

미세가공 정전용량형 초음파 탐촉자 개발(III) - 탐촉자 성능평가

Development of capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (III) - Performance Test

김기복*[†], 안봉영*, 박해원*, 김영주*, 이승석*

Ki-Bok Kim*[†], Bongyoung Ahn*, Hae-Won Park*, Young-Joo Kim* and Seung-Seok Lee*

초 록 본 연구는 선행연구의 결과를 바탕으로 cMUT를 개발하여 그 특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 미세 반도체 제작공정을 적용하여 cMUT를 제작하여 단면특성을 측정하여 분석하였다. 제작된 cMUT의 미소 진동 막의 변위를 측정할 수 있는 마이켈슨 위상변조 간섭계를 구성하여 측정결과와 이론적인 해석결과와 비교하였다. cMUT의 초음파 특성을 분석하기 위하여 송수신 시스템을 구성하였다. 비접촉 방법으로 cMUT에 의해 발생하는 초음파 신호를 수신하여 수신파형의 특성을 분석한 결과 양호한 주파수 특성을 나타내었다. 본 연구에서 개발된 cMUT는 향후 비접촉식 초음파 응용분야에 다양하게 활용될 것으로 판단된다.

주요용어: 미세가공 정전용량형 초음파 탐촉자, 비접촉, 미세가공, 진동막 변위, 간섭계

Abstract In this study, the capacitive micromachined ultrasonic transducer (cMUT) was developed based on the previous research results. The cross sectional image of the developed cMUT was characterized. To measure the membrane displacement of the cMUT, the Michelson phase modulation fiber interferometer was constructed. The measured membrane displacement was in good agreement with the result of the finite element analysis. To estimate the ultrasonic wave generated by the cMUT, an ultrasonic system including a pulser, receiver and charge amplifier was used. The cMUT developed in this study shows a good performance and hence will be widely used in the non-contact ultrasonic applications.

Keywords: cMUT, MEMS, non-contact, displacement of membrane, interferometer

1. 서 론

기존의 접촉 초음파 탐상법의 한계를 극복하기 위하여 여러 가지의 비접촉 초음파 탐상법이 개발되고 있으며[1-4], 이들 중 대표적인 비접촉 방법으로는 EMAT (Electromagnetic-Acoustic Transducer), 레이저 유도 초음파법, 1-3 복합압전재료를 이용한

공기-결합 초음파 탐촉자 등을 들 수 있다. EMAT는 대상 매질에 따라 사용 주파수와 비접촉 거리가 제한되고 에너지 변환 효율이 낮다는 단점이 있다. 레이저 유도 초음파의 경우, 탐상에 필요한 초음파 모우드의 선택성이 낮고, 장비가 복잡해지며 경우에 따라 대상체 표면에 손상이 발생할 수 있다. 공기-결합 초음파 탐촉자의 경우 주파수가 높아 질 경우

(접수일: 2004. 8. 23, 심사완료일: 2004. 10. 15) * 한국표준과학연구원 환경안전계측센터, † Corresponding author: Center for Environment & Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340 (E-mail: kimkibok@kriss.re.kr)

공기 중에서 초음파 전달 효율이 낮아지게 된다. cMUT(capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer)는 초소형 정전용량형 진동 막을 배열하여 구성한 초음파 센서로서 공기 중에서 고 효율의 초음파 송수신이 가능하게 때문에 비접촉 초음파 탐상에 매우 유리하다. cMUT는 실리콘 웨이퍼 위에 미세 가공된 수백 또는 수천 개로 이루어진 박막의 진동을 이용하여 초음파를 송수신하는 새로운 개념의 초음파 탐측자로서 최근의 MEMS 기술의 비약적인 발전과 더불어 상당한 기술적인 발전이 이루어지고 있다.

cMUT는 일반 반도체 공정에 이용되는 실리콘 웨이퍼 위에 두께 수천 Å의 얇은 막을 역시 수천 Å의 공기 층위에 제작하면 웨이퍼와 얇은 막은 공기층을 사이에 두고 capacitor를 형성한다. 이렇게 제작된 capacitor에 교류 전류를 흘리면 얇은 막은 진동하게 되고 이로부터 초음파가 발생하게 되며, 반대로 외부의 초음파에 의해 얇은 막이 진동하게 되면 capacitor의 정전용량이 바뀌게 되어 이러한 정전용량의 변화를 검출함으로써 초음파의 수신이 가능하다.

이러한 cMUT는 기존의 콘덴서 마이크로폰과 압력 센서 기술에 기초하고 있으며[5-7] 반도체 제작 기술이 발달하면서 박막 미세가공이 가능해짐에 따라 그 제작 기술이 발전하게 되었다[8-10, 23-26]. 현재 cMUT 개발을 선도하고 있는 미국과 유럽의 연구동향은 array화 된 cMUT 박막의 두께와 크기, 공기층의 두께 등과 같은 여러 가지 cMUT 설계 인자들의 변화에 따른 최적 설계기준 및 사양을 설정하고, 이러한 기준에 따라 제작된 cMUT의 특성을 평가하는 일련의 연구가 수행되고 있으며[8, 11-16] 의료용 진단장치와 같은 상용화를 위한 많은 노력을 경주하고 있다[17,18].

cMUT는 초소형 비접촉 초음파 센서이기 때문에 기존의 접촉 초음파 센서가 차지하고 있던 많은 응용 분야를 대체할 수 있다. 그 중 의료용 초음파 센서분야가 가장 대표적인 응용분야가 될 전망이다[17] 그 외 cMUT의 구동 메커니즘을 이용하여 유량 센서와 근접센서 뿐만 아니라 미세 유체유량 제어 위한 device에 응용되어 microfluidics를 이용한 인체 내 약물전달 기구, 잉크젯 프린터의 미세 노즐의 유량제어 등 그 응용분야가 매우 넓다[19,20]

현재 cMUT는 아직도 발전 단계에 있는 신기술이고 그 적용 분야도 매우 넓을 것으로 인식되고

있기 때문에 국내에서도 비파괴 및 초음파 관련 분야에 cMUT 연구가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이에 따라 본연구진은 cMUT를 개발하기 위하여 cMUT의 미소 진동 박막의 거동을 이론적으로 분석하고 cMUT 설계에 필요한 인자들을 고찰하고 분석하기 위한 연구[21]와 cMUT 제작에 필요한 미세제조공정 기술에 대한 연구[22]를 수행한 바 있다. 본 연구는 그 동안의 본 연구진의 연구결과[21,22]를 바탕으로 cMUT를 제작하여 그 특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 제작된 미소 진동 박막의 변위를 측정할 수 있는 마이켈슨 간섭계를 구성하여 변위를 측정된 다음 이론적인 해석결과와 비교하였다. 또한 cMUT에서 발생하는 초음파를 수신하기 위한 전하증폭기를 제작한 다음 초음파 송수신 시스템을 구성하여 cMUT에서 발생하는 초음파 진폭과 주파수 특성을 분석하였다.

2. cMUT 설계 및 제작

본 연구진이 보유하고 있는 반도체 제작공정의 여러 가지 조건을 감안하여 Table 1에서와 같은 cMUT 설계사양을 고려하였다. cMUT의 진동 막은 Si_3N_4 로 제작되었으며 직경 $45\mu m$, 두께를 2000 Å 및 4000 Å의 두 종류로 하였으며 진동 막과 진동 막의 간격은 $15\mu m$ 로 하여 설계하였다. 진동 막과 하부 전극사이의 간격은 3000 Å으로 하였으며 상부 전극은 두께 2000 Å의 알루미늄으로 하였다. 상기의 설계 조건을 고려하여 설계된 cMUT의 개략도와 구조는 Fig. 1 및 2에서 보는 바와 같다. Fig. 1은 cMUT의 진동 막의 개수가 8×8 인 구성의 1-D array cMUT를 나타낸다.

Table 1 Specifications of the cMUT

Item		Dimension	Material
membrane	diameter	$45\mu m$	Si_3N_4
	thickness	2000 Å, 4000 Å	
	spacing	$15\mu m$	
air gap		3000 Å	
upper electrode	thickness	2000 Å	Al
	diameter	22.5, 26.6, $30.2\mu m$ (25%, 35%, 45%)	

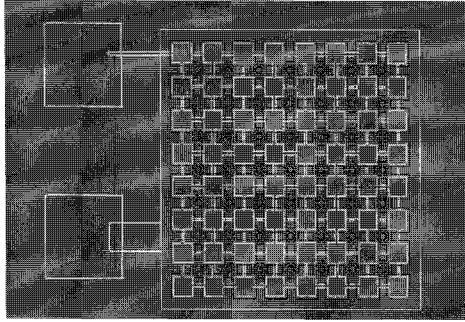


Fig. 1 Layout of the cMUT cell

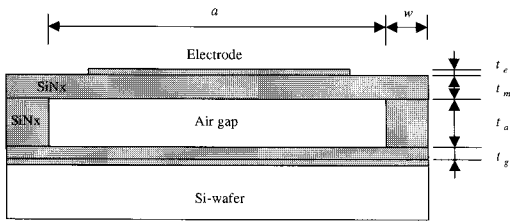


Fig. 2 Cross-section view of the single circular membrane

6인치 웨이퍼에 각각의 cMUT cell과 1-D array를 배치시키고 공정순서에 따라 각각의 7인치 포토 마스크를 제작하였다. Table 2에 대표적인 64 × 64 1-D array cMUT를 제작하기 위한 마스크 순서 및 설계 규격을 나타내었다.

cMUT의 제작은 본 연구의 선행연구[22]에서 개발된 미세제작 공정을 적용하여 Fig. 3에서와 같은 공정 순서로 cMUT 소자를 제작하였다. 소자의 제작공정은 P형 (100)방향의 6인치 실리콘 웨이퍼로 비저항은 1~10Ωcm이고 웨이퍼 두께는 650±25μm인 단면 polish된 웨이퍼를 사용하였다. 먼저 초기 웨이퍼 세정공정을 진행하였다. 표준 세정방법을 이용하여 SC-1(standard cleaning-1) 공정을 하였다. 용액 조성비는 NH₄OH:H₂O₂:H₂O=1:1:6으로 6

0℃에서 30분 동안 수행하고 D.I water로 씻어 낸 후 건조하였다. 그 후 80℃ 황산 용액조에서 10분간 담아둔 후 꺼내어 린스한 후 건조 시켰다. 자연 산화막을 제거하기 위하여 HF:H₂O=1:50 용액조에 10초간 넣었다가 꺼내어 린스 후 건조 시켰다. 웨이퍼 세정 후 열산화막을 수직형 고로를 이용하여 950℃에서 1200Å 두께로 성장시켰다. 그 후 하부 전극을 두 종류로 하여 각각 형성시켰다. 첫 번째는 백금 전극을 하부전극으로 사용하기 위하여 먼저 ALD(atomizer layer deposition)장비로 Al₂O₃ 박막을 500Å 증착시키고, 그 위에 Ti를 300Å 두께로 전자선 진공증착한 후 Pt를 2000Å의 두께로 전자선 진공증착 하였다. 두 번째는 LPCVD 장비로 P-도핑된 폴리실리콘을 500℃에서 2000Å 두께로 증착시켰다.

하부전극과 희생층의 보호막으로 실리콘 질화막(Si₃N₄)을 수직형 LPCVD장비로 780℃에서 2000Å의 두께로 증착시키고 희생층인 실리콘 산화막(SiO₂)은 TEOS(Tetra-Ethyl-Ortho-Silicate)를 이용한 PECVD 장비로 250℃에서 3000Å 두께로 증착하고 포토리소그래피한 후 건식식각으로 희생층의 패턴을 형성하였다. 그 위에 미소 진동 박막 층으로서 잔류응력을 줄인 실리콘 질화막을 LPCVD로 4000Å 두께로 증착하였다. 희생층을 제거하기 위하여 작은 구멍 비아(via) 패턴을 포토리소그래피로 형성한 후 BOE(Buffered Oxide Etch) NH₄F:HF=6:1를 이용해서 습식 식각하여 희생층인 실리콘 산화막을 제거하였다. PECVD로 실리콘 산화막을 1μm 증착시켜 비아를 막고(진공밀봉) 하부 전극 패턴을 포토리소그래피로 형성한 후 건식식각으로 하부전극을 완성하였다. 스퍼터링으로 알루미늄 박막을 올린 후 (2000Å) 상부 전극으로서의 패턴을 형성한 후 AL-12SK 용액으로 습식 식각 하였다. 그 다음 와이어 본딩 전극을 형성하기 위하여 기저층으로 Ti

Table 2 Mask design of the cMUT

Mask No.	Use	Materials	Dimension(μm ²)
Mask 1	Sacrificial layer	SiO ₂	45 x 45, 15 μm(spacing)
Mask 2	via hole	Si ₃ N ₄	2 x 2
Mask 3	Layer to cover via hole	SiO ₂	11 x 11
Mask 4	Bottom electrode	Poly-Si, Pt	3865 x 3865
Mask 5	Upper electrode	Al	25 x 25, 35 x 35, 45 x 45
Mask 6	Electrode pad	Ti, Au	150 x 150

를 300Å, 그 위에 Au를 2000Å 두께로 각각 전자선 진공 증착하고 lift-off 패터닝 하였다. 그리고 RTA (Rapid Thermal Annealing)를 600°C에서 10초간 실행하였다. Fig. 4는 공정순서에 따른 소자의 단면을 보여주는 개략도이다.

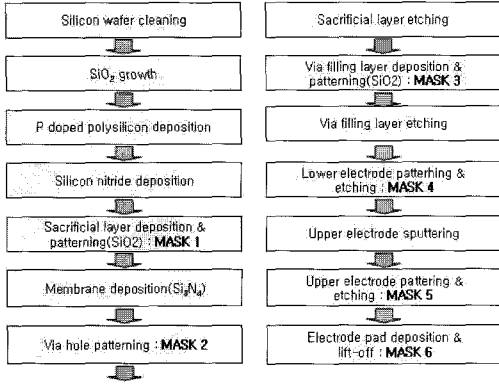


Fig. 3 Process flow chart for fabrication of the cMUT

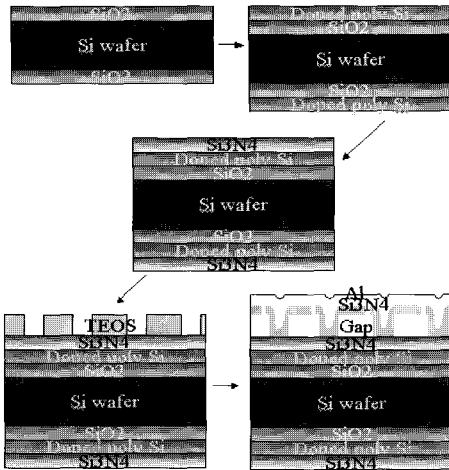


Fig. 4 Schematic diagram of the cMUT fabrication process

최종적으로 실리콘 웨이퍼 위에 형성된 cMUT는 Fig. 5에서 보는바와 같다. cMUT의 미소 진동 박막과 전극 패턴이 잘 형성되었는지 검토하기 위하여 cMUT의 표면을 광학 현미경으로 측정한 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 그림에서 상부 전극(Al), 미소 진동 박막, 비아(via hole)이 잘 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한 cMUT의 단면을 검토하기 위하여 focused ion beam으로 단면을 처리하여 측정한 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같다. cMUT 소자 구조에

서 상부 및 하부전극, 공기층, 미소 진동 박막(Si₃N₄)들이 잘 형성되어 있는 것으로 나타났다.

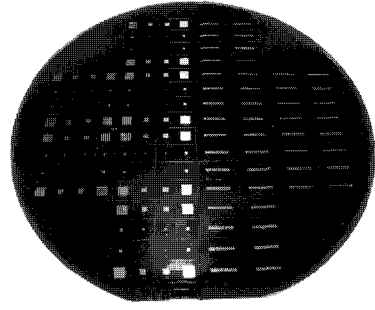


Fig. 5 6" wafer with the various cMUT cell structures

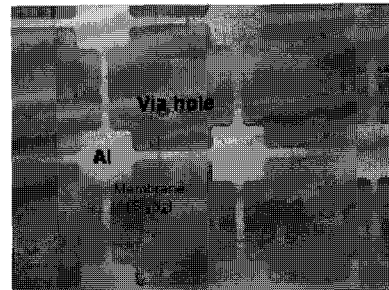


Fig. 6 Photograph of the cMUT



Fig. 7 FIB (focused ion beam) image of the cMUT cross section

Fig. 8은 제작된 cMUT를 전하증폭기가 내장된 회로기판에 접합하여 최종인 센서로 사용하기 위한 그림을 나타낸다.

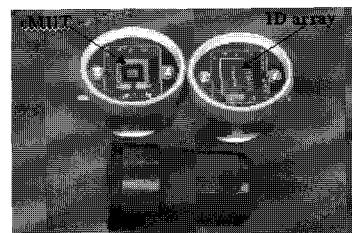


Fig. 8 Package of the cMUT on the PCB

3. cMUT를 이용한 초음파 송수신 특성 분석

제작된 cMUT의 초음파 특성을 평가하기 위하여 진동 막의 변위, 송수신되는 초음파를 측정하고 분석하기 위한 구성하였다.

3.1. 미소 진동 막의 변위 측정 시스템

cMUT를 구성하는 진동 막의 직경이 $45\mu\text{m}$ 이고 막과 막 사이의 간격이 $15\mu\text{m}$ 에 불과하므로 변위 측정을 위한 레이저 빔을 집속하여 빔의 초점 크기를 진동 막의 직경보다 작게 하여야 한다. 또한 $64\times 64(4096)$ 개의 진동 막들의 변위를 측정하기 위해서는 미세 이동 조작이 가능한 스캐닝 시스템을 제작하였으며 시스템의 제어와 측정 결과의 획득 및 저장을 위한 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 9에서 보는바와 같은 마이켈슨 간섭계를 구성하였다. 마이켈슨 간섭계는 두 개의 반사경과 이들 사이에 위치한 빔살 가르개를 기본 골격으로 한다. 파장이 633nm 인 He-Ne Laser로부터 나온 빛은 광섬유에 입력된 후 방향성 결합기에 의해 두 부분으로 나누어진다. 한쪽 부분은 위상변조기를 거쳐 광섬유 끝단에서 광섬유 coating mirror에 의해 반사되고, 다른 한 부분은 광 경로의 변위를 측정할 수 있도록 focuser가 연결되어 있다. 이 장치는 이렇게 두 부분으로 나누어진 빛을 각각 끝단에서 반사시켜 간섭을 일으킬 수 있도록 구성되어진 마이켈슨 간섭계이며, 특히 편광 유지 광섬유로 제작하였으므로 편광에 영향을 받지 않고 간섭이 잘 일어나도록 구성되었다. 또한 온도나 주변의 물리량에 의한 위상 이동(drift)을 보정할 수 있는 위상 보정 회로를 함께 포함하고 있다. 특히 제작된 간섭계에서는 집속된 빔의 직경이 매우 중요한데 -6dB 폭이 약 $5\mu\text{m}$ 정도이므로 직경 $45\mu\text{m}$ 의 진동 막의 변위 분포를 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

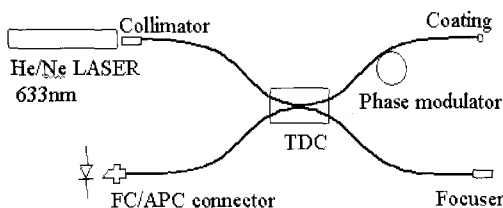


Fig. 9 Schematic diagram of Michelson PM fiber interferometer

Fig. 10은 진동 막의 미소 변위를 미세하게 측정하기 위한 3축 구동장치와 간섭계로 구성된 측정장치를 나타낸다.

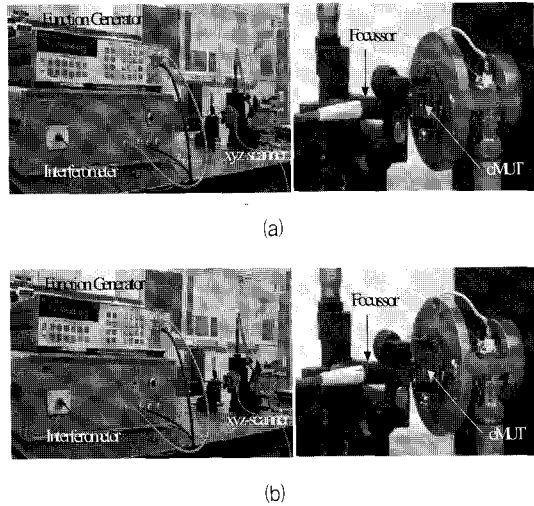


Fig. 10 Displacement measurement system using Michelson PM fiber interferometer. (a) Overview and (b) detail

3.2. 초음파 측정 시스템

Fig. 11은 cMUT의 구동과 신호 측정을 위한 전체 시스템의 구성도이다. cMUT의 구동을 위해서는 직류 바이어스 공급을 위한 직류전압(VDC) 공급장치와 진동 막의 진동을 유발하기 위한 교류전압(VAC) 공급장치가 필요하다. 직류전압과 교류전압을 함께 인가하는 이유는 인가하는 교류전압의 주파수와 동일한 주파수의 진동을 얻기 위한 것이 가장 큰 목적이다. 직류전압의 인가는 일반 전압공급기를 이용하였으며 교류전압을 인가하기 위해서 $100\text{kHz}\sim 12.5\text{MHz}$ 의 tone-burst 신호를 공급할 수 있는 미국 RITEC사의 RAM10000을 사용하였다.

한편, cMUT를 이용하여 수신되는 초음파를 감지하기 위하여 전하 증폭기를 제작하였다. cMUT는 외부에서 초음파 신호가 입력되면 미소 진동 박막이 진동하게 되어 두 전극간의 정전용량이 변하게 되는데 이에 따른 미소한 전하의 변화를 검출하기 위해서는 전하 증폭기가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 12와 같은 동작 전압이 직류 12V, 주파수 특성이 $100\text{kHz}\sim 2.25\text{MHz}$, Gain이 30dB 이상인 전하 증폭기를 설계·제작하였다.

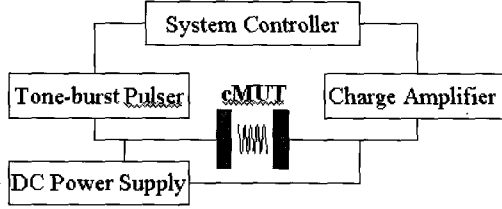


Fig. 11 Schematic diagram of the cMUT system for ultrasonic wave generation and detection

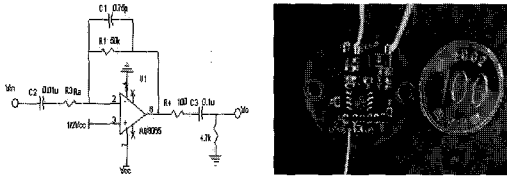


Fig. 12 Charge amplifier for the cMUT

4. 결과 및 고찰

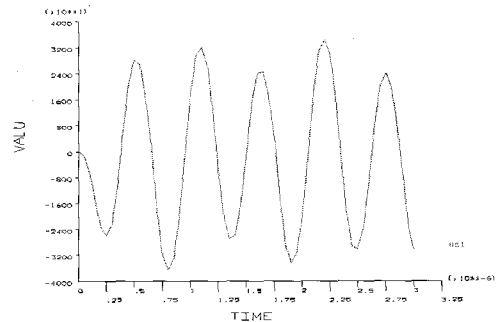
4.1. 미소 진동 박막의 변위 측정 및 분석

제작된 광 간섭계는 외부 교란이 없을 경우, 100 pm 이하의 변위까지도 측정할 수 있도록 설계되었기 때문에, cMUT의 경우 표면 변위가 낮은 공급 전압에서도 수 nm 이상임을 감안하면 충분히 cMUT의 변위를 측정할 수 있을 것으로 판단되었다.

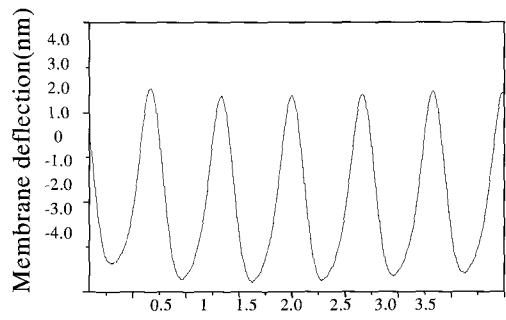
진동 막의 두께 4000 Å인 cMUT의 교류전압 인가에 따른 진동 막의 변위를 분석하였다. 이때 제작된 cMUT의 전극간 간격이 3000 Å로 매우 작으므로 직류 바이어스를 인가하지 않고 교류 전압만을 인가하여 진동 막의 변위를 분석하였다. 왜냐하면 본 연구의 선행연구[21]에서 분석된 이론적인 해석 결과를 제작된 cMUT에 적용하여 재해석한 결과 두께 4000 Å인 진동 막의 붕괴전압이 35V로 계산되었으며 직류 바이어스를 작게 하여 교류전압을 인가하게 되더라도 인가되는 직류 바이어스로 인하여 초기 변위가 유발된 상태에서 막이 진동하게 되어 진동 막의 변위가 붕괴 변위에 근접하거나 심할 경우 커패시터를 형성하는 cMUT의 전극간 간격을 넘어서는 경우가 발생하였기 때문에 해석이 불가능할 뿐만 아니라 인가되는 교류전압의 크기가 상대적으로 매우 작아 변위 프로파일을 분석하기가 곤란하였기 때문이다. 따라서 교류 인가전압의 피크값을 15 Volt로 고정하였으며 주파수는 본 연구진

이 현재 보유하고 있는 초음파 장비(RAM10000)의 특성을 고려하여 0.75 MHz로 하였다. 기존의 연구 [21]에서 제시된 유한요소모델에서 시간에 따른 교류 전압을 인가할 수 있도록 경계조건과 구속조건을 재 설정하였다. 이때 인가되는 교류전압은 2주기 동안의 시간을 인가하였으며 1/4 대칭 모델을 적용하여 transient 해석을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 13(a)에서 보는 바와 같다. 교류 전압에 의한 진동 막의 초기 변위를 0으로 기준을 설정한 다음 교류 전압의 크기 변화에 따른 진동 막의 진동방향이 위쪽일 때를 +, 아래쪽일 때를 -로 하여 나타내었다. 분석결과 위쪽 방향의 변위는 약 0.003 μm, 아래쪽 방향은 약 0.005 μm로 나타났다. 따라서 피크값이 15 Volt인 교류전압을 인가할 경우 전극간 간격(3000 Å)에 대한 변위는 약 1%~1.7% 정도로 나타났다.

이론적 해석과 동일한 조건을 적용하여 cMUT에 연속적인 교류전압을 가한 상태에서 표면 변위를 측정된 결과를 나타낸 결과 Fig. 13(b)에서 보는 바와 같다. Fig. 13(a)와 비교한 결과 거의 유사한 진동 막 변위 패턴을 나타내었으며 이로부터 이론적인 해석이 타당한 것으로 분석되었다.



(a)



Time (μs)

(b)

Fig. 13 Membrane displacement of the cMUT. (a) by FEM and (b) by measurement

4.2. 초음파 특성 평가

cMUT에서 발생된 초음파를 수신하여 그 특성을 평가하였다. cMUT를 이루고 있는 진동 막은 외부에서 공급하는 직류 바이어스와 교류펄스 세기의 곱에 비례하여 진동하기 때문에 이 둘 중 하나의 바이어스를 증가시키면 진동 막의 진동도 비례하여 커지게 된다. Fig. 14는 0.75 MHz의 교류펄스를 공급하고 수신한 초음파 신호의 모양과 주파수를 측정한 결과이며 공급하는 펄스의 진동수와 동일한 주파수로

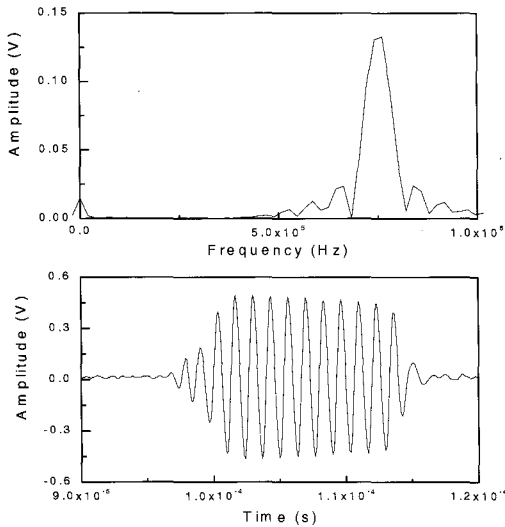


Fig. 14 Ultrasonic wave excited by cMUT its frequency spectrum

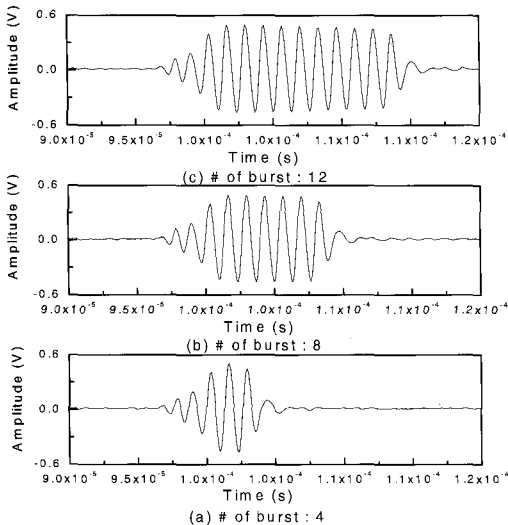


Fig. 15 Changes of signal amplitude by variation of tone-burst pulse width

진동막이 진동하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 15는 외부에서 공급하는 펄스의 폭을 변화시켜 가면서 수신한 신호를 측정된 결과이며 공급하는 펄스의 폭에 따라 정확하게 비례하여 수신되는 초음파의 폭이 증가하였다. Fig. 14와 15의 결과로부터 본 연구에서 개발된 cMUT의 진동특성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 앞으로 기존의 압전 초음파 센서를 대체하여 고효율 비접촉 초음파 송수신이 가능하여 활발한 응용이 기대되고 있는 미세가공 정전용량 초음파 센서(cMUT)를 개발하기 위한 연구로 수행되었다. 본 연구의 선행연구[21,22]의 결과를 바탕으로 cMUT를 설계한 후 미세 반도체 제작공정을 적용하여 실리콘 웨이퍼 위에 다양한 형태의 cMUT를 구현하였다. 제작된 cMUT의 표면과 단면을 분석한 결과 미소 진동 박막, 공기 층, 상하부 전극이 잘 형성되었다. 제작된 cMUT의 특성을 평가하기 위하여 진동 막의 변위를 측정할 수 있는 마이켈슨 위상변조 간섭계를 구성하였으며 cMUT 초음파 송수신 시스템을 구성하였다. 진동 막의 변위 측정결과 인가되는 교류전압의 주파수와 진동 막의 진동 주파수가 잘 일치하였다. 또한 비접촉 방법으로 cMUT에 의해 발생되는 초음파 신호를 수신하여 수신파형의 특성을 분석한 결과 양호한 주파수 특성을 나타내었으며 고효율의 비접촉 초음파 송수신이 가능한 것으로 분석되었다. 본 연구에서 설계·제작된 cMUT는 향후 비접촉식 초음파 응용분야에 다양하게 활용될 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] S. P. Kelly, R. Farlow, and G. Hayward, "Application of through-air ultrasound for rapid NDE scanning in the aerospace industry," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 43, No. 4, pp. 581-591, (1996)
 [2] A. Gachagan and G. Hayward, "Characterization of air - coupled transducers," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 43, No. 4, pp. 678-689, (1996)

- [3] G. Hayward and A. Gachagan, "An evaluation of 1-3 connectivity composite transducers for air-coupled ultrasonic applications," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 99, No. 6, pp. 2148-2157, (1996)
- [4] D. W. Schindel and D. A. Hutchins, "Applications of micromachined capacitance transducers in air-coupled ultrasonics and nondestructive evaluation," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 42, pp. 52-58, (1995)
- [5] P. R. Scheeper, A. G. H. van der Donk, W. Olthuis, and P. Bergveld, "Fabrication of silicon condenser microphones using single wafer technology," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 1, No. 3, pp. 147-154, (1992)
- [6] J. Guckel, "Surface micromachined pressure transducers," *Sensors and Actuators A*, Vol. 28, pp. 133-146, (1991)
- [7] K. Suzuki, K. Higuchi, and H. Tanigawa, "A silicon electrostatic ultrasonic transducer," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 36, No. 6, pp. 620-627, (1989)
- [8] M. I. Haller and B. T. Khuri-Yakub, "A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-6, (1996)
- [9] X. Jin, O. Oralkan, F. L. Degertekin and B. T. Khuri-Yakub, "Characterization of one-dimensional capacitive micromachined ultrasonic immersion transducer arrays," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 48, No. 3, pp. 750-760, (2001)
- [10] W. P. Mason, "Electromechanical Transducers and Wave Filters," New York : D. Van Nostrand, (1942)
- [11] I. Ladabaum, X. Jin, H. T. Soh, A. Atalar, and B. T. Khuri-Yakub, "Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 45, No. 3, pp. 678-690, (1998)
- [12] A. Bozkurt, I. Ladabaum, A. Atalar, and B. T. Khuri-Yakub, "Theory and analysis of electrode size optimization for capacitive microfabricated ultrasonic transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 46, No. 6, pp. 1364-1374, (1999)
- [13] O. Oralkan, X. Jin, F. L. Degertekin and B. T. Khuri-Yakub, "Simulation and experimental characterization of a 2-D capacitive micromachined ultrasonic transducer array element," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* Vol. 46, No. 6, pp. 1337-1340, (1999)
- [14] A. Caronti, A. Iula, G. Caliano, M. Pappalardo, "An accurate model for capacitive micromachined ultrasonic transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* Vol. 49, No. 2, pp. 159-168, (2002)
- [15] G. Caliano, A. Caronti, M. Baruzzi, A. Rubini, A. Iula, R. Carotenuto, and M. Pappalardo, "PSpice modeling of capacitive microfabricated ultrasonic transducers," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 449-455, (2002)
- [16] J. S. McIntosh, D. A. Hutchins, D. R. Billson, T. J. Robertson, R. A. Noble, and A. D. R. Jones, "The characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers in air," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 477-483, (2002)
- [17] O. Oralkan, A. S. Ergun, J. A. Johnson, U. Demirci, K. Kaviani, T. H. Lee, and B. T. Khuri-Yakub, "Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Next-generation arrays for acoustic imaging?," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 49, No. 11, pp. 1596-1610, (2002)
- [18] J. Johnson, O. Oralkan, U. Demirci, S. Ergun, M. Karaman, and P. Khuri-Yakub, "Medical imaging using capacitive micromachined ultrasonic transducer array," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 471-476, (2002)
- [19] G. Percin, L. Levin, and B. T. Khuri-Yakub, "Controlled ink-jet printing and deposition of organic polymers and solid-particles", *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 16, pp. 2375-2377, (1998)

- [20] G. Percin, L. Levin, and B. T. Khuri-Yakub, "Piezoelectrically actuated droplet ejector," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 68, No. 12, pp. 4561-4563, (1997)
- [21] 김기복, 안봉영, 박해원, 김영주, 이승석, "미세 가공 정전용량형 초음파 탐촉자 개발(I) - 진동막 거동분석", *비파괴검사학회지*, 24권 5호, pp. 487-493, (2004)
- [22] 김기복, 안봉영, 박해원, 김영주, 김국진, 이승석, "미세가공 정전용량형 초음파 탐촉자 개발(II) - 미세가공공정 분석", *비파괴검사학회지* 24권 6호, pp. 573-580, (2004)
- [23] X. Jin, I. Ladabaum, F. L. Degertekin, S. Calmes, and B. T. Khuri-Yakub, "Fabrication and characterization of surface micromachined Capacitive Ultrasonic Immersion Transducers," *IEEE J. Microelectromechanical system*, Vol. 8, No. 1, pp. 100-114, (1999)
- [24] S. M. Sze, "Semiconductor sensors," Wiley International, New York, (1994).
- [25] G. T. A. Kovacs, "Micromachined transducers sourcebook," McGraw-Hill, USA, (1998)
- [26] M. Elwenspoek, and H. V. Jansen, "Silicon micromachining," Cambridge Press, UK, (1998)