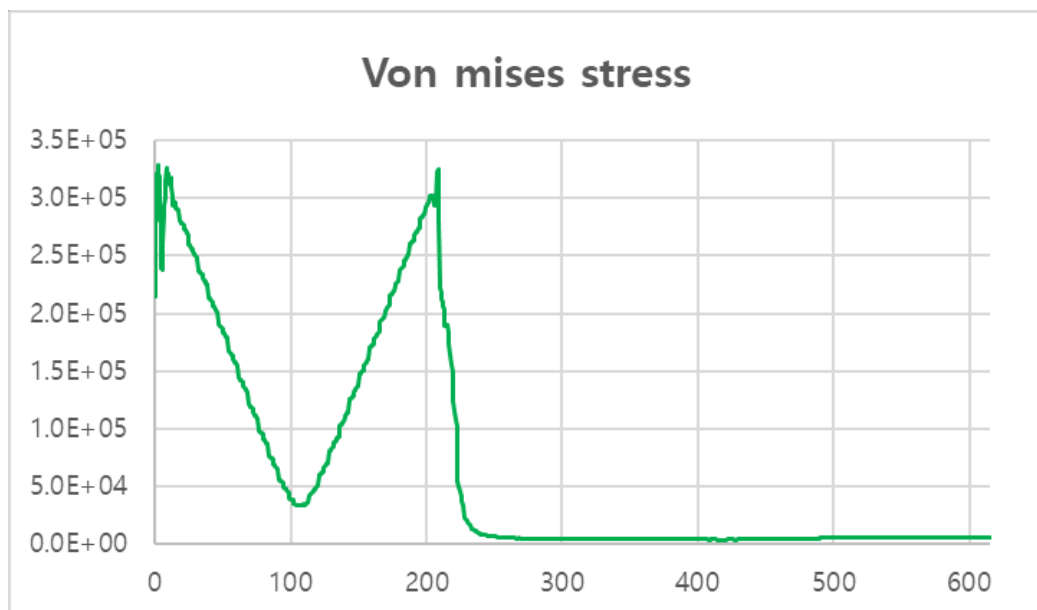


그림 2-12 구간 A-A' 에서의 von-mises stress
그래프[26]

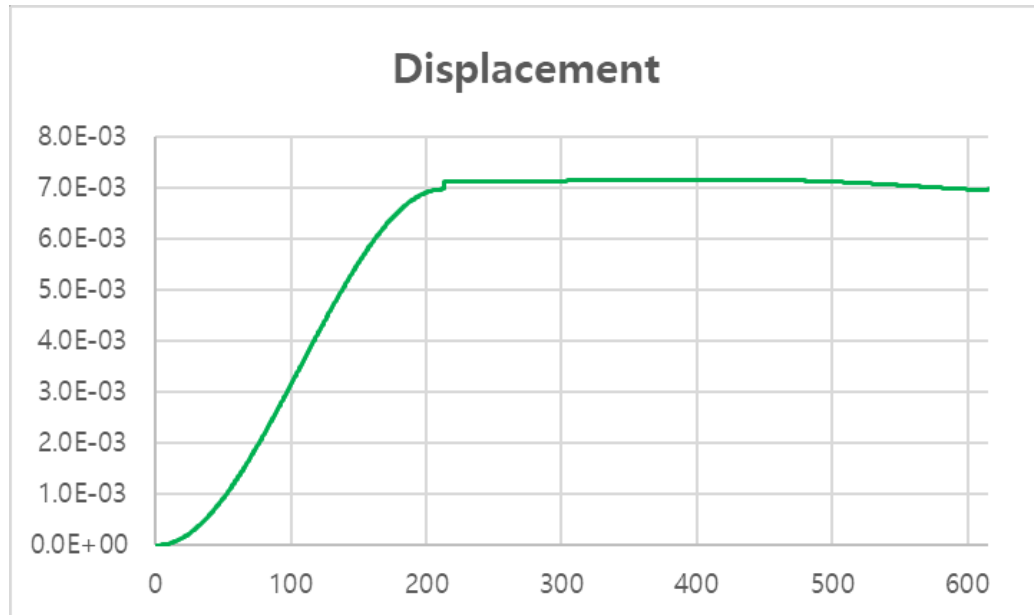


그림 2-13 구간 A-A' 에서의 displacement 그래프 [26]

최종적으로 전극 및 절연까지를 포함하는 호형태 스프링 구조물 기반 마이크로폰의 상세도면은 다음 그림 2-14 과 같다. 설계된 MEMS 마이크로폰은 호형태를 가지며, 멤브레인과 일정간격을 유지하며 구현된 스프링 양단 또는 중앙에는 실리콘 나노와이어가 배치되어 있다.

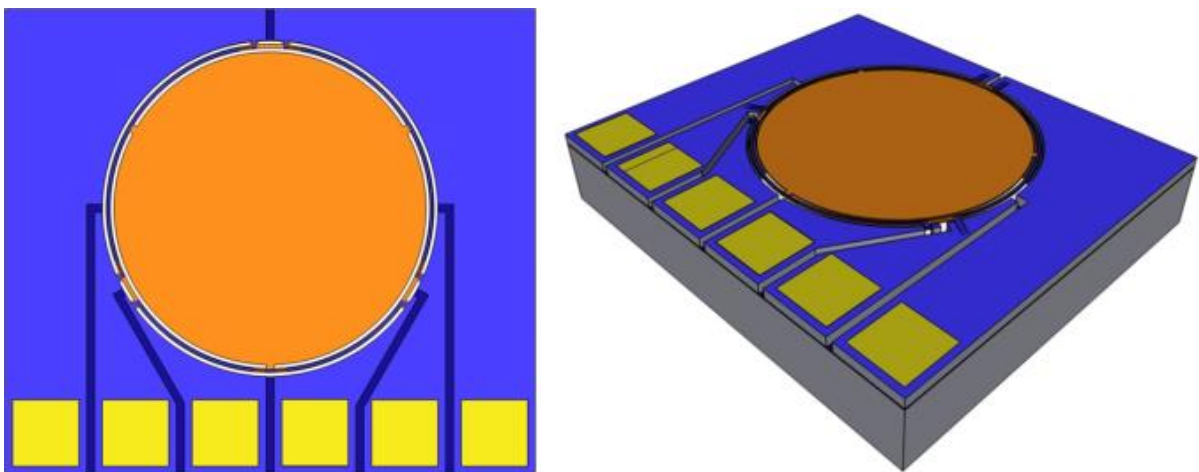


그림 2-14 호형태 스프링 구조물 기반 마이크로폰 schematic [26]

제 3 절 마이크로폰 공법

제 1 항 실리콘 나노와이어를 포함하는 마이크로폰 공법

노광횟수는 MEMS 마이크로폰 공정법의 난이도를 판단하는 기준 중이 하나인데, 노광횟수가 적을 수록 공정이 용이하다. 마이크로폰 개발사 중 Knowles 社의 경우 12 회, Infineon 社 10 회로 노광횟수가 상당히 많다[27]. 그러나 본 연구진은 기존에 보유한 sacrificial bulk micromaching (SBM) [28-29] 공정법을 응용하여 새로운 마이크로폰 공정법을 개발 한 바 있다[30]. 개발한 마이크로폰 공정은 그림 2-15 에서 제시한 것처럼 노광횟수가 4 회로 공정이 간소화 됐다[36]. 또한 공정에 사용되는 웨이퍼는 Thin SOI 웨이퍼가 아니므로 공정비용을 줄일 수 있다[31].

본 연구에서 마이크로폰 제작에 사용한 웨이퍼는 MEMC 社 p 타입, (111)6 inch SOI 웨이퍼다. BOX 레이어 두께는 2um 이며, 디바이스층은 65um, 주실리콘기판층은 400um 이다. 첫 번째 마스크는 멤브레인 직경 및 스프링과 나노와이어의 길이를 결정하는 역할을 한다. 두 번째 마스크는 절연 역할을 하며 스프링이 정의가 된다. 세 번째 마스크는 전극 패드를 형성하는데 쓰인다. 네번째 마스크는 웨이퍼 뒷면 캐비티를 형성하는 역할을 한다. 그 중 세번째 전극 패턴을 정의하는 마스크는 마이크로폰 제작 공정에서 두 번 사용이 된다. 한 번만 사용해도 되지만 메탈 증착후 전극 패드 이외의 부분에 쌓인 메탈을 깨끗이 제거하기 위해 실리콘 질화막 및 실리콘 산화막 건식식각 공정후 감광제를 제거하고 다시 얇은 마스크를 이용해 노광공정을 진행한다[26,36].

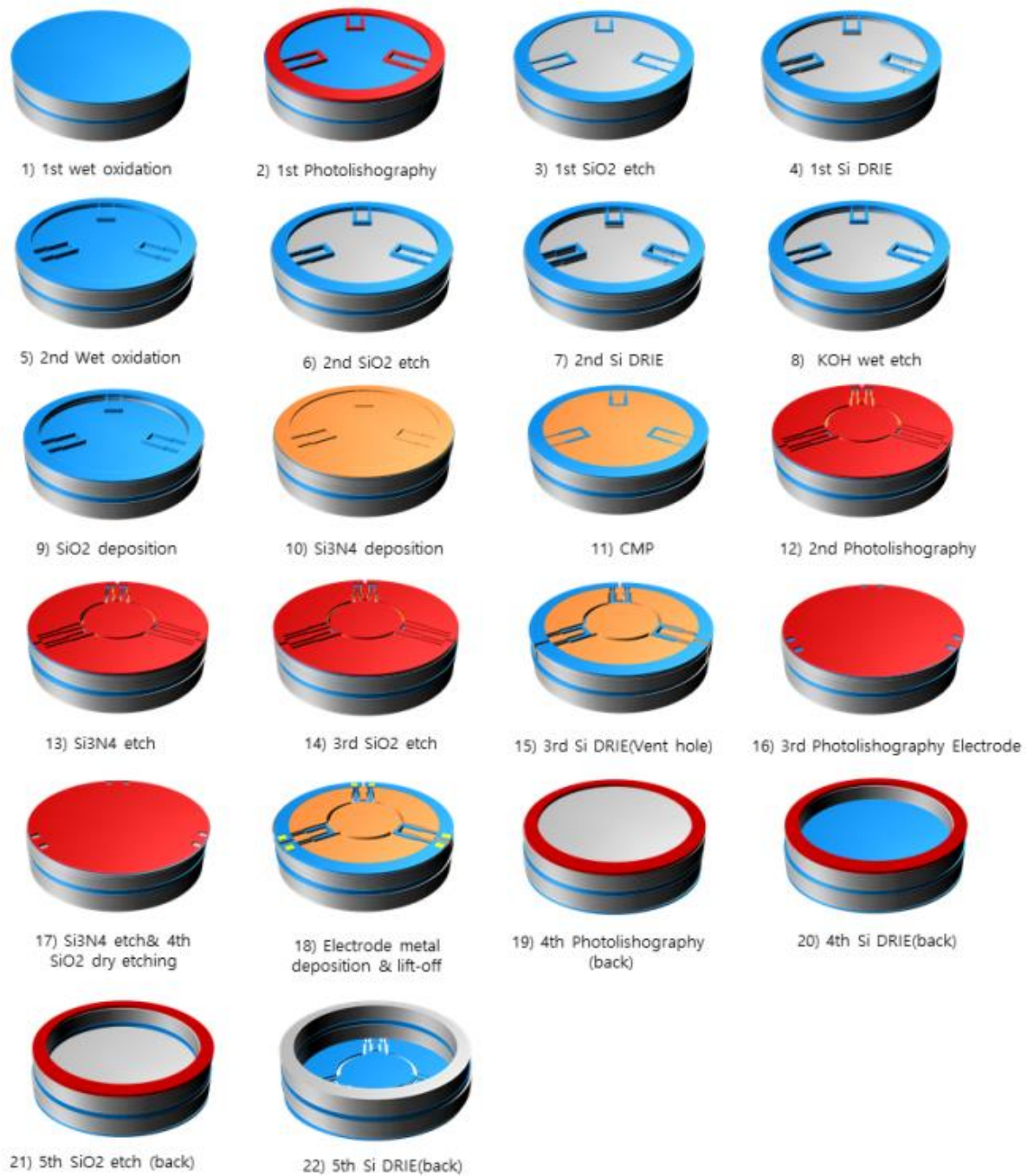


그림 2-15 실리콘 나노와이어를 포함하는 스프링 구조물 기반 NEMS 마이크로폰 공정도[26]

나노와이어의 형성 단계는 그림 2-16와 같다. 전체 공정 중 첫 번째 단계부터 여덟 번째 단계가 나노와이어의 형성과정을 포함하는 단계다. 후속 공정에 필요한 디바이스 레이어의 두께는 10 μ m이내이며 CMP(chemical-mechanical planarization) 공정을 통해 웨이퍼의 두께를 줄인후 클리닝을 진행한다. 다음으로 실리콘

산화막을 증착하고 첫 번째 마스크로 노광 공정을 진행해 패터닝을 한다. 그 후 실리콘 산화막을 식각한다. 실리콘 레이어가 드러날때까지 실리콘 산화막 식각을 진행하고 이어서 실리콘 건식식각 공정을 진행한다. 이 과정에서 실리콘스프링 구조물의 형태와 나노와이어의 길이가 결정이 된다. 실리콘 건식식각 공정까지 진행완료되면 감광제를 제거한다.

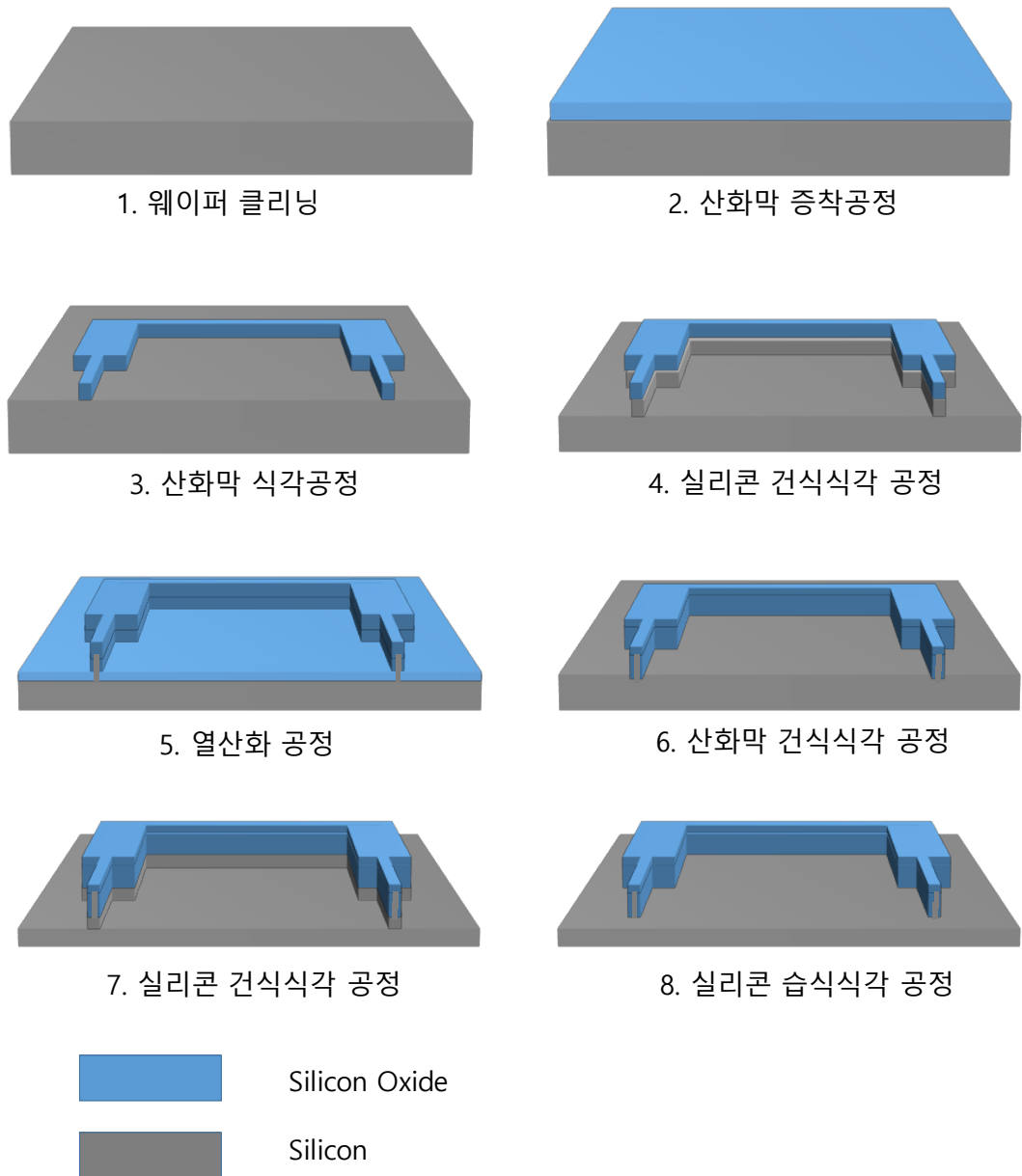


그림 2-16 마이크로폰 공정 중 실리콘 나노와이어 형성 과정

다음으로 습식산화 공정을 진행한다. 습식산화 공정은 실리콘 나노와이어의 너비를 결정하는 단계로 공정 시간을 늘릴수록 실리콘 나노와이어의 너비가 작아진다. 실리콘 습식산화 공정후 나노와이어의 윗면 및 측면에 산화막이 둘러싸이게 되는데 이는 이후 습식식각 공정에서 실리콘 나노와이어를 보고하는 역할을 한다. 다음으로 멤브레인에 쌓인 실리콘 산화막을 제거하기 위해 실리콘 산화막 건식식각 공정을 한다. 이어서 2차 실리콘 건식식각공정을 진행한다. 마지막으로 KOH (22.5wt%, 85° C)와 같은 알칼리 용액을 사용해 습식식각 공정을 진행한다. 습식식각공정은 실리콘 결정방향에 따라 실리콘의 식각 속도가 다른 특성을 이용한 것이다. 습식식각은 사용하는 용액과 농도 및 시간에 따라 실리콘 나노와이어의 두께를 조절 할 수 있다. 습식식각 공정이 끝나면 실리콘 나노와이어와 스프링 구조물은 부유된다.

실리콘 나노와이어 형성 후 실리콘 산화막을 증착하여 진동막 부분에 얇은 실리콘 산화막을 증착한다. 그 후 실리콘 질화막을 증착한다. 실리콘 질화막을 증착하기전에 실리콘 산화막을 증착하는 이유는 이후 마지막 공정인 웨이퍼 후면 실리콘 식각 공정으로 진동막 밑부분에 존재하는 실리콘을 식각할 때 진동막의 실리콘 질화막을 보호하기 위한 보호막을 형성하기 위함이다. 이어서 절연부분을 형성하기 위해 두번째 마스크를 이용해 노광공정을 진행한다. 노광공정 완료후 실리콘 질화막 건식식각 공정 및 실리콘 산화막 건식식각 공정을 진행한다. 그후 실리콘 DRIE 공정을 통해 실리콘 레이어를 BOX층이 드러날 때까지 진행한다. DRIE 공정이 완료하면 절연부분이 형성이 되며 아세톤으로 감광제를 제거한다. 그 후 전극 패드를 형성하기 위해 세번째 마스크를 사용한다. 마스크를 이용해 포토 공정을 진행한 다음 실리콘 질화막을 ICP 건식식각 방식으로 식각한다. 이어서 실리콘 산화막도 ICP 건식식각 방식으로 식각한다. 전극 패드는 실리콘과 연결되어 전기적 연결이 되어야하므로 실리콘 산화막을 충분히 식각하여 실리콘 층이 드러나도록 한다. 이후 아세톤으로 기존의 감광제를 제거하고 다시 세번째 마스크를 이용해 노광공정을 진행한다.실리콘 층이 드러나면 전자빔증발법(e-gun evaporation)을 이용하여 Ti을 증착하고 Al을 증착한다. 메탈 증착후 아세톤에 수 시간 웨이퍼를 담궈 전극패드 이외의 부분에 증착된 Ti 및 Al을 제거한다. 전극

공정은 웨이퍼 앞면에 진행하는 마지막 공정이다.

이후 웨이퍼를 뒤집어 주실리콘기판에서 cavity를 형성한다. 우선 CMP 공정을 통해 주실리콘기판 층의 두께를 350um로 줄인다. 이후 네번째 마스크를 이요해 노광공정을 진행한다. 네번째 마스크는 캐비티가 형성되는 부분의 크기를 결정한다. 남은 마이크로폰 캐비티 부분을 패터닝하는 것으로 마이크로폰 캐비티의 단면의 면적이 결정된다. 앞면에서 실리콘나노와이어 및 스프링을 형성한 뒤 후면 캐비티를 형성하는 것이므로, 노광공정 진행할 때 앞면의 구조물과 위치가 일치 할 수 있도록 align을 맞추는 것이 중요하다. 노광공정후, 실리콘 DRIE 공정을 통해 BOX층까지 실리콘을 식각한다. 이 과정에서 웨이퍼 관통을 방지하고자 필름을 부착하는데 , 실리콘 산화막 식각시 웨이퍼 아세톤으로 필름을 제거하면서 패터닝을 한 감광제도 제거가 된다. 노광패턴이 없이 BOX층 실리콘 산화막 식각공정을 진행하고 마지막으로 멤브레인 밑부분에 존재하는 실리콘 레이어를 건식식각 공정을 통해 제거한다.

제 2 항 마이크로폰 제작결과

공정은 22 개 단계가 포함된다. 첫번째 단계를 진행하기전 디바이스 레이어를 10um 로 줄이기 위해 CMP 를 진행한다. 프리엠텍社에서 CMP 를 진행한 결과 디바이스 레이어의 두께가 약 7um 로 줄었다.

CMP 진행후, 웨이퍼 클리닝을 한다. 클리닝이 완료되면 첫 번째 단계인 1 차 습식산화 공정을 진행한다. 1 차 습식산화 공정은 한국 나노종합기술원 LPCVD 장비(제조사: CENTRO THERM 社, 모델명:E1550) 를 사용하여 진행하였다. 성장속도는 10 Å/sec 이며, 공정은 60 초 진행하였고, 공정결과 600nm 가 성장되었다.

두 번째 단계는 1 차 노광공정이다. 1 차노광 공정을 한국나노기술원 KrF stepper (제조사:ASML 社,모델명: PAS5500) 를 사용하여 진행하였다. KrF stepper 를 사용하면 최소선폭이 500nm 으로 패턴 형성이 가능하며, 실리콘 나노와이어를 구현하려면 500nm 패턴이 필요하여 해당 장비를 하용하였다. 공정시 우선 pr coating 을 진행하고, 노광공정 진행후, 현상액에서

도포한 다음 washing 을 진행한다. 공정중 사용한 감광제는 KrF stepper 전용 감광제인 dow 0.84 를사용하였다. 현상액은 AZ 300 MIF 를 사용하여 진행하였다. 노광 에너지는 30 ml/cm2 로 설정하고, 웨이퍼 표면으로부터 0 um 로 노광 초점은 설정하고 공정을 진행하였다.

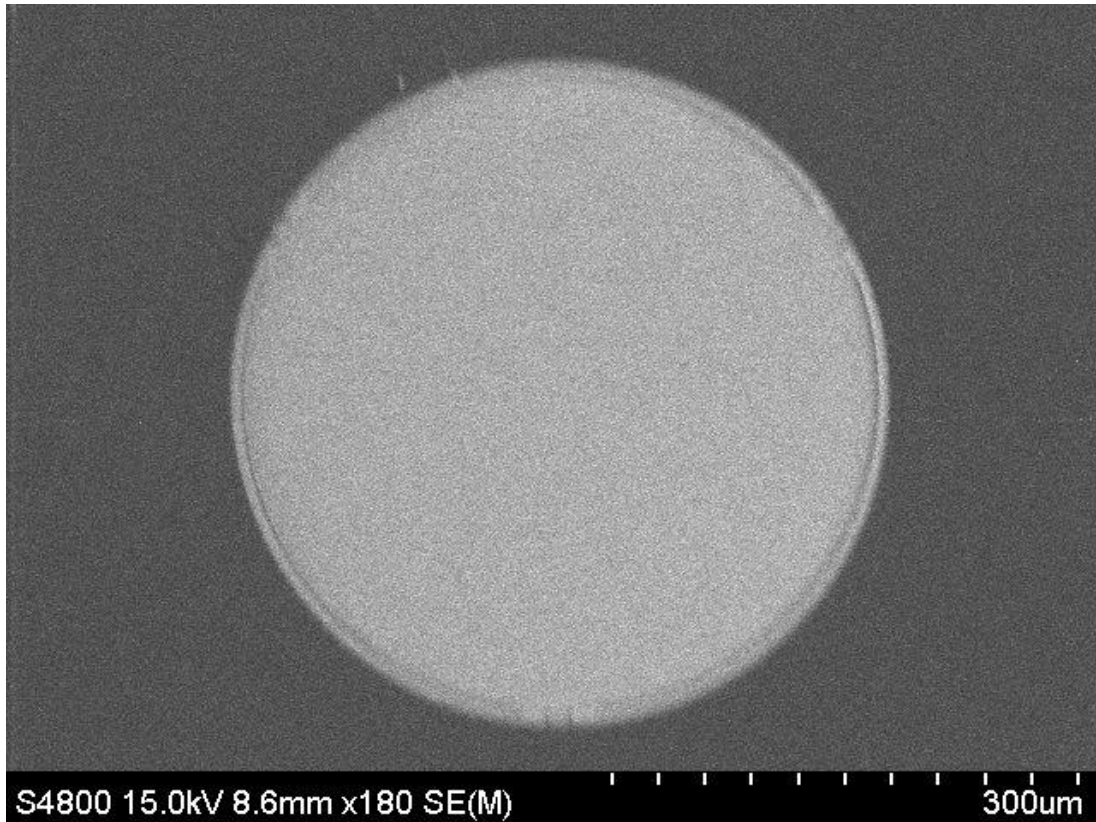


그림 2-17 1 차 photolithography 공정후 멤브레인 부분[26]

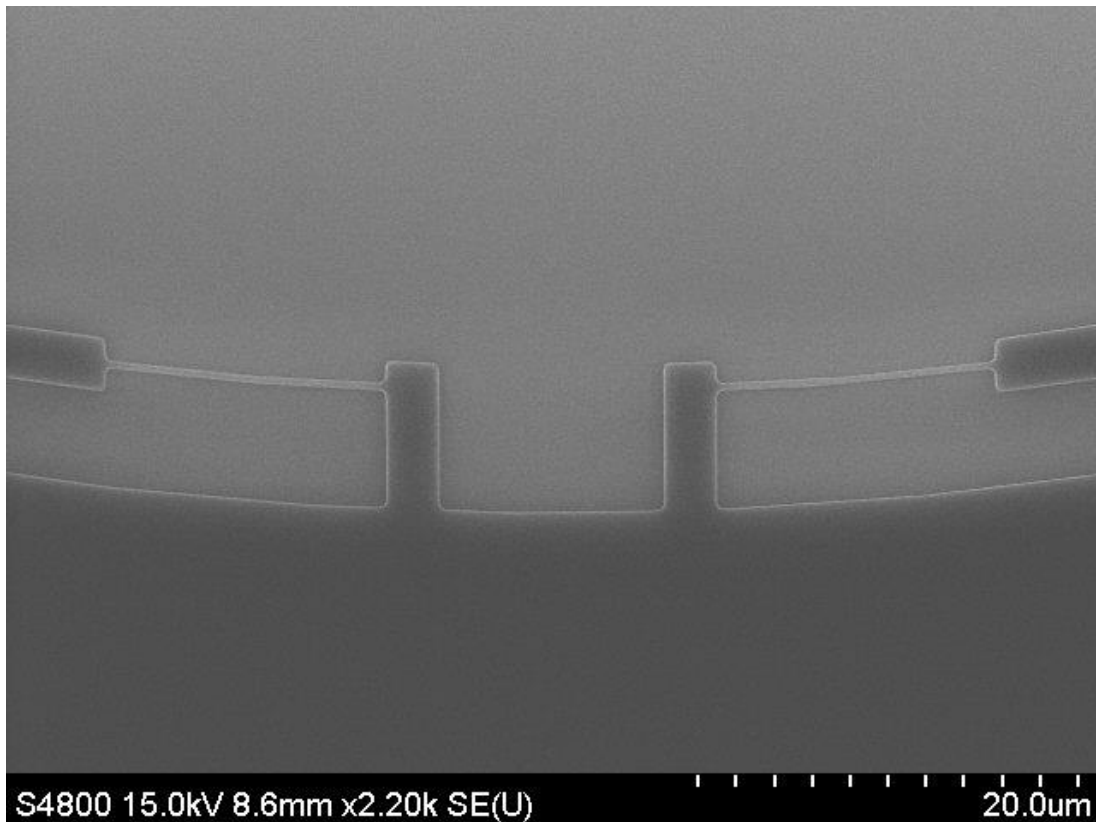


그림 2-18 1 차 photolithography 공정후 스프링 및 나노와이어 부분[26]

세 번째 단계는 1 차 산화막 건식식각 공정이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher 장비를 (모델명/제작 회사: NeoS-MAXIS 200L/기가레인 社) 사용하여 공정을 진행하였다. 우선 test 공정을 통해 설계된 마이크로폰 멤브레인 패턴 크기에서의 식각속도를 구했다. Test 공정 결과 식각속도는 $3,100 \text{ \AA}/\text{min}$ 이며 완전히 산화막을 제거하기 위해 10% overetch 를 하여 128 초 식각공정을 진행하였다. 공정 결과 실리콘 산화막이 완전히 식각이 되었으며 디바이스 레이어가 드러난 것을 확인하기위해 추가 식각공정을 진행하였는데 30nm Si 이 식각된 것으로 측정되었다. 공정 결과는 다음 그림 2-19 과 같다.

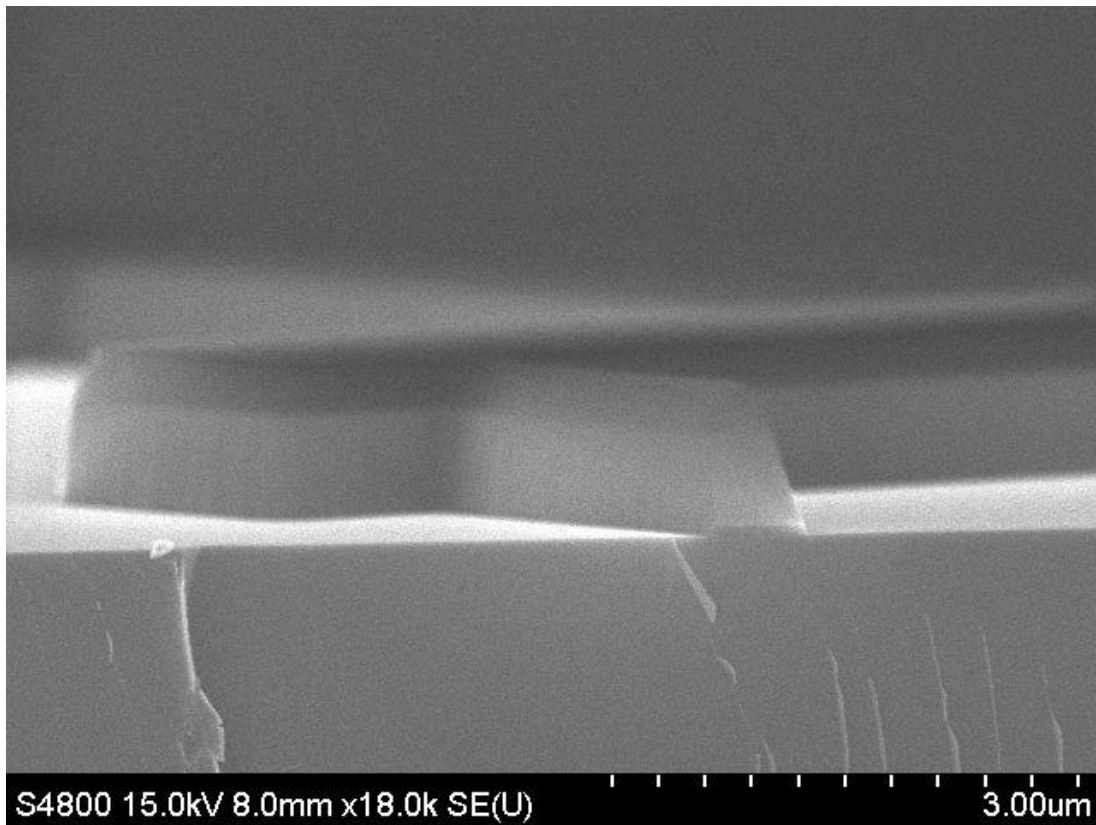


그림 2-19 1 차 SiO₂ dry etch 공정결과[26]

네 번째 단계는 1 차 실리콘 식각공정이다. 한국 나노기술원 ICP etcher IV 장비 (모델명/ 제작회사 Multiplex ICP/ STS 社)를 이용하여 공정을 진행하였다. Test 공정을 진행해 마이크로폰 패턴에서의 식각속도는 250 nm/loop 인 것으로 확인되었다. 이는 실리콘 나노와이어의 두께 구현을 위한 단계이며 공정 결과 500nm 식각된것을 확인하였다

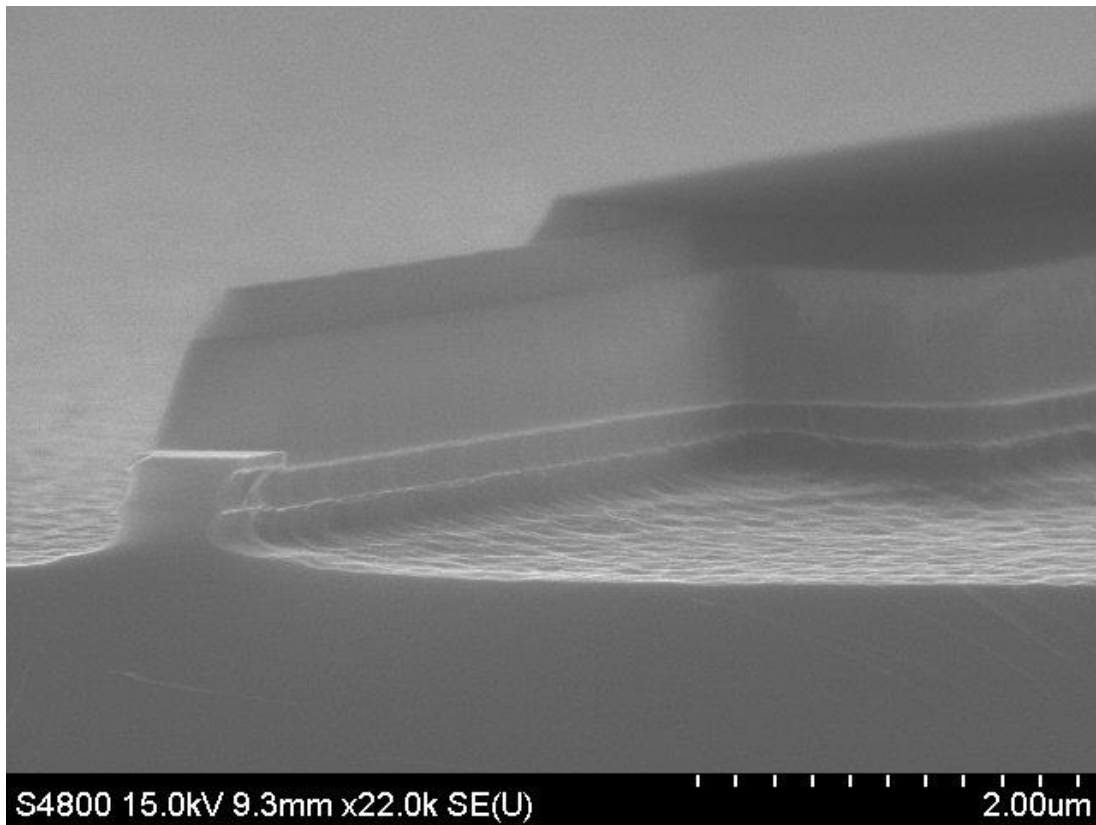


그림 2-20 1 차 Si etch 공정결과[26]

이 후 나노종합기술원 LPCVD 장비의 wet oxidation 조건을 사용하여 2 차 thermal wet oxidation 을 진행하였다. 실리콘 나노와이어 구조물 칼럼 sidewall 기준으로 200 nm thermal oxide 가 성장될 수 있도록 5 분 wet oxidation 진행하였다. 다른 구조물이 300 nm 만큼 oxidation 되는 동안 실리콘 나노와이어 구조물의 sidewall 에서는 200 nm oxidation 이 진행되어, 그림 2-21 와 같이 목적하는 SiNW 너비인 250 nm 구현되었다.

여섯 번째 공정은 2 차 실리콘 산화막 건식식각이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher 장비 (모델명/제작 회사: NeoS-MAXIS df200L/기가레인 社)를 사용하여 2 차 실리콘 산화막 건식식각 공정을 진행하였다. 1 차 실리콘 산화막 건식식각 공정에서 test 공정을 통해 획득한 3,100 Å/min 식각속도를 기준으로 250nm 실리콘 산화막을 식각하기 위해 53 초 공정을 진행하였다. 공정 결과는 Nano-spec 장비를 이용해 확인하였으며 250nm 실리콘 산화막이 모두 식각됨을 확인하였다.

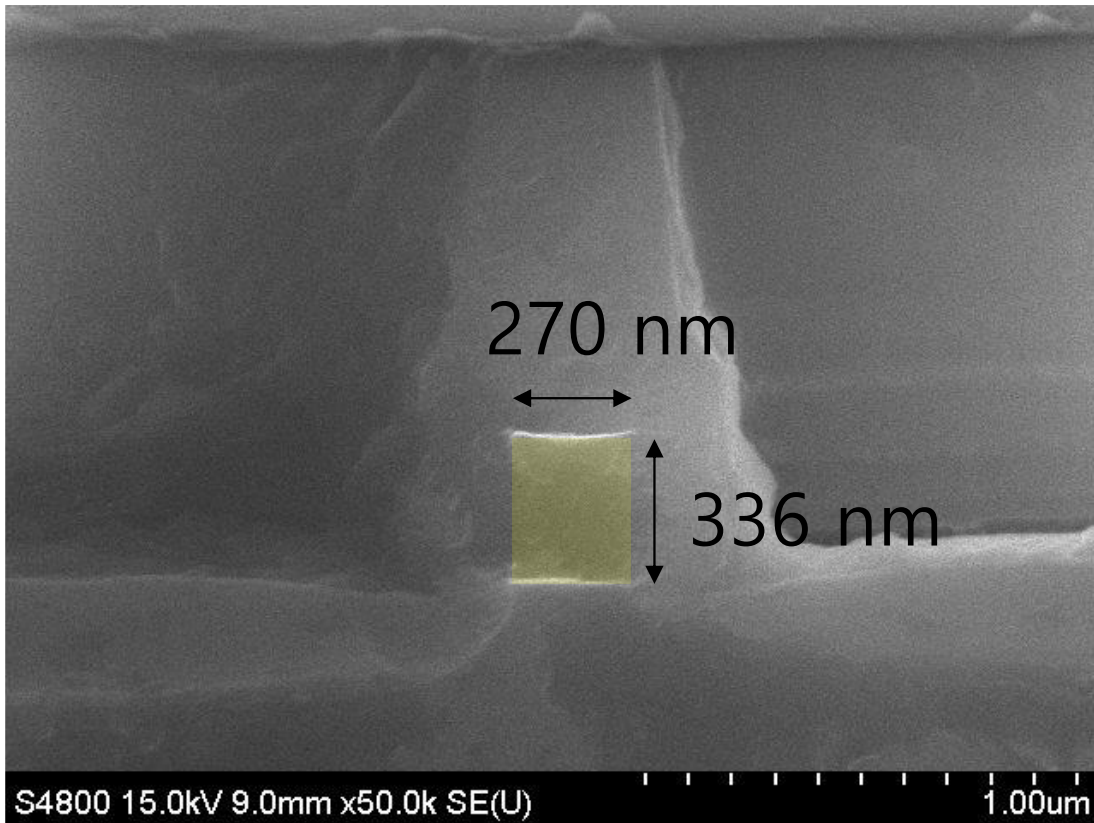


그림 2-21 2 차 wet oxidation 공정결과[26]

7 번째 공정은 2 차 실리콘 식각공정이다. 한국나노기술원 ICP etcher IV 장비 (모델명/ 제작회사 Multiplex ICP/ STS 社)를 이용하여 공정을 진행하였다. 1 차 Si etch 에서 계산된 식각속도를 참고하여 8loop 식각을 진행하였다. α -step 장비를 이용해 식각 깊이를 측정하였으며, 공정결과 2.5um 산화막을 제외하고, 2um 실리콘이 식각된 것을 확인하였다.

8 번째 단계는 실리콘 습식식각 공정이다. 실리콘 결정 방향에 따라 식각이 속도가 다른 특성을 이용해 2 차 실리콘 건식 식각 공정에서 형성된 실리콘 구조물중 나노와이어의 하단 부분만 식각되도록 공정을 진행한다. 이 단계를 통해 실리콘 나노와이어가 부유될 수 있다. 공정 진행시 나노와이어와 마이크로 구조물의 너비차이로 인해 실리콘 나노와이어 부분의 하단이 전부 식각되지만 마이크로 구조물의 하단 실리콘은 디바이스에 연결되어 있도록 식각 시간을 설정한다. Test 공정을 통해 시간 설정을 하였으며, 최종 온도 섭씨 85 도 및 농도 22.5 wt% KOH 에서 공정을 45 초 진행하였다. 공정 진행결과 그림 2-22 과 같이

예상처럼 마이크로 구조물은 디바이스 레이어와 붙어 있고 실리콘 나노와이어만 부유된 것을 확인 할 수 있다.

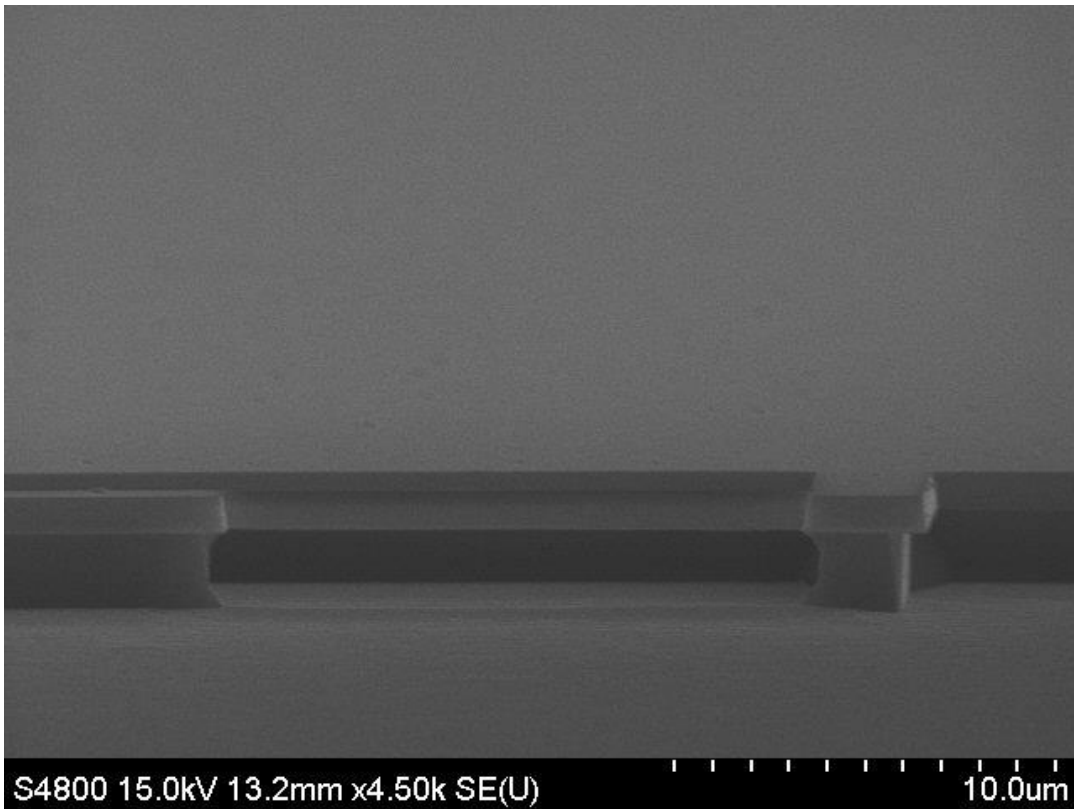


그림 2-22 KOH 용액을 이용한 wet etch 공정 결과[26]

9 번째 단계는 실리콘 산화막 증착공정이다. 한국나노기술원 HDPCVD 장비(제조사: BMR 社, 모델명: High- DEP)를 이용하여 공정을 진행하였다. 해당 장비 기존의 증착속도 $600 \text{ \AA}/\text{min}$ 를 고려해, 100 초 진행하였으며 공정 결과는 그림 2-23 과 같이 멤브레인 영역에 100nm 두께의 실리콘 산화막이 증착되었다.

10 번째 단계는 실리콘 질화막 증착공정이다. 마찬가지로 한국나노기술원 HDPCVD 장비(제조사: BMR 社, 모델명: High- DEP)를 이용하여 공정을 진행하였다. HDPCVD 기존 레시피의 Si_3N_4 증착속도는 실리콘 산화막과 같이 $600 \text{ \AA}/\text{min}$ 인 것을 참고해 공정을 27 분 진행하였다. 공정 결과 그림 2-24 과 같이 2.75um 두께의 실리콘 질화막이 증착된 것을 확인할 수 있다.

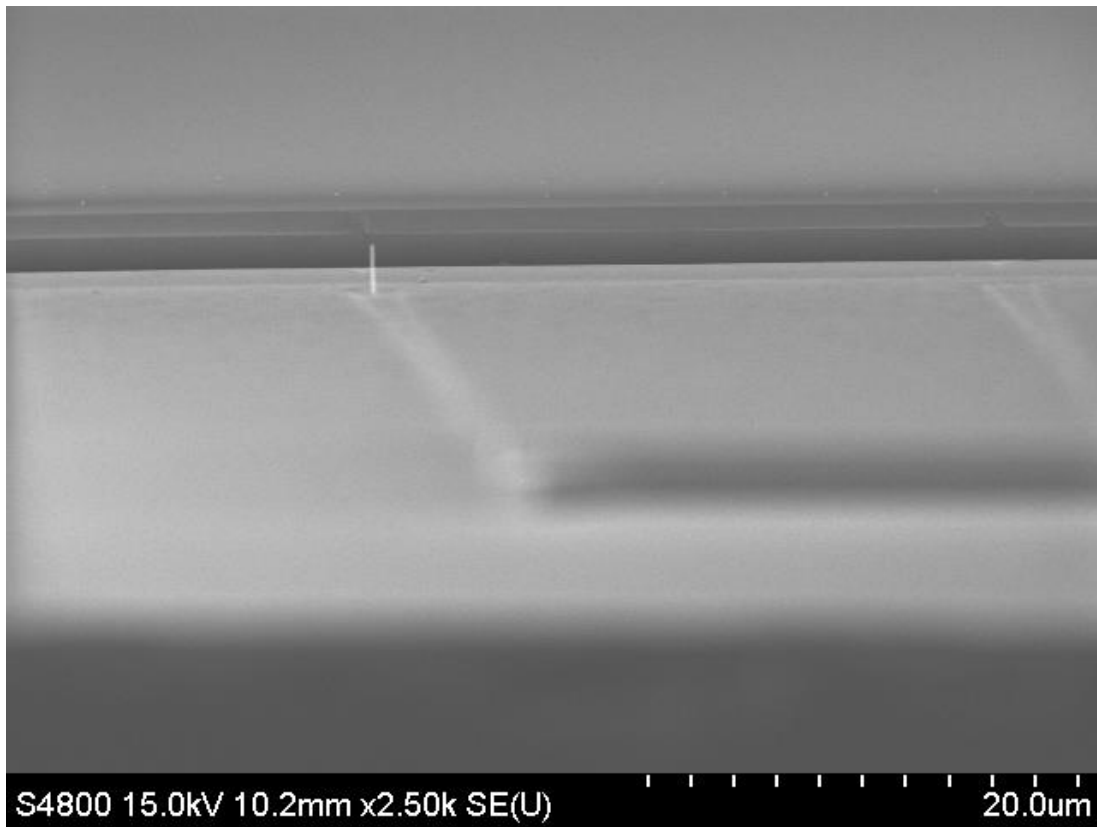


그림 2-23 SiO₂ deposition 공정결과[26]

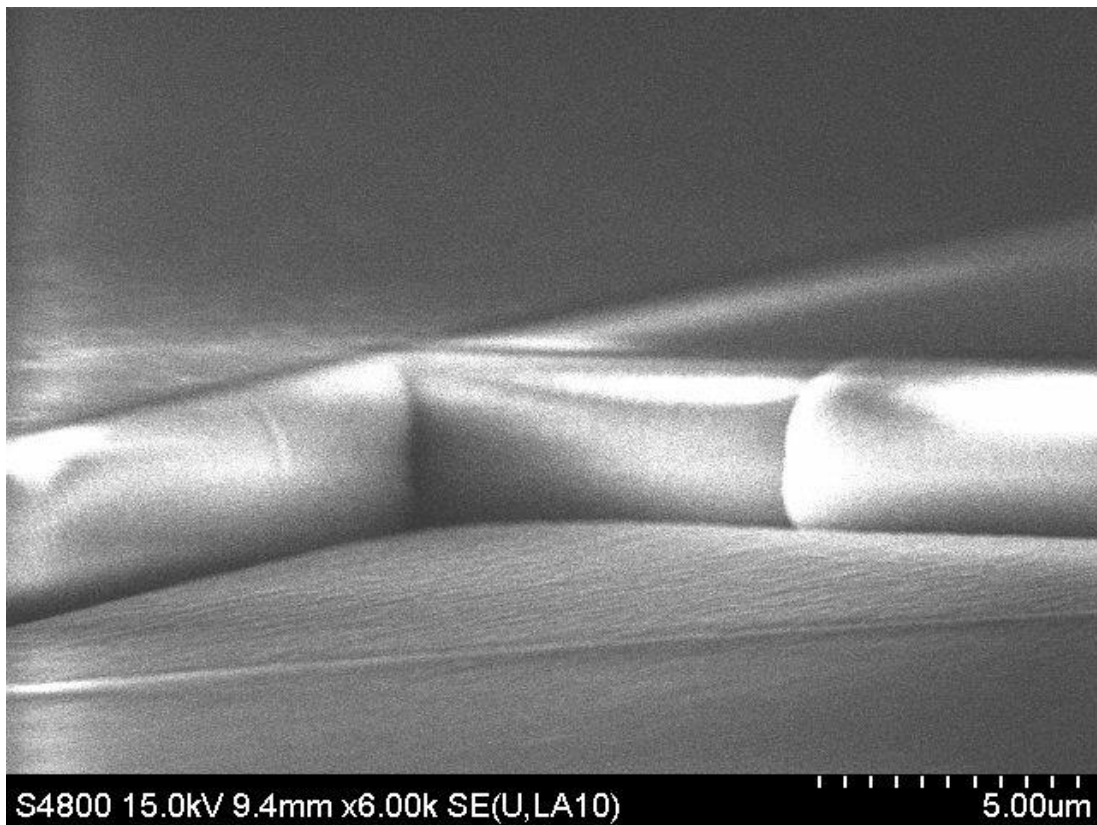


그림 2-24 Si₃N₄ deposition 공정결과[26]

11 번 공정은 CMP 공정이다. 10 번째 단계에서 실리콘 질화막을 증착시 패턴에 따라 단차가 형성됨으로 다음단계인 포토공정에 영향을 준다. 따라서 CMP 공정을통해 웨이퍼 표면에 단차가 없도록 만들어준다.

12 번 공정은 2 차 노광 공정이다. 2 차노광 공정은 서울대학교 반도체공동연구소 Maskless Pattern System 장비 (모델명/제작 회사: (PAS5500/300C)/ASML 社)를 사용하여 진행하였다. Maskless Pattern System 장비를 사용하면 마스크를 따로 제작할 필요없이 Gds 파일로 패턴을 완성하여 장비에 입력하면 되는 장점이 있다. 감광제는 AZ4620 을 사용하였으며 7um 로 증착하였고 test 공정을 통해 노광 에너지는 380 ml/cm² 로 공정을 진하였다, 노광 후 현상액 AZ 300 MIF 에 웨이퍼를 3 분 30 초 현상을 하고 washing 을 하였다. 공정결과 목표했던 감광제 두께 7um 가 형성되었으며 최소선폭은 2um 로 구현이 되었다.

13 번째 공정은 1 차 실리콘 질화막 건식식각공정이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher 장비 (모델명/제작 회사: NeoS-MAXIS df200L/기가레인 社)를 사용하여 공정을 진행하였다. 설계된 마이크로폰의 절연 부분 및 venthole 부분의 크기에 따라 식각속도가 다를 것을 예상하여 test 공정을 진행하였다. 그러나 식각속도는 일치하였으며 2,800 Å/min 으로 계산되었다. 이를 기준으로 2 분 56 초 식각을 진행하여 실리콘 질화막이 완전히 제거되도록 하였다. Nano-spec 으로 측정한 결과 실리콘 질화막 0.75um 가 모두 식각되었으며 10%오버에치 된것을 확인할 수 있었다.

14 번째 공정은 3 차 실리콘 산화막 건식식각이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher 장비를 (모델명/제작 회사: NeoS-MAXIS df200L/기가레인 社) 사용하여 공정을 진행하였다. 이전 단계에서 계산된 3,100 Å/min 식각속도를 기준으로 96 초 공정을 진행하였다. 공정결과, 0.5um 두께의 실리콘 산화막이 제거가 되었으며 실리콘 디바이스 레이어가 30nm 드러났으므로 실리콘 산화막이 완전히 제거가 된것을 확인할 수 있다.

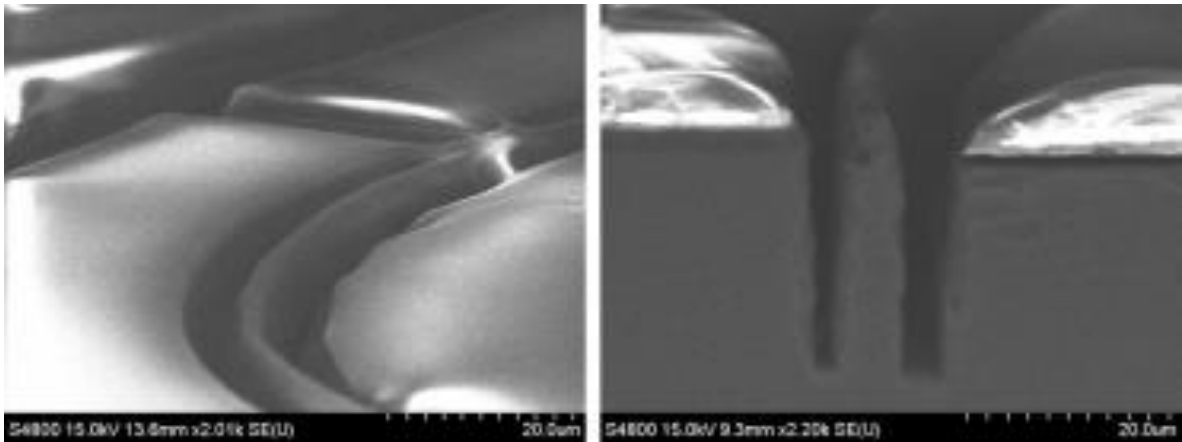


그림 2-25 3 차 Si etch 공정결과[26]

15 번째 공정은 3 차 실리콘 건식 식각공정이다. 성균관대학교 팹 Deep ICP etcher 장비 (모델명/제작회사: MUC-21 / SPP 社)를 사용하여 3 차 Si etch 를 진행하였다. 목표하는 실리콘 식각 깊이는 10um 이며 10% overetch 가 되도록 5 분동안 공정을 진행하였다. 공정결과를 SEM 촬영한 결과 그림 2-25 과 같다. 실리콘이 10um 로가 식각되었으며 BOX 레이어가 드러난 것을 확인 할 수 있다. 3 차 실리콘 건식 식각공정을 완료함으로써 스프링 및 절연부분이 형성이 되었다.

16 번째 공정은 3 차 노광공정이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Aligner 장비 (모델명/제작 회사: (MA6-III/Karl suss 社)를 사용하여 3 차 photolithography 공정을 진행하였다. 3 차 노광공정은 전극패드를 형성하기 위한 패터닝 단계다. 감광제는 AZ4620 을 사용하였고, 추수 실리콘 질화막 및 실리콘 산화막을 모두 제거할 수 있도록 감광제를 충분히 도포한다. 노광에너지는 25mW 로 진행하였다. 노광 후 AZ 300 MIF 현상액을 60 초로 도포한 뒤, washing 을 진행하였다. 공정 진행 결과 목적하는 PR 두께 7um 가 형성되었으며 150 um × 150 um 패터닝이 구현되었다.

17 번째 공정은 실리콘 질화막 및 산화막 건식식각 공정이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher (모델명/제작 회사: NeoS-MAXIS df200L/기가레인 社)를 이용하여 공정을 진행하였다. 먼저 1 차 실리콘 질화막 식각공정때 식각속도를 참고하여 실리콘 질화막을 식각한다. 2.75um 식각 깊이를 목표로

하였으며 10% overetch 되도록 9 분 56 초 공정을 진행하였다. Nano-spec 으로 공정결과를 확인하였으며 실리콘 질화막이 완전히 제거된 것을 확인하였다. 이어서 같은 장비로 4 차 실리콘 산화막 건식식각 공정을 진행하였다. 목표하는 두께는 250nm 이며 96 초 공정을 진행하였다. 마찬가지로 Nano-spec 으로 공정결과를 확인하였으며 250nm 실리콘 산화막이 완전히 제거되었음을 확인하였다.

18 번째 공정은 메탈증착 공정이다. 전극공정을 하기전 3 차 노광공정으로 도포한 감광제를 제거하고 한번 노광 공정을 진행하였다. Lift-off 공정을 진행할때 측벽에 쌓인 메탈이 감광제와 함께 잘 제거될 수 있기 위한 단계다. 메탈공정은 서울대학교 반도체공동연구소 E-beam evaporator 장비 (모델명/제작회사: SRN-200 / SORONA 社)를 사용하였다.

메탈증착에 사용한 물질은 알루미늄이다. 알루미늄은 일함수가 p 타입 Si 에 비해 작으므로 Schottky 접합이 형성되나 annealing 공정을 진행하면 확산으로 인해 알루미늄과 실리콘의 접합부분에 heavy 도핑공정을 진행한 것처럼 p+region 이 형성되며 공핍영역 폭이 2.5nm 이하로 줄어 전자 터널링 현상과 함께 Ohmic 접합이 형성된다.본 연구에서 사용한 웨이퍼의 비저항은 0.01-0.02 Ωcm 이며 약 5.1-5.15 eV 일함수를 가지는 것으로 추정된다. [26]이런 이유때문에 알루미늄을 메탈공정시 사용한 물질로 선정하였으며 공정에서 3500 Å 을 증착하였다. 알루미늄 증착전 Ti 를 증착하여 adhesion layer 역할을 하였으며 Ti 는 400 Å 증착하였다.

메탈 증착 완료후 lift-off 공정을 진행하였다. Lift-off 공정은 서울대학교 반도체공동연구소 wet station 장비 (모델명/제작회사: AW04-01-03 / 아티스 社)를 사용하였다. 6 인치 웨이퍼용 컨테이너에 아세톤을 붓고 9 시간 동안 담가 전극 이외 부분의 메탈을 제거하였다. 공정결과는 그림 2-26 과 같다.

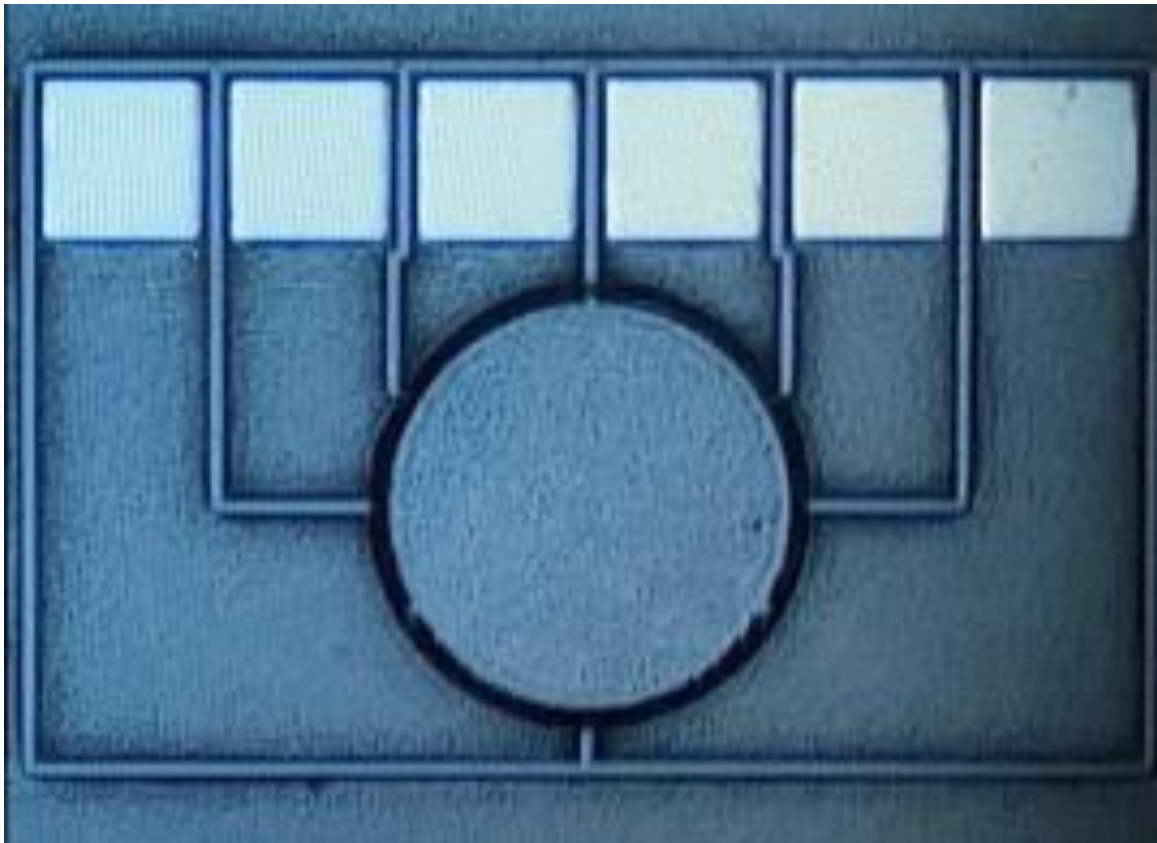


그림 2-26 Lift-off 공정결과[26]

전극공정을 완료한 후, SOI wafer 총 두께 370 um 으로 줄이고자 프리엠텍社에서 CMP 공정 진행하였다. Si polishing 속도는 1um/min 다.

19 번째 공정은 4 차 노광 공정이다. 이는 실리콘 웨이퍼의 뒷면을 식각하여 캐비티를 형성하기 위한 노광 공정이다. 4 차 노광공정은 서울대학교 반도체공동연구소 Aligner 장비(모델명/제작회사: MA-6 III / Karl suss 社)를 사용하여 photolithography 공정을 진행하였다. Aligner 장비를 사용한 이유는 웨이퍼 뒷면에 노광을 해야하는데, KfF 나 Maskless 같은 경우, 앞면 패턴과 align 을 맞출 수 없기 때문이다. 노광시 가장 중요한 것은 앞면과 align 을 맞추는 단계이며, align 이 정확히 맞춰지지 않을 경우, 멤브레인 형성에 영향을 준다. 이전 노광공정과 마찬가지로 AZ4620 감광제를 사용하였으며, 노광후 AZ300MIF 현상액에 5 분 담갔다. 공정결과 목적하는 감광제 두께인 10um 가 도포된 것을 확인 하였다.

20 번째 공정은 4 차 실리콘 건식 식각공정이다. 성균관대학교 정보통신용 신 기능성 소재 및 공정 연구센터 Si Deep etcher (모델명/제작회사: MUC-21 / SPP 社) 장비를 이용해 공정을 진행하였다. 성균관대학교 Si Deep etcher 의 경우 실리콘 식각 공정중 He cooling 공정으로 인해 웨이퍼가 깨질 가능성이 있으므로 얇은 필름을 웨이퍼 표면에 부착하여 공정을 진행하였다. 공정 결과 그림 2-27 과 같이 BOX 가 드러난 것을 확인할 수 있다.

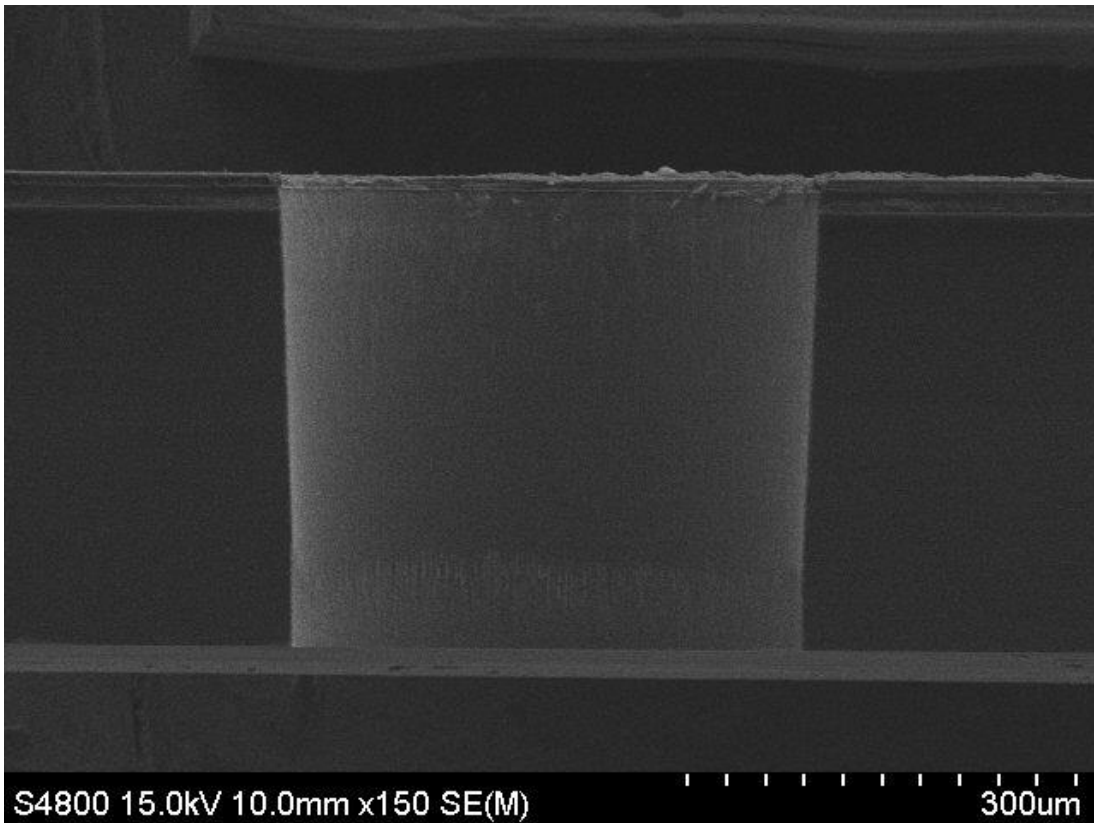


그림 2-27 4 차 Si etch 후 형성된 cavity [26]

21 번째 공정은 BOX 레어인 실리콘 산화막 제거다. 을대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher 장비 (모델명/제작 회사: NeoS-MAXIS df200L/기가레인 社)를 사용하여 5 차 실리콘 산화막 건식 식각 공정을 진행하였다. 공정전 4 차 실리콘 건식 식각공정시 부착한 필름을 아세톤으로 분리시켜야한다. 이때 노광패턴도 아세톤에 함께 지워지므로, 노광패턴이 없이 실리콘 산화막 식각 공정을 진행한다. BOX 두께는 2um 이며 , 완전히

제거가 될때까지 공정을 진행하였다. 공정결과 그림 2-28 와 같이 BOX 가 모두 제거되었음을 확인할 수 있다.

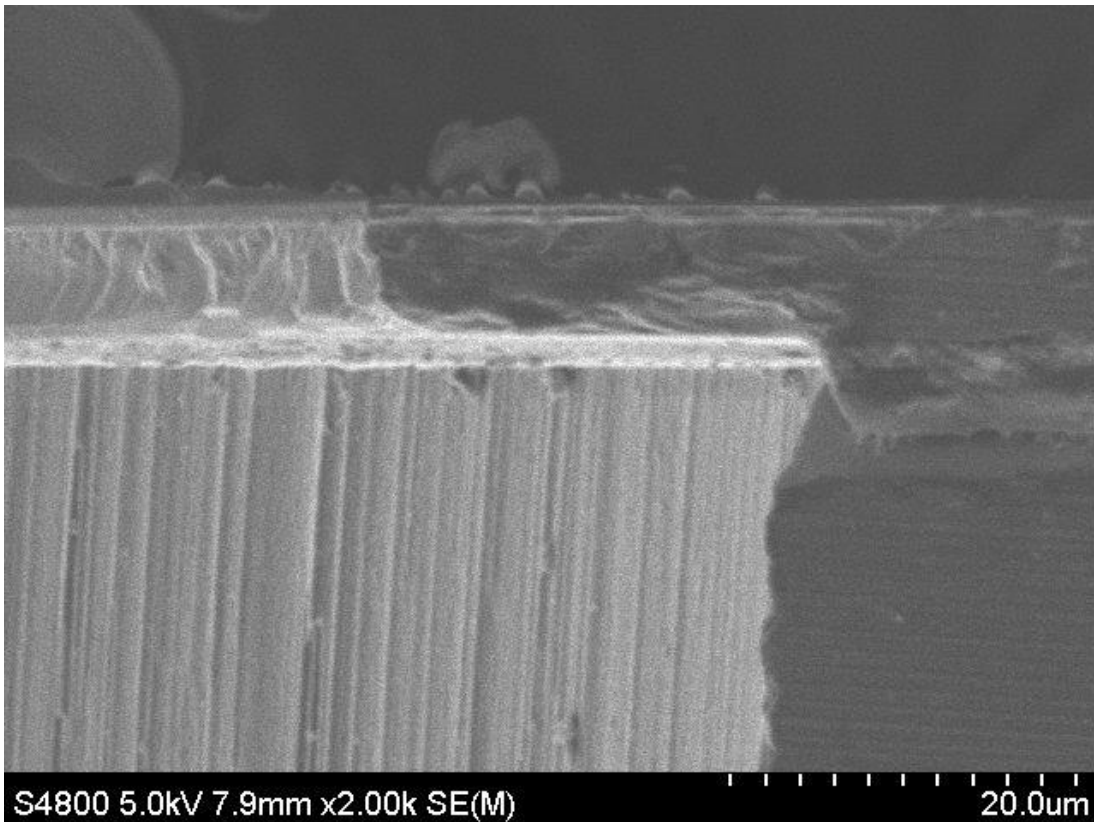


그림 2-28 5 차 SiO₂ etch 후 박막[26]

22 번째 공정은 마지막 공정인 5 차 실리콘 건식식각 공정이다. 서울대학교 반도체공동연구소 Si Deep etcher (모델명/제작회사: SLR-770-10R-B / Plasma-Therm 社)에서 공정을 진행하였다. 감광제가 도포되지 않은 상태에서 공정을 진행했으므로, 목표하는 7.5um 깊이가 시각될때 까지 공정을 진행하였다. 공정결과 그림 2-29 과 같이 실리콘 질화막이 모두 식각되었음을 확인할 수 있었다. 실리콘 질화막 위에 100nm 실리콘 산화막이 증착되어 있으므로, overetch 를 하여도 실리콘 질화막이식각되지 않는다. 공정후 디바이스 레이어가 7.5um 식각되었으며, 실리콘 질화막은 2.8um 로 식각되지 않고 부유된 멤브레인이 형성이 되었다.

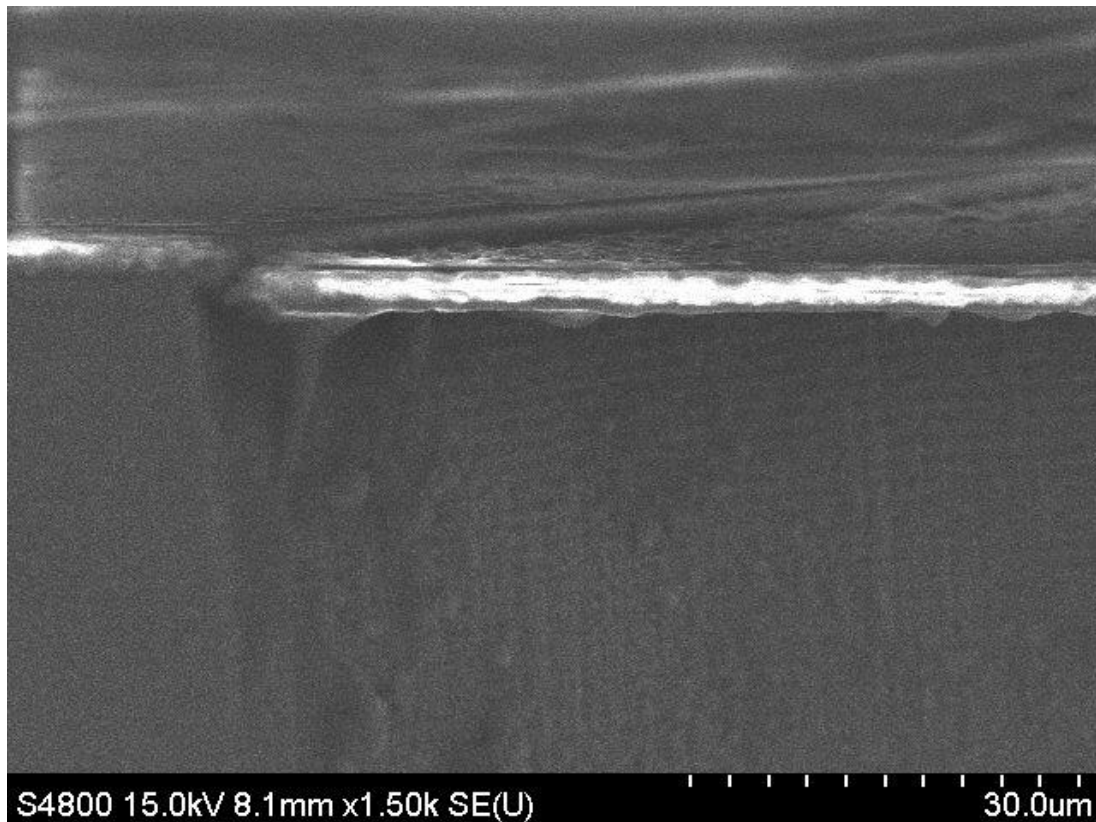


그림 2-29 5 차 Si etch 후 남은 Si₃N₄ 박막[26]

모든 공정이 완료후, Al 의 Ohmic 접합이 형성되도록 Annealing 공정을 진행하였다. 공정은 서울대학교 반도체공동연구소 Furnace IV 장비(모델명/제작 회사: SMF-800/서울일렉트로닉 (주) 社)를 사용하여 진행하였다. 공정조건은 N₂:H₂ 비율을 10:1 로 가스를 조성하였으며 30 분동안 350℃ 온도에서 진행하였다.

제 4 절 마이크로폰 측정 및 분석

제 1 항 마이크로폰 소자 및 실험환경 구성

제작된 마이크로폰을 측정하기 위해 충남대학교 고희호 교수님으로부터 측정세팅 및 회로구성에 대해 도움을 받았다. 마이크로폰 측정을 위한 세팅은 다음 그림 2-30과 같다. 우선 회로 세팅은 2개의 단으로 회로를 구성하였는데, 앞단에서는 휘트스톤 브릿지를 활용하여 저항형 센서인 실리콘 나노아이어의 저항변화량을 전압으로 변화시키면서 동시에 출력 오프셋 전압

제거를 통해 높은 정확도 저항측정이 가능하도록 세팅하였다[26].

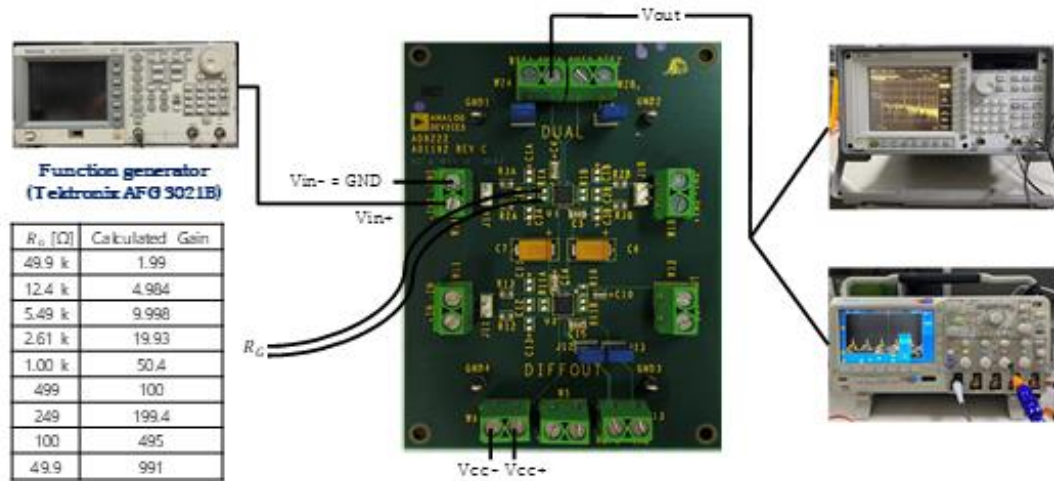


그림 2-30 마이크론 측정 환경 구성[26]

브릿지 및 IC 회로 구성도는 그림 2-31와 같다. 실리콘 나노와이어 기반 마이크론의 경우 저항값이 35 키로옴으로 브릿지의 3개 가변저항 또한 35 키로옴으로 조절해 평형을 맞추었다.다음으로는 Instrumentation amplifier(계측 증폭기) 로써 Analog Device 社의 AD8222 제품을 사용해 200배의 gain으로 증폭할 수 있도록 하였다[26]. 그래프는 AD8222 데이터 시트에 제공된 gain 별 주파수 응답그래프와 gain 1000에서의 voltage noise 그래프인데 실험에 200배 gain을 활용할 경우 Bandwidth 약 10 kHz이며, 출력 노이즈 100 uV 이하로 측정에 적합하다.

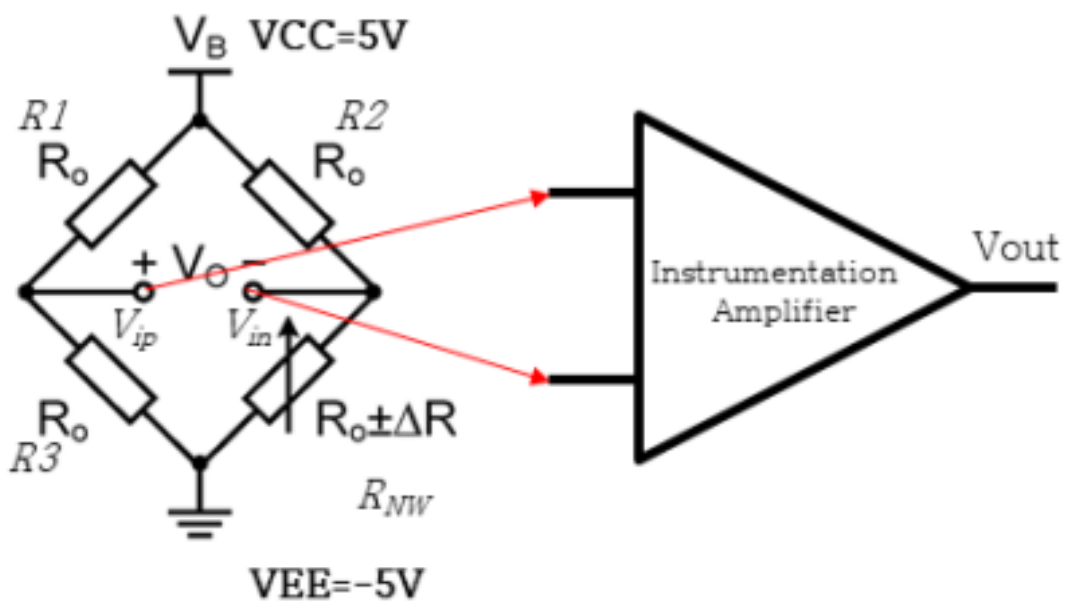


그림 2-31 브릿지 및 IC 회로 구성도[26]

휘트스톤 브릿지 및 계측 증폭단이후 V_{in} 플러스 마이너스로 입력된 휘트스톤 브릿지 양단의 전압값은 세팅된 R_g 값에 따라 정해진 gain 만큼 증폭된다. 증폭된 출력값은 dynamic signal analyzer 및 Oscilloscope 장비와 연결되어 각각 주파수 도메인 및 time 도메인에서의 출력값으로 나타나도록 세팅하였다[26].

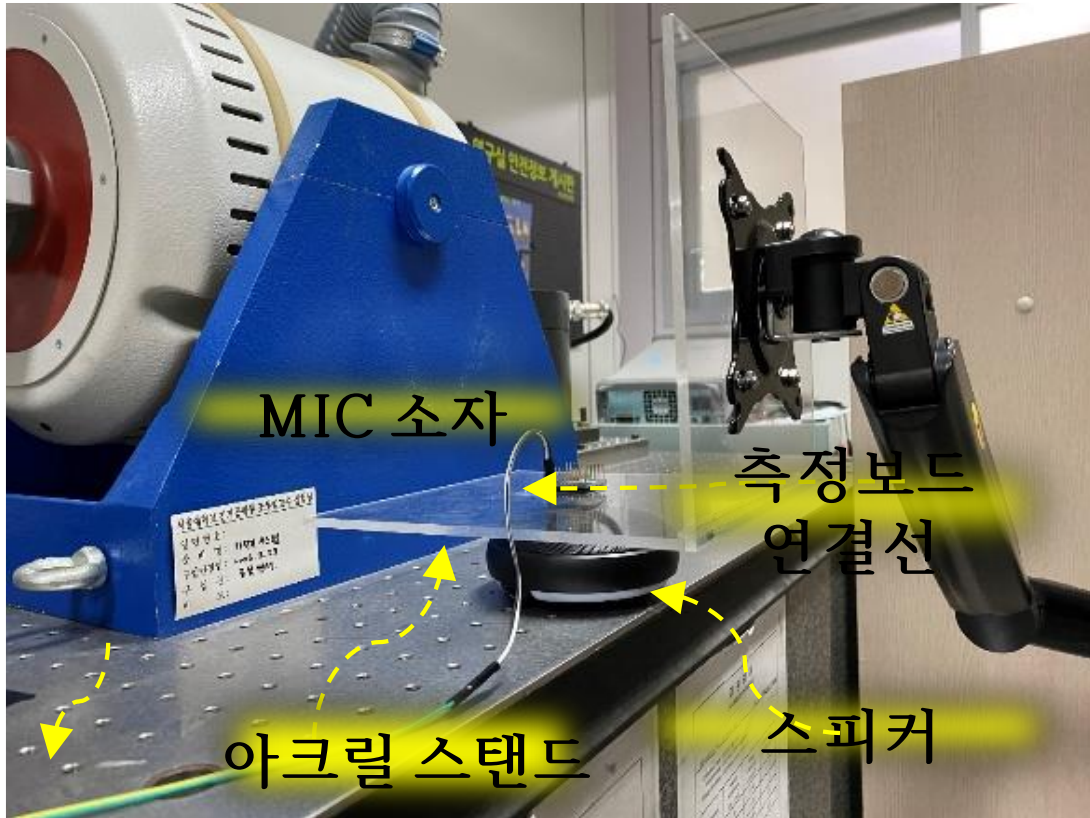
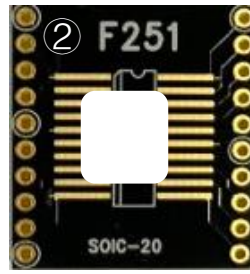


그림 2-32 아크릴 스탠드를 이용한 소자측정 세팅

다음으로 소자패키징 및 측정환경 세팅(그림 2-32)이다. 우선 공정을 완료한 웨이퍼를 다이싱을 하여 그림2-33와 같이 1cm*1cm의 크기로 만들었다[26].



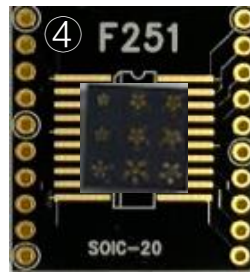
검은색 쪽보드



검은색 쪽보드
(구멍 형성)



절연 접착제 활용해 시편 부착



wire-bonding
(소자 9개)

그림 2-33 마이크로폰 시편 와이어본딩 사진[26]

그후 그림 2-34과 같이 중앙 부분이 제거된 쪽보드에 와이어본딩하여 측정보드와의 연결을 구현하고 쪽보드와 핀을 이용하여 패키징 하였다. 소자의 멤브레인 상하부에 음압이 인가될 수 있도록 그림 2-35와 같이 아크릴로 스탠드를 제작하였고 스피커는 정반에, 마이크로폰 소자는 아크릴로 스탠드 위에 놓고 별도의 스탠드를 사용하여 측정을 진행하도록 했다[26].



Wire-bonding 완료한 쪽보드 및 핀



정6면체 핀을 쪽보드 양쪽에 부착



똑같은 쪽보드를 이용해 뒷면에 부착



절연테이프로 밀봉

그림 2-34 마이크로폰 소자 패키징 방법

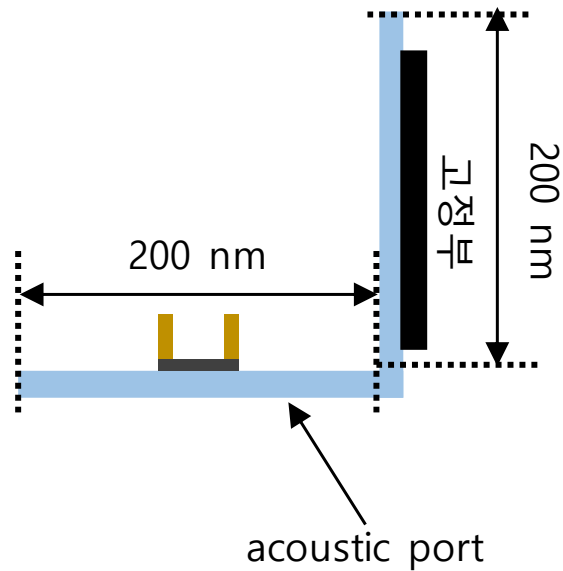


그림 2-35 아크릴 스탠드 schematic

마지막으로 음원 구성 음원 calibration 세팅이다. 음원의 경우, 매트랩으로 100Hz - 10kHz 까지 log scale로 단일 주파수 음원을 작성하였다. 즉 order 별로 10개씩 단일 주파수 구성하였다. 그러나, 음원을 스피커로 출력 시 스피커의 비선형적 주파수응답특성 때문에 주파수별로 왜곡된 음압크기로 출력되는 문제가 발생하기 때문에 100Hz부터 10kHz 까지 flat 주파수응답특성을 가진 상용마이크로폰을 활용하여 보상해야 한다. 보상하는 방안은 3단계로 진행한다. 우선, 상기 주파수별 스피커 음압에 대한 상용마이크로폰 전압값을 출력한다. 다음으로, 주파수별 전압값을 datasheet에 제공된 sensitivity로 나누어 Pa 단위의 음압으로 변환한다. 마지막으로, 제작된 마이크로폰의 전압값을 음압으로 나누어 calibration을 진행한다. calibration할때 활용할 상용마이크로폰은 Knowles 사의 SPW-2430 시리즈로 -42 dBV/Pa(7.9 mV/Pa) sensitivity를 가진다. datasheet에 제시된 해당 상용마이크로폰의 주파수응답그래프를 참고하면 100Hz 부터 10kHz 까지 flat한 response 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 그래프의 양끝에 약간의 변화량이 있지만 이는 2dB 이하의 변화로 1.26배 정도의 차이로 무시 가능하다. 위 3단계로 스피커 비선형성을 보상할 수 있다[26].

제 2 항 마이크로폰 특성 평가 방법

마이크로폰의 성능을 평가하는 음향특성 파라미터는 감도(sensitivity), 주파수 응답 특성(frequency respons), 왜곡률(Total Harmonic Distortion, THD), 극성 (polarity), 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR), 등가입력잡음 (Equivalent Input Noise ; EIN) 등이 있다[32-33]. 제작하는 마이크로폰의 사용목적에 따라 특정 파라미터를 다르게 설계하며 본 논문에서 제시한 마이크로폰은 출력전압값과 민감도를 향상하는 것을 주요 목표로 하고 있다. 그 외 추가로 본 논문에서는 감도, 주파수 응답 특성, 신호대 잡음비 및 등가입력잡음에 대해 특성을 평가하고 자한다.

마이크로폰의 주파수 응답 특성이란 일정한 전압으로 출력되는 오디오 신호가 시스템에 연결되었을때 스피커에서 발생하는 음압이 주파수 변화에 따라 증가하거나 감소하여 주파수에 따라 위상이 변화하는 것을 뜻한다. 허용 진폭 범위 내에서 재생할 수있는 주파수 범위를 나타내는 것이며 범위 내에서 신호 변화량을 주파수 응답특성이라고 한다. 주파수 응답 그래프는 주파수에 대한 응답레벨을 전압또는 데시벨로 표시할 수있다[32].

본 연구에서는 100Hz 부터 10kHz 까지의 주파수에 대한 응답특성을 측정하였다. 모든 주파수에 대해 측정이 불가능하므로, 일정한 간격으로 단일주파수를 출력하였으며 로그스케일로 표시할 수 있도록 입력주파수가 커질경우 간격을 넓히도록 하였다.

감도는 음압이 1 파스칼($10\mu\text{bar}$, 94 dB)인 평면파가 마이크로폰에 입사되었을 때, 회로 출력단에 발생하는 전압을 dB($0\text{ dB}=1\text{V}/\mu\text{bar}$)로 나타낸 것이다[32]. 마이크로폰이 받는 음압 레벨이 동일할때 감도가 높은 마이크로폰은 감도가 낮은 마이크로폰 보다 출력 전압이 높다. 감도가 높은 마이크로폰은 더 조용하거나 멀리있는 음원을 포착할 수 있으며 감도가 낮은 마이크로폰은 일반적으로 소리가 크고 음원이 가까운 곳에 사용하게 된다. 본 연구에서는 감도가 높은 마이크로폰을 설계하는 것을 목표로 하였다.

등가입력잡음 (Equivalent Input Noise)은 마이크로폰에 입력에 적용되는 이론적인 외부 노이즈 소스로서 마이크로폰의 출력 노이즈 레벨 (SPL)을 나타낸다[32]. 등가입력잡음은

장치내부와 장치에 연결한 장비들로 인해 발생하는 환경 소음 수준을 의미한다.

본 연구에서는 음압을 인가하지 않고 주파수에 따른 출력전압을 측정하였다. 마이크로폰 소자와는 측정회로와 연결되었으므로 측정된 등가입력잡음은 주로 회로에서 발생하는 노이즈에 의한 것이다

신호 대 잡음비는 신호의 전력과 노이즈의 전력의 비율이다[34]. 신호는 장치에서 처리해야하는 장치 외부의 전자 신호를 의미하고 노이즈는 장치를 통과한 후 생성된 원래 신호에는 존재하지 않는 불규칙한 추가 신호를 의미한다. 신호 대 잡음비는 보통 dB SPL 의 단위로 표기된다.[34] 장치의 신호 대 잡음비가 높을 수록 생성되는 잡음이 적다는 뜻이다. 신호 대 잡음비가 클수록 신호에 혼합된 잡음이 작아지고 음질이 높아진다.

$$\text{sensitivity}_{dBV} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{sensitivity}_{mV/Pa}}{\text{Output}_{REF}} \right) \quad (2.4.1)$$

제 3 항 마이크로폰 특성 평가 결과 및 분석

우선 제작된 마이크로폰에 대한 주파수 응답특성을 측정하는데 signal analyzer 를 활용해 인가된 단일 주파수에 대한 전압출력 측정하였다. 측정은 5 번 진행하였으며 마이크로폰의 5 회 출력전압 및 평균값을 결과를 아래 표 2-3 로 정리하였다.

표 2-3 제작된 마이크로폰의 5 회 출력전압 및 평균값

| Frequency | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | Averaged Output |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| Hz | mVrms | mVrms | mVrms | mVrms | mVrms | mVrms |
| 100 | 273 | 334 | 307 | 301 | 314 | 306 |
| 200 | 1770 | 1665 | 1616 | 1411 | 1490 | 1590 |
| 300 | 3042 | 2968 | 2921 | 2577 | 2659 | 2833 |
| 400 | 3038 | 2812 | 2649 | 2414 | 2547 | 2692 |
| 500 | 2754 | 2610 | 2432 | 2340 | 2430 | 2513 |
| 600 | 2879 | 2578 | 2347 | 2353 | 2055 | 2442 |
| 700 | 2454 | 2288 | 2165 | 1977 | 1898 | 2156 |
| 800 | 2342 | 2160 | 1981 | 1935 | 1915 | 2067 |
| 900 | 1526 | 1384 | 1250 | 1453 | 1267 | 1376 |
| 1000 | 1484 | 1281 | 1277 | 1225 | 1131 | 1280 |
| 2000 | 4127 | 3753 | 3358 | 3518 | 3258 | 3603 |
| 3000 | 1289 | 1215 | 1206 | 1188 | 1087 | 1197 |
| 4000 | 2621 | 2377 | 2171 | 2281 | 2280 | 2346 |
| 5000 | 4868 | 4176 | 3829 | 3280 | 3274 | 3885 |
| 6000 | 3516 | 2768 | 2610 | 2022 | 2314 | 2646 |
| 7000 | 2169 | 1865 | 1745 | 1544 | 1678 | 1800 |
| 8000 | 5956 | 5850 | 5579 | 3697 | 3558 | 4928 |
| 9000 | 5765 | 6097 | 6497 | 5202 | 5116 | 5735 |
| 9500 | 4609 | 4916 | 5785 | 3522 | 3613 | 4489 |
| 9800 | 4547 | 4356 | 5530 | 3079 | 3344 | 4171 |
| 9900 | 4459 | 4377 | 5623 | 3127 | 3323 | 4182 |
| 10000 | 4433 | 4449 | 5789 | 3041 | 3147 | 4172 |
| 11000 | 5222 | 5071 | 5574 | 4140 | 3776 | 4757 |
| 12000 | 832 | 627 | 566 | 2470 | 2207 | 1340 |
| 13000 | 994 | 773 | 806 | 1002 | 819 | 879 |
| 14000 | 550 | 420 | 519 | 280 | 229 | 400 |
| 15000 | 291 | 259 | 212 | 167 | 167 | 219 |
| 16000 | 315 | 281 | 245 | 234 | 229 | 261 |
| 17000 | 287 | 227 | 232 | 163 | 139 | 210 |
| 18000 | 542 | 474 | 441 | 185 | 152 | 359 |
| 19000 | 713 | 870 | 944 | 656 | 572 | 751 |
| 20000 | 3866 | 3370 | 3401 | 3251 | 3308 | 3439 |

다음으로는 상용마이크로폰(Knowles 社, SPW 2430) 제품을 활용하여 스피커 주파수 응답특성을 Pa 단위의 음압값 구했다. 상용마이크로폰(Knowles 社, SPW 2430)의 출력전압은 아래 표 2-4 로 정리하였다.

표 2-4 상용 마이크로폰 소자
(Knowles 社, SPW 2430) 출력전압

| Frequency | Output | Sound Pressure |
|-----------|--------|----------------|
| Hz | mVrms | Pa |
| 100 | 36 | 4.532131482 |
| 200 | 207 | 26.05975602 |
| 300 | 318 | 40.0338281 |
| 400 | 320 | 40.28561318 |
| 500 | 291 | 36.63472948 |
| 600 | 276 | 34.74634137 |
| 700 | 254 | 31.97670546 |
| 800 | 240 | 30.21420988 |
| 900 | 184 | 23.16422758 |
| 1000 | 192 | 24.17136791 |
| 2000 | 363 | 45.69899245 |
| 3000 | 235 | 29.58474718 |
| 4000 | 282 | 35.50169661 |
| 5000 | 209 | 26.31154111 |
| 6000 | 158 | 19.89102151 |
| 7000 | 94 | 11.83389887 |
| 8000 | 218 | 27.44457398 |
| 9000 | 412 | 51.86772697 |
| 9500 | 428 | 53.88200762 |
| 9800 | 406 | 51.11237172 |
| 9900 | 406 | 51.11237172 |
| 10000 | 400 | 50.35701647 |
| 11000 | 421 | 53.00075984 |
| 12000 | 327 | 41.16686097 |
| 13000 | 162 | 20.39459167 |
| 14000 | 128 | 16.11424527 |
| 15000 | 46 | 5.791056894 |
| 16000 | 134 | 16.86960052 |
| 17000 | 101 | 12.71514666 |
| 18000 | 143 | 18.00263339 |
| 19000 | 201 | 25.30440078 |
| 20000 | 187 | 23.5419052 |

제작된 마이크로폰 주파수 응답특성과 마이크로폰 출력 그래프와 Knowles 마이크로폰으로 측정한 스피커 주파수 응답특성 다음 그림 2-36 및 그림 2-37 와 같다. 제작된 마이크로폰은 8 kHz 영역에서 resonant frequency peak 가 나타나며, 성인 남녀의

목소리 주파수 영역인 100 Hz~1kHz 사이에서는 flat 한 response 특성을 가진다.

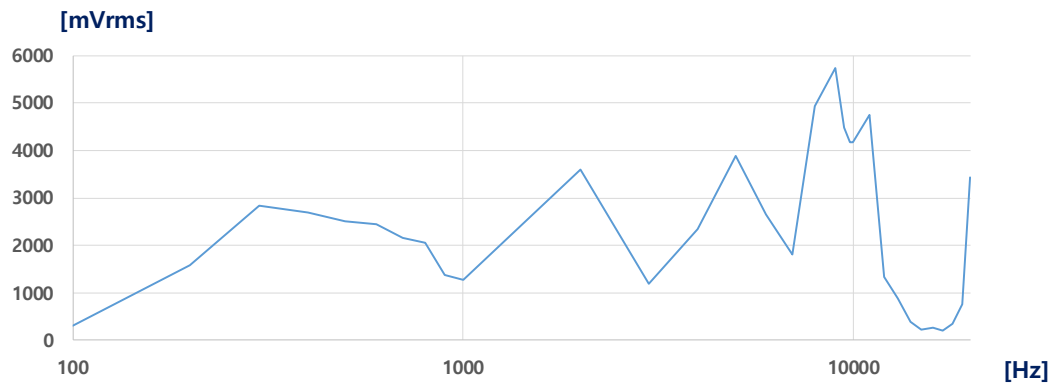


그림 2-36 제작된 마이크로폰 주파수 응답특성
(증폭기 이득 200)

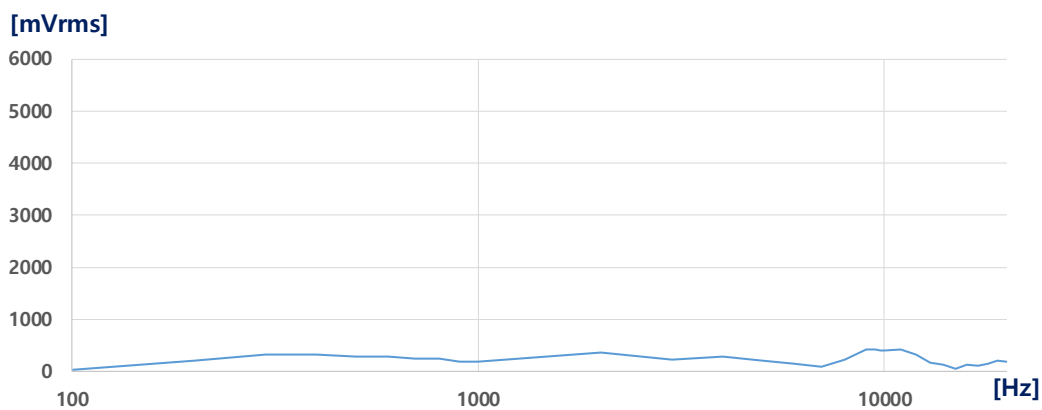


그림 2-37 Knowles 마이크로폰으로 측정한 스피커 주파수
응답특성 (Knowles 7.9 mV/Pa 기준으로 환산)

스피커 비선형성을 보상하기 위해 구한 결과를 제작된 마이크로폰 소자의 증폭된 출력 전압값으로 나누고 Knowles 社 datasheet 에서 제시된 7.9 mV/Pa 기준으로 주파수별로 음압을 normalization 하여 감도를 아래 표 2-5 에 정리하였다.

표 2-5 제작된 마이크로폰 소자의 sensitivity 값

| Frequency | Averaged Output | Sound Pressure | Sensitivity | |
|-----------|-----------------|----------------|-------------|--------------|
| | | | mV/Pa | dBV/Pa |
| Hz | mVrms | Pa | | |
| 100 | 305.8 | 4.532131482 | 67.47377 | -23.41730039 |
| 200 | 1590.4 | 26.05975602 | 61.02897 | -24.28927957 |
| 300 | 2833.4 | 40.0338281 | 70.77515 | -23.00238461 |
| 400 | 2692 | 40.28561318 | 66.82286 | -23.50149846 |
| 500 | 2513.2 | 36.63472948 | 68.60157 | -23.27331876 |
| 600 | 2442.4 | 34.74634137 | 70.29229 | -23.06184582 |
| 700 | 2156.4 | 31.97670546 | 67.43659 | -23.42208787 |
| 800 | 2066.6 | 30.21420988 | 68.39828 | -23.29909633 |
| 900 | 1376 | 23.16422758 | 59.40194 | -24.52398778 |
| 1000 | 1279.6 | 24.17136791 | 52.93867 | -25.52453995 |
| 2000 | 3602.8 | 45.69899245 | 78.83762 | -22.06532942 |
| 3000 | 1197 | 29.58474718 | 40.46004 | -27.85947424 |
| 4000 | 2346 | 35.50169661 | 66.08135 | -23.59842201 |
| 5000 | 3885.4 | 26.31154111 | 147.669 | -16.61421101 |
| 6000 | 2646 | 19.89102151 | 133.0248 | -17.52134494 |
| 7000 | 1800.2 | 11.83389887 | 152.1223 | -16.35614192 |
| 8000 | 4928 | 27.44457398 | 179.5619 | -14.91571589 |
| 9000 | 5735.4 | 51.86772697 | 110.5774 | -19.12667008 |
| 9500 | 4489 | 53.88200762 | 83.31167 | -21.58588327 |
| 9800 | 4171.2 | 51.11237172 | 81.60842 | -21.7653004 |
| 9900 | 4181.8 | 51.11237172 | 81.81581 | -21.74325551 |
| 10000 | 4171.8 | 50.35701647 | 82.84446 | -21.63473023 |
| 11000 | 4756.6 | 53.00075984 | 89.74588 | -20.93970929 |
| 12000 | 1340.4 | 41.16686097 | 32.56017 | -29.74626667 |
| 13000 | 878.8 | 20.39459167 | 43.08986 | -27.31249933 |
| 14000 | 399.6 | 16.11424527 | 24.79793 | -32.1116898 |
| 15000 | 219.2 | 5.791056894 | 37.85147 | -28.43834564 |
| 16000 | 260.8 | 16.86960052 | 15.45976 | -36.21594423 |
| 17000 | 209.6 | 12.71514666 | 16.48428 | -35.65860191 |
| 18000 | 358.8 | 18.00263339 | 19.93042 | -34.00967206 |
| 19000 | 751 | 25.30440078 | 29.67863 | -30.55112241 |
| 20000 | 3439.2 | 23.5419052 | 146.0884 | -16.70768349 |

제작된 마이크로폰은 1kHz 에서 약 50 mV/Pa 값을 가지는데 이는 앞서 설계상에서의 민감도 목표치인 수십 mV/Pa 값에 준하는 값이며 본 연구진이 2019 년에 제작했던 마이크로폰의 민감도보다 수십배 향상되었음을 확인할 수 있다[30]. 또한 아래 그림 2-38 타 연구진(프랑스 LETI 연구소, 2018)이 개발한 실리콘 진 마이크로폰 보다 100Hz~10kHz 주파수 영역에서 약 10 배 이상의 전압출력값을 가진다는 것을 확인 할 수 있다[35].

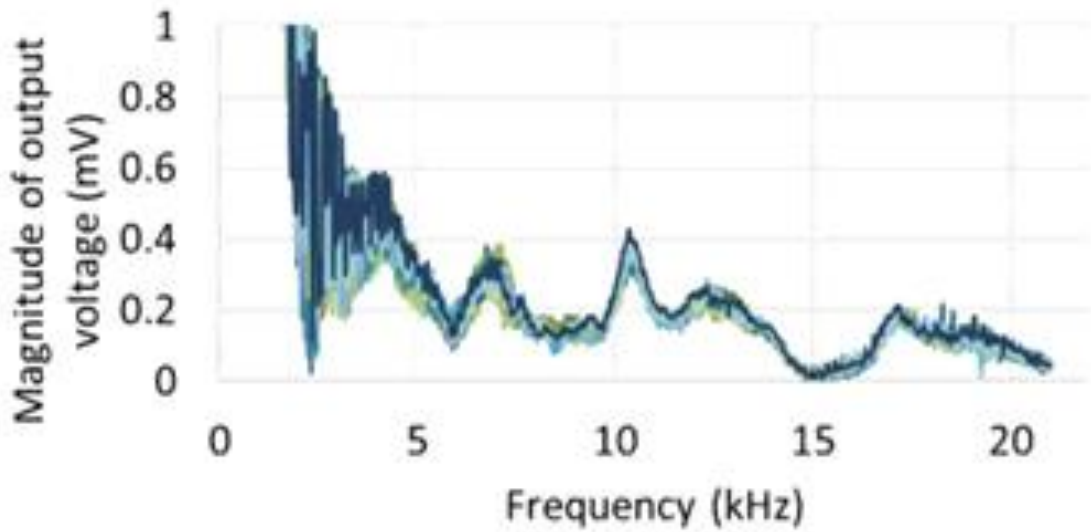


그림 2-38 타 연구진(LETI 연구소)의 마이크로폰 frequency response 그래프 [31]

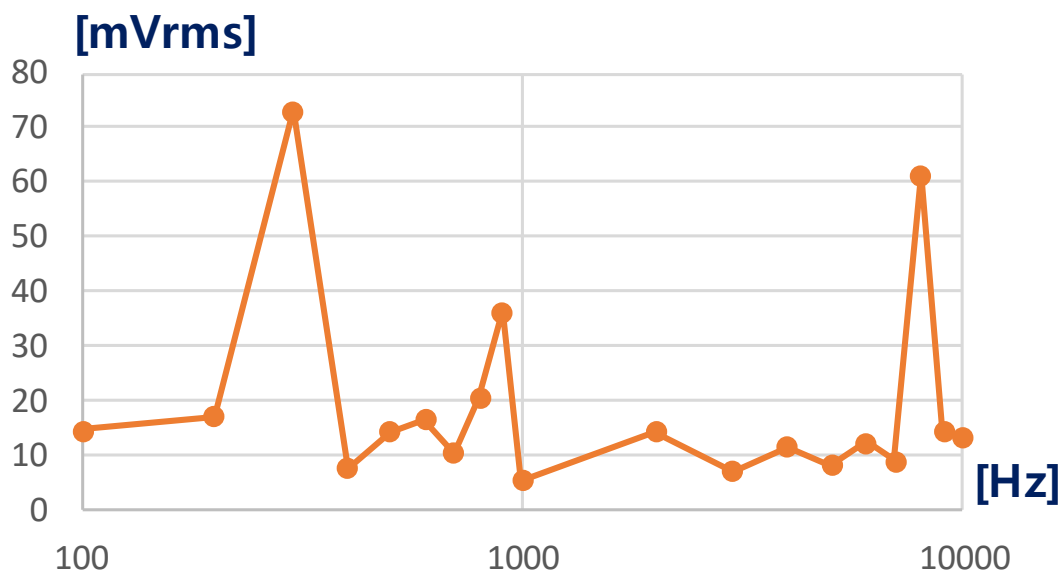


그림 2-39 본 연구진이 작년에 제작한 마이크로폰 frequency response 그래프

다음으로는 본 연구에서 목표하지 않았지만 마이크로폰의 성능 평가에 중요한 특성을 측정한 결과다. 표 2-6 는 마이크로폰의 등가입력잡음을 측정한 결과다.

표 2-6 제작된 마이크로폰으로 측정된 EIN 값

| Frequency | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | Average output |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| Hz | mVrms | mVrms | mVrms | mVrms | mVrms | mVrms |
| 100 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 0.7 |
| 200 | 7.1 | 7.3 | 7.4 | 7.1 | 7.1 | 7.2 |
| 300 | 7.2 | 7.2 | 7.4 | 7.5 | 7.1 | 7.3 |
| 400 | 7.9 | 7.8 | 7.9 | 7.9 | 7.6 | 7.8 |
| 500 | 6.1 | 6.2 | 6 | 5.8 | 6.1 | 6.0 |
| 600 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.7 | 10.5 | 10.5 |
| 700 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.4 | 4.5 | 4.5 |
| 800 | 2.1 | 2 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.2 |
| 900 | 5.3 | 5.5 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.3 |
| 1000 | 2.9 | 2.8 | 2.9 | 3 | 2.7 | 2.9 |
| 2000 | 6 | 6.1 | 6.2 | 6 | 5.9 | 6.0 |
| 3000 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.4 | 1.5 | 1.5 |
| 4000 | 10.8 | 10.9 | 10.8 | 10.9 | 10.9 | 10.9 |
| 5000 | 5.1 | 5.4 | 5.3 | 5.5 | 5.2 | 5.3 |
| 6000 | 3.5 | 3.6 | 3.5 | 3.7 | 3.5 | 3.6 |
| 7000 | 15.9 | 16.1 | 16.1 | 16.3 | 16.2 | 16.1 |
| 8000 | 7.5 | 7.8 | 7.5 | 7.6 | 7.3 | 7.5 |
| 9000 | 5.2 | 5.5 | 5.5 | 5.6 | 5.2 | 5.4 |
| 9500 | 2.7 | 2.7 | 2.8 | 2.7 | 2.8 | 2.7 |
| 9800 | 10.7 | 10.8 | 10.9 | 10.8 | 11.1 | 10.9 |
| 9900 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.5 | 10.5 | 10.7 |
| 10000 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 2.5 | 2.6 |
| 11000 | 10.2 | 10.4 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.4 |
| 12000 | 3.2 | 3.4 | 3.5 | 3.4 | 3.3 | 3.4 |
| 13000 | 6.5 | 6.7 | 6.6 | 6.4 | 6.4 | 6.5 |
| 14000 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.4 | 2.5 | 2.5 |
| 15000 | 4.9 | 5 | 5.3 | 4.6 | 4.9 | 4.9 |
| 16000 | 2.3 | 2.6 | 2.3 | 2.5 | 2.4 | 2.4 |
| 17000 | 4.9 | 5 | 4.9 | 5.1 | 4.9 | 5.0 |
| 18000 | 2.2 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.2 | 2.3 |
| 19000 | 4.5 | 4.5 | 4.4 | 4.2 | 4.1 | 4.3 |
| 20000 | 5.2 | 5.4 | 5.4 | 5.1 | 5.3 | 5.3 |

앞서 구한 감도와 등가입력잡음으로 다음과 같은 식을 이용해 신호 대 잡음비를 계산할 수 있다. Sensitivity 값은 앞부분에서 계산한 값을 이용하였다. 계산한 결과는 다음 표 2-7 로 정리를 하였다 .왜곡률, 극성 등의 파라미터에 대해 측정을 하지 않았으며 이런 특성에 대해 추가로 연구가 필요하다.

표 2-7 제작된 마이크로폰으로 측정된 SNR 값

| Frequency | Averaged Output | Average output | SNR |
|-----------|-----------------|----------------|------|
| Hz | mVrms | mVrms | - |
| 100 | 305.8 | 0.7 | 52.8 |
| 200 | 1590.4 | 7.2 | 47.0 |
| 300 | 2833.4 | 7.3 | 51.9 |
| 400 | 2692.0 | 7.8 | 50.6 |
| 500 | 2513.2 | 6.0 | 52.3 |
| 600 | 2442.4 | 10.5 | 47.3 |
| 700 | 2156.4 | 4.5 | 53.6 |
| 800 | 2066.6 | 2.2 | 59.9 |
| 900 | 1376.0 | 5.3 | 48.3 |
| 1000 | 1279.6 | 2.9 | 52.9 |
| 2000 | 3602.8 | 6.0 | 55.6 |
| 3000 | 1197.0 | 1.5 | 57.9 |
| 4000 | 2346.0 | 10.9 | 46.7 |
| 5000 | 3885.4 | 5.3 | 57.6 |
| 6000 | 2646.0 | 3.6 | 57.5 |
| 7000 | 1800.2 | 16.1 | 41.1 |
| 8000 | 4928.0 | 7.5 | 56.4 |
| 9000 | 5735.4 | 5.4 | 60.9 |
| 9500 | 4489.0 | 2.7 | 64.4 |
| 9800 | 4171.2 | 10.9 | 51.8 |
| 9900 | 4181.8 | 10.7 | 51.7 |
| 10000 | 4171.8 | 2.6 | 64.1 |
| 11000 | 4756.6 | 10.4 | 53.4 |
| 12000 | 1340.4 | 3.4 | 52.4 |
| 13000 | 878.8 | 6.5 | 42.6 |
| 14000 | 399.6 | 2.5 | 44.1 |
| 15000 | 219.2 | 4.9 | 33.0 |
| 16000 | 260.8 | 2.4 | 41.1 |
| 17000 | 209.6 | 5.0 | 32.6 |
| 18000 | 358.8 | 2.3 | 44.2 |
| 19000 | 751.0 | 4.3 | 44.4 |
| 20000 | 3439.2 | 5.3 | 56.4 |

제 3 장 결 론

제 1 절 결론

본 논문은 본 연구진이 수행한 스마트센서를 위한 벌크 실리콘 SOLID NEMS 공정 플랫폼 개발 과제(2020.1-2020.8) 및 인간중심소프트로봇기술연구센터(2020.1-2020.12)의 일환으로 진행하였으며 과제 보고서의 내용을 상당부분 인용하였다. 본 학위 논문의 기여는 마이크로폰 제작중 공정 및 측정결과에 관한 것이다.

상기 과제에서는 호형태 스프링 구조물을 포함하는 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰을 제안했고 제안된 MEMS 마이크로폰은 스프링 구조물을 호형태로 구부려 멤브레인을 둘러싸는 구조로 면적을 최소화할 수 있도록 설계하였으며 우수한 압저항 특성을 가진 실리콘 나노와이어를 호형태 스프링 구조물의 최대응력이 발생하는 위치에 배치해 높은 민감도를 확보할 수 있도록 설계하였다.

상기 과제에서 제안한 마이크로폰은 압저항형 마이크로폰으로, 정전용량형 또는 압전형 마이크로폰의 단점을 해결할 수 있다. 또한 후기판이 필요없어 면적을 최소화 할 수 있는데, 호형태로 스프링 구조를 설계함으로써 상용 마이크로폰에 준하도록 민감도를 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 전술한 바와 같이 공정과 측정에 대해 기여를 하였으며 본 연구진이 보유한 실리콘 나노와이어 제조 공정 기술을 응용한 공정법을 통해 제안한 마이크로폰을 제작하였다. 공정은 4장의 마스크와 22개의 단계가 포함되었다. 그러나 본 연구에서 설계한 마이크로폰의 형태, 크기, 전극패드의 크기 및 위치등이 이전 연구에서 개발한 마이크로폰과 다르므로 개발된 레시피를 참고하되 test 공정을 통해 모든 공정 레시피를 확인하고 상황에 따라 새로운 공정 조건을 개발하여 공정을 진행하였다. 제작결과 실리콘 나노와이어는 2~300 nm 급 크기를 가지며 멤브레인인 400um대로 스프링 구조물과 함께 부유되었다..

본 연구에서 제작한 MEMS 마이크로폰의 성능을 평가하기 위해 충남대학교 고희호 교수님의 도움을 받아 측정환경을

세팅하고 측정회로를 구성하였다. 감도(sensitivity), 주파수 응답 특성(frequency respons), 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR), 등가입력잡음 (Equivalent Input Noise ; EIN) 등 파라미터를 측정하고 출력전압 및 민감도에 대해 타연구진이 제작한 MEMS 마이크로폰과 비교하였다 .

최종적으로,,제작한 MEMS 마이크로폰의 출력전압은 수V대이며, 민감도는 52.94 mV/Pa이다. 이는 타연구진의 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰 연구결과보다 우수하며, 상용 마이크로폰에 준하는 특성을 보인다.

제 2 절 향후 계획

본 연구에서는 면적을 최소화하면서 민감도가 높은 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰을 제작하였다. 제작한 마이크로폰에서 실리콘 나노와이어를 최대 응력이 발생하는 위치에 배치하였으나 측정할 때 인장과 압축에 배치한 실리콘 나노와이어를 구별을 하지 않고 측정을 진행했다. 향후 연구에서 인장과 압축에 배치한 실리콘 나노와이어를 이용해 차동모드로 측정을 진행하면 우수한 신호 대 잡음비도 확보할 수 있을 것으로 예상된다[37].

본 연구에서는 출력전압 및 민감도에 대해 분석과 연구를 진행했지만 마이크로폰의 성능을 평가하는 다른 파라미터에 대해 분석을 하지 않았다. 향후 연구를 통해 고민감도 마이크로폰을 적용할때 다른 파라미터의 성능 수준에 대해 분석하고 개선할 필요가 있다. 또한 마이크로폰의 멤브리인이나 스프링 구조물의 형태, 디멘전을 변화시켜 목적에 따라 특정 파라미터의 목표 수치에 준하는 설계에 대한 연구가 필요하다.

"

참고 문헌

- [1] "고맙다 AI 스피커" MEMS 마이크로폰 수요 성장세, KIPOST, 2018.5.31
- [2] 인공지능 음성 스피커 성장의 핵심 기술 'MEMS 마이크로폰' , HelloT, 2018.5.2
- [3] Jan C. Aurich, "Abrasive processes for micro parts and structures", 2019
- [4] "System plus consulting" , *Consumer, las modified* Mar 07, 2018 accessed Sept 10, 2020, <https://www.systemplus.fr/reverse-costing-reports/apple-iphone-x-mems-microphones-from-goertek-knowles-and-aac-technologies/>
- [5] SUI, Wenshu, et al. Breaking the size barrier of capacitive MEMS microphones from critical length scale. In: 2017 19th International Conference on *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)*. IEEE, 2017. p. 946-949.
- [6] Anzinger, Sebastian, et al. "A comb-based capacitive MEMS microphone with high signal-to-noise ratio: modeling and noise-level analysis." Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings. Vol. 1. No. 4. 2017.
- [7] Avoiding Epic Fails in MEMS Microphones,' Vesper Technologies, USA, 2017.
- [8] C. H. Huang, C. H. Lee, T. M. Hsieh, L C. Tsao. S. Wu, J. C. Liou, M. Y. Wang, L. C. Chen, M. C. Yip and W. Fang, "Implementation of the CMOS MEMS condenser microphone with corrugated metal diaphragm and silicon back-plate," *Sensors J.*, vol. 11, pp. 6257-6269, 2011
- [9] 권민형, 라용호, 전대우, & 이영진. (2018). MEMS 구조 압전 마이크로폰의 최적구조 설계. *센서학회지*, 27(4), 269-274.
- [10] "Acoustics.org" ,ASA *PRESSROOM*, last modified Mar.16, 1999, accesse Sept.11,2020,

- <https://acoustics.org/pressroom/httpdocs/137th/fischer.html>
- [11] Shakarami, Ali, A. Afifi, and A. Mir. "Analysis and simulation of Piezoresistivity effect in Silicon nanowires for using in MEMS pressure Sensors." *Majlesi Journal of Mechatronic Systems* vol.3, no.3, 2014.
- [12] He, R., & Yang, P. (2006). Giant piezoresistance effect in silicon nanowires. *Nature nanotechnology*, 1(1), 42–46.
- [13] Yu, Peng, et al. "Design and fabrication of silicon nanowires towards efficient solar cells." *Nano Today* 11.6 (2016): 704–737. *Avoiding Epic Fails in MEMS Microphones,* Vesper Technologies, USA, 2017.
- [14] 장서형, "증가된 압저항 효과를 가진 실리콘 나노와이어의 공정과 특성 분석 및 관성센서로의 응용", (공학박사, 서울대학교, 2019), 10.
- [15] M. McClarty, N. Jegenyas, M. Gaudet, C. Toccafondi, R. Ossikovski, F. Vaurette, S. Arscott, and A. Rowe "Geometric and surface chemical origin of the piezoresistance in silicon nanowires," *Applied physics letters*, 2016
- [16] J. X. Cao, X. G. Gong, and R. Q. Wu, "Giant piezoresistance and its origin in Si (111) nanowires: First-principles calculations," *Physics Review B*, vol. 75, 233302, 2007.
- [17] D. Shiri, Y. Kong, A. Buin, and M. P. Anantram, "Strain induced change of bandgap and effective mass in silicon nanowires," *Applied Physics Letters*, vol. 93, 073114, 2008.
- [18] Y. Niquet, C. Delerue, and C. Krzeminski, "Effects of strain on the carrier mobility in silicon nanowires," *Nano Letters*, vol. 12, pp. 3545–3550, 2012.
- [19] A. C. H Rowe, "Silicon nanowires feel the pinch," *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 6, pp.311–312, 2008.
- [20] J. S. Milne, A. C. H. Rowe, S. Aroscott, and C. Renner, "Giant piezoresistance effects in silicon nanowires and

- microwires,” *Physics Review Letters*, vol. 105, 226802, 2010.
- [21] S. Lee, S. Park, J. Kim, S. Lee, D. I. Cho, “Surface/bulk micromachined single crystalline silicon micro gyroscope,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 557–567, 2000.
- [22] Solanki, Amit, and Handon Um. "Top-down etching of Si nanowires." *Semiconductors and Semimetals*. Vol. 98. Elsevier, 2018. 71–149.
- [23] S. Lee, S. Park, J. Kim, S. Lee, D. I. Cho, “Surface/bulk micromachined single crystalline silicon micro gyroscope,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 557–567, 2000.
- [24] K. I. Seo, S. Sharma, A. A. Yasserli, D. R. Stewart, and T. I. Kamins, “Surface charge density of unpassivated and passivated metal-catalyzed silicon nanowires,” *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 9, pp. G69–G72, 2006.
- [25] B. S. Simpkins, M. A. Mastro, C. R. Eddy, and P. E. Pehrsson, “Surface depletion effects in semiconducting nanowires,” *Journal of Applied Physics*, vol. 103, 104313, 2008.
- [26] 조동일, 스마트센서용 초소형 NEMS 공정플랫폼 개발 최종 보고서 (과제번호: 2015M3A7B7046616, 총연구기간: 2015.10–2020.8, 과학기술정보통신부, 한국연구재단), 2020.
- [27] “환경 및 사용자 적응형 MEMS 마이크로폰 솔루션 개발,” ETRI, 대전, 한국, 2017.
- [28] S. Lee, S. Park, J. Kim, S. Lee, and D. I. Cho, “Surface/bulk micromachined single crystalline silicon micro gyroscope,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 557–567, 2000.
- [29] B. H. Kim, and H. S. Lee, “Acoustic-Thermal Noise in a Capacitive MEMS Microphone” *Sensors J.*, vol. 15, pp. 6853–6860, 2015.
- [30] 이승현, “스프링 구조가 포함된 진동막을 이용한 실리콘

- 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 공저과 특성 분석” ,(공학석사,서울대학교,2020),55.
- [31] K. N. Lee, S. W. Jung, K. S. Shin, W. H. Kim, M. H. Lee, and W.K. Seong, “Fabrication of suspended silicon nanowire array”, *Small*, vol. 4, no. 5, pp. 642–648, 2008.
- [32] 박병욱, and 김학운. "소형 마이크로폰의 전기적인 음향 특성 측정 시스템." *한국컴퓨터정보학회논문지* 12.3 (2007): 259–266.
- [33] 박병욱, 서재갑, and 김학운. "마이크로폰의 음향특성 측정 시스템 구현." *Proceedings of KIIT Conference*. 2006.
- [34] 위키백과, " 신호 대 잡음비", https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%8B%A0%ED%98%B8_%EB%8C%80_%EC%9E%A1%EC%9D%8C%EB%B9%84, (2020.5.25)
- [35] Lhermet, Hélène, et al. "First microphones based on an in-plane deflecting micro-diaphragm and piezoresistive nano-gauges." 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2018.
- [36] Lee, S., Chang, B., Kim, T., Jin, A., & dan Cho, D. I. (2019, October). Design and Fabrication of Silicon Nanowire-based MEMS Microphones. In 2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (pp. 1685–1688). IEEE.
- [37] 김태엽, 김애련, 박정현, & 조동일. (2020). 압저항 효과의 양극성을 이용한 MEMS 센서 민감도 향상을 위한 실리콘 나노와이어 설계. *제어로봇시스템학회 국내학술대회 논문집*, 227–228.

Abstract

Piezoresistive Microphone with Arc-shaped Springs

Ailian Jin

Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Microelectromechanical system (MEMS) sensors are receiving increased attention due to the rapid growth of the Internet of things (IoT), as the demand for multi-species and high-performance products has increased significantly. In particular, MEMS microphones are showing a rapid market growth with the launch of smartphones and the application of smart mobility and AI technology-based voice recognition. Depending on the sensing method MEMS microphones are classified into three types: capacitive, piezoelectric, and piezoresistive. The capacitive microphones require a large area for a large capacitance and also require high process complexity. In the case of the piezoelectric microphones, among the materials constituting the piezoelectric layer, there are limited types of materials that can be processed into a thin film form and the characteristic is unsuitable in measuring low-frequency signals. The piezoresistive microphones can solve the drawbacks of the above two methods, but there is a limit to increasing the piezoresistive effect with the doping method,

which limits the improvement of the sensitivity of the sensor. To solve this problem a microphone was designed and fabricated to measure its performance in this paper ,which is a part of a research project named “Development of bulk–Si SOLID NEMS fabrication platform for smart sensors” performed in our laboratory. The microphone proposed in the project is possible to minimize the area by designing a structure surrounding the membrane by bending the spring structure located at the edge of the membrane in an arc shape. Silicon nanowires with excellent piezoresistance characteristics are designed to secure high sensitivity by placing them in the location where the maximum stress occurs in the arc–shaped spring structure. The process was designed and fabricated for a silicon nanowire–based MEMS microphone with a Si₃N₄ based spring structure and membrane with a size of 200–300 nm by applying the unique silicon nanowire fabricating process technology of our laboratory. Finally, performance evaluation of the manufactured microphone was conducted to obtain a sensitivity of 52.94 mV/Pa and SNR 52.89, which is superior to the results of research on silicon nanowire–based MEMS microphones by other researchers, and shows characteristics comparable to those of commercial microphones.

Keywords : silicon nanowire, microphone, MEMS fabrication
Student Number : 2019–25509