

碩士學位論文

마이크로센서 應用을 위한  
실리콘 微細加工 技術



濟州大學校 大學院

제주대학교 중앙도서관  
電子工學科

高 喜 善

1999年 12月

# 마이크로센서 應用을 위한 실리콘 微細加工 技術

指導教授 李 光 萬

高 喜 善

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1999年 12月



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

高喜善의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

1999年 12月

# Silicon micromachining Techniques for Microsensor Applications

Hee-Seon Ko

(Supervised by professor Kwang-Man Lee)




A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1999. 12.

# 목 차

Summary .....	1
I. 서 론 .....	2
II. 이 론 .....	5
2.1 실리콘 미세가공 기술 .....	8
2.2 실리콘 이방성 식각 .....	11
III. 제안한 TMAH 용액과 첨가물에 따른 실리콘 식각 .....	18
 제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY	
IV. 실험 .....	23
4.1 식각패턴 설계 및 제작 .....	23
4.2 식각 공정 .....	26
V. 결과 및 고찰 .....	28
5.1 TMAH 용액을 이용한 식각특성 .....	28
5.2 다양한 패턴에 따른 식각 변화 특성 .....	37
VI. 결 론 .....	50
참고문헌 .....	51

## Summary

Silicon micromachining technology can be used to build micromechanical sensors and actuators by using tools derived from standard integrated circuits(IC) processing. Processing developed for micromachining can also be used to add functions to IC. It is necessary to study the material, structure and property of a silicon micromachining technique and device based on it

For the undercutting etches presented in this thesis, 3, 5 and 10 weight percent of TMAH(tetramethylammonium hydroxide) solution, with 16 grams per liter of dissolved silicic acid, and 2 grams per liter of ammonium persulfate were used. TMAH concentration and combination of etchants provide repeatable etch properties, does not attack exposed aluminum or silicon dioxide, and provides smooth (100) silicon surfaces. The main advantage of TMAH-based solution is their full compatibility with IC technologies.

Various types of diaphragms are fabricated by silicon anisotropic etching. TMAH solution by dissolving silicon powder or silicic acid is used as etchant. The etch rate of (100) oriented silicon crystal planes is increased linearly with decreasing the concentration of TMAH solution and increasing TMAH solution temperature. And etch pits of silicon surface are decreased with increasing TMAH solution of concentration or the solution doped with silicon or silicic acid, in combination with persulfate used as an additive, therefore silicon or silicic acid doped TMAH solution is a useful post-processing etchant. TMAH solution has a reasonable etch rate, is selective to aluminum, silicon dioxide and silicon nitride, and most importantly, is safe to use and easy to dispose of.

This method enables new applications for micromachining, is currently underway to evaluate the use of these micromachining techniques.

## I. 서 론

실리콘을 기반으로 하는 반도체 센서 기술은 70년대 압저항력 압력 센서의 개발을 시작으로하여 80년대 중반이후 개발된 미세가공(micromachining) 기술 발전에 힘입어 하나의 칩에 여러 가지 기능을 갖도록 구현한 멀티 센서, 또는 집적회로가 함께 내장된 온 칩(on-chip) 스마트 센서(smart sensor) 기술로 발전하였다. 이러한 센서 기술은 반도체 집적회로 공정 기술을 이용하여 제작 할 수 있으므로 소형화 및 경량화가 가능하고, 신호처리 회로를 센서와 함께 내장할 수 있으므로 센서의 고성능화가 가능하다. 이러한 제작 방법은 반도체 집적 회로의 일괄 제조공정과 같이 집적회로 제조공정 기술과 미세가공 기술을 활용한 반도체 마이크로 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재의 센서 기술은 반도체 집적회로 기술이 주류를 이루고 있으며 마이크로머시닝 즉 미세가공 기술이 개발되기 시작했다. 표준 CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 공정 기술이나 표준 바이폴라(bipolar) 공정 기술과 호환성이 있는 열 트랜지스터의 연구·개발을 위한 시도가 활발히 이루어지고 있다 (Moser 등 1991). 이러한 소자들은 다이어프램(diaphragm), 브릿지(bridge) 및 캔틸레버(cantilever) 형태의 산화막이나 단결정 실리콘 구조로 되어있으며 적외선센서, 가스센서, 유량센서 또는 진공센서 등 마이크로 센서 응용에 중요한 역할을 하고 있다(Lenggenhager 등, 1992),(Qiu 등, 1995), (Kalvester 등 1994), (baltes and Moser, 1993),(Jaeggi 등 1992). 반도체 집적회로 제조공정 기술에 미세가공 기술이 접목되어 실리콘 식각속도의 이방성이나 불순물 농도차이 등을 이용하여 웨이퍼 상에 홈 및 피라미드 등과 같은 여러 가지 형태의 기계소자를 조립할 수 있게 되었으며 이렇게 만든 것을 “미세기계(micromechanical) 소자”라 한다. 구체적으로는 밸브, 스프링, 거울, 노즐, 코넥터 및 프린터용 헤드뿐만 아니라 힘, 압력 및 가속도 센서 등 매우 다양한 용도에 실리콘 웨이퍼에 이용되고 있다. 또한 실리콘 미세가공 기술을 이용하여 단일 기판 상에 지능화 센서 혹은 다기능 센서를 구현할 수 있는 등의 여러 가지 장점을 가지고 있다. 실리콘 미세가공 기술은 마

이크로 센서, 마이크로 구조 및 마이크로 시스템의 디바이스 제작을 위해 중요하다. 실리콘을 이용한 미세가공 기술 중에서 실리콘 이방성 식각 기술은 고성능 마이크로 센서나 액추에이터(actuator) 및 시스템 등의 MEMS(micro electron mechanical system)(Mehregany, 1993) 개발에 필수 불가결한 핵심기술로서 최근에 활발히 연구가 진행되고 있다. 미세가공 기술은 사진 식각 공정 기술과 박막 증착 공정의 조합이라고 할 수 있으며 매우 작은 크기를 가지는 삼차원적이고 기계적인 구조 제작이 가능하다.

일반적으로 미세가공 기술은 벌크(bulk) 미세가공 기술과 표면(surface) 미세가공 기술로 분류할 수 있다. 미세가공 기술에서 사용되는 물질들은 단결정 실리콘, 폴리머, 유리, 금속, 그리고 세라믹 등 다양하다(Hesketh and Harrison, 1994). 벌크 미세가공 기술은 특별한 방법으로 형성된 웨이퍼로부터 실리콘을 제거하여 3차원 구조를 만드는 기술로써 단결정 실리콘 식각에 기초를 두고 있다. 이 기술은 이방성 식각 용액을 개발하면서부터 시작되었으며 이와 함께 발전해 온 미세가공 구조는 실리콘 결정 또는 실리콘에 증착되거나 성장된 층 사이에 형성되었다. 반면, 표면 미세가공 기술은 기판의 표면에 증착되거나 성장된 박막 층을 이용하여 미세기계 디바이스들을 제작하는 기술로써 빔(beam), 베어링(bearing) 및 회전자(rotor)등을 형성하였다.(Sze, 1994). 벌크 미세가공 기술로써 미세구조의 개발에 가장 중요하고 광범위하게 사용되는 식각 기술로 크게 습식 식각(wet etch)과 건식 식각(dry etch)으로 나눌 수 있다. 습식식각에서 실리콘에 사용되는 식각 용액은 등방성(isotropic) 식각 용액과 이방성(anisotropic) 식각 용액으로 나눌 수 있으며 불순물의 농도와 식각 용액의 온도에 따라서 식각률이 변화된다. 단결정 실리콘에서의 이방성 식각 용액의 사용은 미세가공 된 센서나 액추에이터를 제조하는 중요한 기술중의 하나이다.

지금까지 가장 많이 이용된 식각 용액인 EDP (ethylenediamine pyrocatechol)(M.P.Wu 등, 1986) 용액 및 KOH (potassium hydroxide)(E.D.Palik 등, 1985) 용액은 제조 시 마스크 패턴의 후면정렬이 필요하고 이미 형성된 금속박막을 식각 용액으로부터 보호해야 하므로 일반적으로 알려진 표준 CMOS공정이나 표준 바

이폴라 공정을 활용하는데 커다란 문제가 되고 있다. 이러한 후면 마스크 정렬 및 알루미늄 금속 박막의 보호 문제를 해결하기 위하여 최근 암모니아 계열의 TMAH (tetramethyl ammonium hydroxide) 용액을 이용한 이방성 식각에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. TMAH 용액에 실리콘을 첨가하면 모든 공정이 마무리 된 후에 후면 마스크 정렬과 알루미늄 박막을 보호하기 위한 추가적인 막이 없이 식각할 수 있음이 최근 보고된 바 있다(Schakenberg 등,1991) 실리콘 이방성 식각액으로 최근에 빈번히 사용되고 있는 TMAH 용액은 Si 분말 또는  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 를 첨가 시 알루미늄 금속 배선을 해치지 않는 성질이 있다 이를 이용하여 제조공정이 모두 끝난 반도체 소자에 이방성 식각을 행할 수 있는 결과를 얻었다. 그러나 Si 또는  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 를 첨가함으로써 알루미늄 식각에 대한 영향은 개선되었으나 TMAH 용액에 비해서 식각률이 낮아지는 문제점과 식각 표면의 힐록 생성으로 식각 표면의 평탄도의 문제점을 갖는 결과를 보였다.

본 논문에서는 반도체 공정이 마무리된 후에 후면 마스크정렬과 알루미늄 박막의 보호 문제를 해결하기 위한 추가적인 막이 없이 식각 할 수 있는 Si 분말 또는  $\text{Si}(\text{OH})_4$ (silicic acid)가 첨가된 TMAH 용액에 대해 연구하였다(Schakenberg 등,1991). 이 경우 나타나는 식각률의 저조 및 식각 표면의 문제점을 해결하기 위해 계면 활성제인 APODS (ammonium peroxydisulfate)를 적정량 첨가하여 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$ +APODS 용액의 실리콘 이방성 식각 특성을 행한 결과 식각 표면의 힐록을 감소시킬 뿐만 아니라 TMAH+Si 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$  용액에 비해 식각률이 개선된 결과를 얻었다. TMAH 용액은 알카리 이온에 의한 오염이 없고 집적화 미세가공 기술 공정에 사용이 가능하며 Si 또는  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 에 첨가로 인해 금속 배선인 알루미늄에 대한 선택비가 좋으며 다른 식각 용액에 비해 보다 안전하고 시간에 따라 균일한 식각률을 가짐을 알 수 있었다. 이를 통해 집적회로 공정과 뛰어난 호환성을 갖는 TMAH+Si 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$ +APODS 용액 특성에 관련하여 마이크로 센서 응용을 위한 실리콘 이방성 식각 조건을 제시하였다.



## II. 이 론

반도체 공학은 1947년 트랜지스터가 발명된 이후 경이적인 발전을 거듭하여, 1 제곱센티미터의 면적에 10억개 정도의 트랜지스터로 이루어진 초대규모 집적 회로(ULSI: ultra large scaled IC)를 만드는 수준으로 발전하였다. 현재 제작되는 거의 모든 전자 소자에는 반도체 물질이 이용되고 있다. 반도체 물질은 전기적으로 금속과 절연체의 중간정도의 성질을 지니고 있으며 도핑(의도적인 불순물의 첨가), 빛 및 열 등의 여러 조건에 따라 전기적 특성을 크게 변화시킬 수 있다. 반도체 물질이 갖는 이러한 특성 때문에 다양한 기능이 요구되는 전자 소자를 만드는 데 있어서 반도체 물질이 핵심요소가 되고 있다 물론, 일정한 고유한 성질을 지니고 있는 금속이나 절연체도 전자 소자를 만드는 데 있어서 꼭 필요한 물질이다.

미세가공 메카니즘의 기본은 주원료인 반도체 물질인 실리콘이 있다. 실리콘은 원자번호 14번으로 최외각에 4개의 전자가 있는 4가의 원자이다. 한 개의 실리콘 원자는 주변 4개의 원자와 공유결합을 하여 안정한 상태를 이루는데 이들 중 하나가 다른 불순물 원자와 대체되면 최외각 전자개수가 많아지거나(n-형 반도체) 적어지게(p-형 반도체) 된다. 또한 단일 격자구조를 갖는 실리콘의 결정학적인 구조는 다이아몬드 구조이며 그림 1과 같다. 실리콘은 금속과 비금속 사이에 있는 반도체 물질중의 하나이며 기계적 응력에 저항력을 갖는 고강도의 물질이다. 오늘날 반도체 소자 제조용 재료로서 광범위하게 사용되고 있는 실리콘은 쉽게 산화되며 공기중에 노출 시 실리콘 산화막( $\text{SiO}_2$ )을 형성한다. 실리콘 산화막은 화학적으로 안정하고 전기적으로는 절연 특성을 갖고 있다.

실리콘 웨이퍼는 고순도의 다결정 실리콘을 용융 시켜 특정 방향으로 성장시킨 단결정 실리콘으로서, 이 성장 방향은 미세구조 기기 제조과정의 기계적 성질, 확산 및 식각 등에 영향을 준다. 실리콘은 넓은 에너지 밴드 갭(1.2eV)을 가지고 있기 때문에 비교적 고온(200℃ 정도까지)에서도 소자가 동작할 수 있다

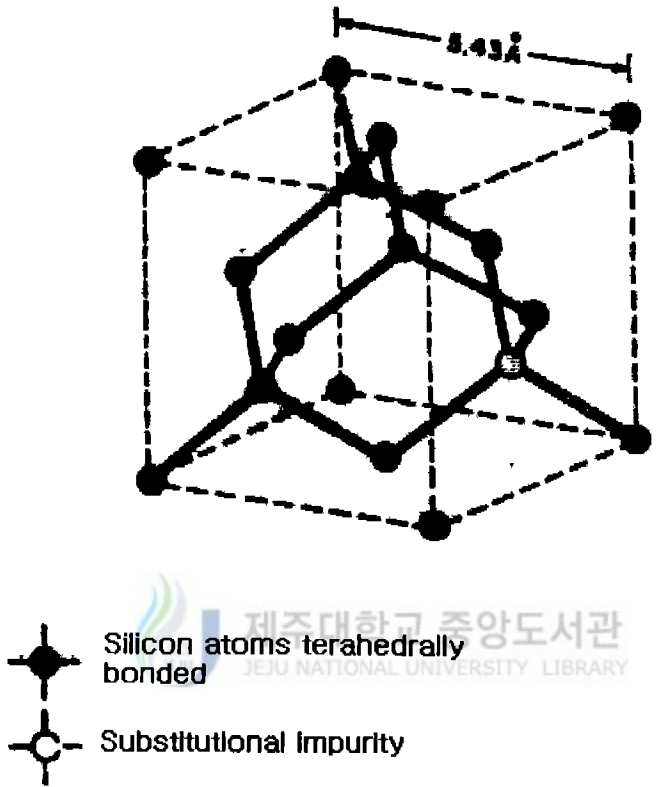


Fig 1. Crystalline silicon has diamond structure.

그림 2는 대표적인 실리콘의 결정면을 나타내고 이 그림에서 x축, y축 및 z축 방향으로 교차하는 평면의 위치를 나타내었다. (100) 면은 세 좌표축 중에서 한 개만 교차하는 경우이며, (110) 면은 두 개의 좌표축과 교차하고, (111) 면은 세 개의 좌표축과 모두 교차하는 경우이다.

실리콘 웨이퍼 표면의 상태는 전기적 상태를 결정하는데 많은 영향을 미친다. <100>방향을 가지는 면에 대해서는 화학적으로 비교적 안정적이며 <111>방향의 표면은 활성화도(activation)가 비교적 높은 값을 갖는다. 위와 같은 결과가 생기는 이유로는 실리콘이 다이아몬드 결정 구조를 가지며 <100> 방향에 대한 식각률은 <111> 방향에서 보다 조금 높으며 이 두 방향은 <111> 방향에 보다 적어도 10 배 이상의 아주 높은 식각률을 가지고 있다(Ristic, 1994).

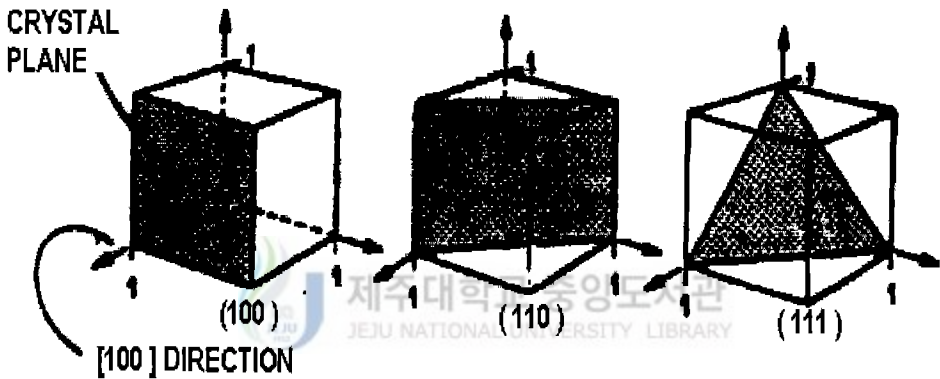


Fig. 2. Typical crystal planes of silicon.

## 2.1 실리콘 미세가공 기술

실리콘 미세가공 기술의 목적은 기판으로부터 선택적으로 실리콘을 제거하는 데 있다. 이러한 미세가공 기술은 크게 벌크 미세가공 기술과 표면 미세가공 기술로 분류할 수 있으며, 미세가공 기술에 사용되는 물질들은 다결정 실리콘, 폴리머, 유리, 금속 그리고 세라믹 등 다양하다. 그림 3은 벌크 미세가공 기술과 표면 미세가공 기술을 나타내었다. 그림 3(a)의 벌크 미세가공 기술은 특별한 방법으로 형성된 웨이퍼로부터 실리콘을 제거하여 3차원 구조를 만드는 기술로서 단결정 실리콘 식각에 기초를 두고 있다. 이 기술은 이방성 식각액을 개발하면서 부터 시작되었으며, 이와 함께 발전해 온 미세가공 기술은 그림 3(a)와 같이 실리콘 결정 또는 실리콘에 증착되거나 성장된 층 사이에 형성되며, 식각액에 따라 여러 가지 형상의 미세소자를 제조할 수 있다. 벌크 미세가공 기술은 미세구조의 개발에 가장 중요하고 광범위하게 사용되는 식각 기술이다. 식각 기술은 크게 습식 식각과 건식 식각으로 나눌 수 있다. 건식 식각은 고순도의 산을 사용하지 않아 수율과 생산고가 높으나 많은 공정변수나 복잡한 화학 및 물리 반응을 수반하는 등의 문제가 있다.

반면에 표면 미세가공 기술은 기판의 표면에 증착되거나 성장된 박막층을 이용한 미세가공 기술로써 희생층(sacrificial layer)을 이용하여 미세기계기기를 제작하는 기술이다. 마이크로 센서 등의 고기능화된 MEMS 제작에 있어서 중요한 제조 공정으로 희생층 산화막을 식각하여 실리콘 미소 구조체를 기판으로부터 떼어낼 때 기존의 희생층 산화막을 식각함으로써 미세 기기를 제작하는 기술로 그림 3(b)와 같다. 이러한 표면 미세가공 기술은 빔, 베어링 회전자 등을 형성하는데 사용되어 진다.

표 1은 벌크 미세가공 기술과 표면 미세가공 기술을 비교하였다. 벌크 미세가공 기술의 주재료는 실리콘을 사용하지만 표면 미세가공 기술에서는 폴리실리콘을 사용하며 표면 미세가공 기술의 희생층으로는 PSG(phosphorsilicate glass) 또는  $\text{SiO}_2$ 를 이용한다. 벌크 미세가공 기술은 비교적 큰 수백  $\mu\text{m}$ 의 크기를 만드는데

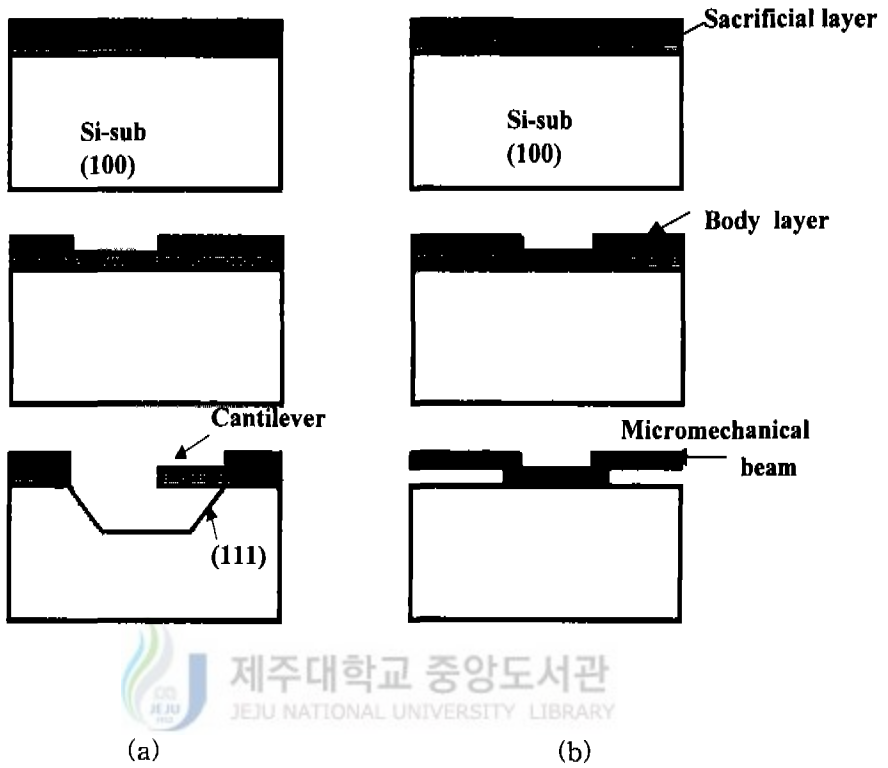


Fig. 3. (a) Bulk micromachining, (b) surface micromachining

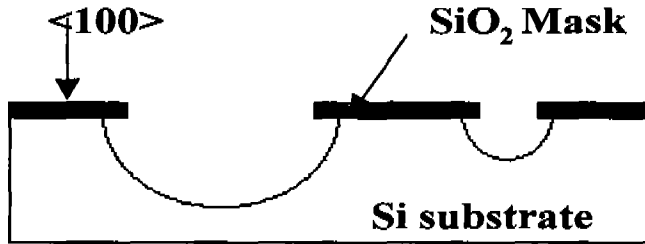
사용하지만 표면 미세가공 기술은 수  $\mu\text{m}$ 의 작고, 세밀한 모양을 만드는데 이용된다. 제조시 벌크 미세가공 기술에서는 전면 공정과 후면 공정 둘 다 가능하지만 표면 미세가공 기술은 전면 공정에 쓰인다. 벌크 미세가공 기술은 결정 방향에 따라 식각되는 이방성 식각에 많이 사용되는 반면, 표면 미세가공 기술은 주로 등방성 식각에 사용된다.

Table 1. Bulk vs. surface micromachining

Features	Bulk micromachining	Surface micromachining
<b>Core material</b>	Silicon	Polysilicon
<b>Sacrificial layer</b>	-----	PSG(SiO <sub>2</sub> )
<b>Size</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Large(typical cavity dimensions are several hundred <math>\mu m</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Small(high precision controlled by thickness of the film. typical dimensions are several <math>\mu m</math>)</li> </ul>
<b>Processing factors</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Single or double side processing(front and back side)</li> <li>· Selectivity in material etching Etching: anisotropic (dependent on crystal orientation)</li> <li>· Etch stops</li> <li>· Patterning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Single side processing(front side)</li> <li>· Selectivity in material etching · Etching : isotropic</li> <li>· Residual stress in films ( depends on deposition, doping, annealing )</li> </ul>

## 2.2 실리콘 이방성 식각

습식 식각에서 실리콘에 사용되는 식각 용액은 등방성 식각 용액과 이방성 식각 용액으로 나눌 수 있다. 불순물의 농도와 식각 용액의 온도에 따라서 식각률이 변화된다.



(a)



(b)

Fig. 4. Wet etching chemically etched hole geometries which are commonly used in micromechanical devices (a) Isotropic etching with agitation, (b) Isotropic etching without agitation.

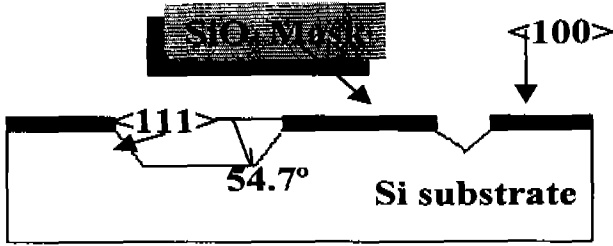
등방성 식각은 결정축의 면에 관계없이 어느 면으로도 동일한 속도로 식각되며 식각액으로는 HF(hydrofluoric acid), HNO<sub>3</sub>(nitric acid) 및 HNA(HF +HNO<sub>3</sub> +C H<sub>3</sub>COOH(acetic acid)) 등이 있다. 그림 4는 등방성 식각액에서 식각 된 단면이며, (a)는 식각 용액의 교반에 의한 불규칙한 식각률을 보이고 있지만 (b)에서는 일정한 식각 용액의 침투로 인해 균일한 식각률을 보이고 있다. 하지만 후면의 언더 컷팅(undercutting)과 식각 면적의 제어가 어려워 등방성 식각액은 종종 미세가공 기술에서 제외된다.

미세가공 기술은 등방성 식각액보다는 이방성 식각액을 많이 사용한다. 실리콘 이방성 식각은 방향성을 갖고 실리콘을 선택적으로 습식 식각하는 공정으로 1960년대말부터 1970년대 초에 보고되었다. 그러나 이 기술의 무한한 잠재력에 대한 인식은 1970년대 말에서 1980년대 초에서야 비롯되었다.(Ristic, 1994),(Gardner, 1994) 습식 이방성 식각은 식각 용액을 사용하여 물질이 선호하는 방향으로 식각하는 방법으로 미세가공 구조를 실현하는데 잘 확립된 기술이며, 여러 가지 소형 센서들의 제작에 사용되는 가장 중요한 공정중의 하나이다.

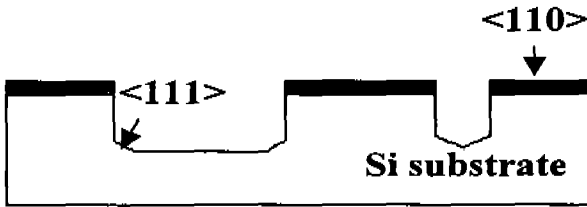
실리콘 이방성 식각은 결정면 방향에 대한 실리콘 식각률, 불순물 도핑 정도에 따른 식각률, 외부 바이어스(bias)의 적용 등에 의존하며 자동적인 식각정지 메카니즘으로써 사용될 수 있다. 이방성 식각액은 식각률이 실리콘의 결정 방향에 크게 의존하는 기본적인 성질을 가지고 있으며, 실리콘의 결정에서 (111)면의 식각률은 다른 모든 결정면들보다 낮은 식각률을 가지고 식각된다. 이것은 용해물이 실리콘 웨이퍼의 결정방향에 대한 함수이기 때문이라고 알려져 있다. 정량적으로 이방성 식각은 원자의 단위면적에 대한 밀도의 함수이다 (Hesketh and Harrison, 1994), (Merlos 등 1993).

그림 5는 두 종류 웨이퍼의 식각 모양을 보여 주고 있다. 웨이퍼의 일부는 식각 마스크로 보호되고, 노출된 영역이 식각된다. <100>방향을 가지는 웨이퍼에 있어서 식각은 그림 5(a)에서 처럼 (111)면을 따라 진행되며, <100>과 <111>방향사이의 경사도는 54.74° 의 기울기를 가지고 식각이 진행된다. <110>방향을 가지는 웨이퍼의 경우는 그림 5(b)에서처럼 (111)면은 수직 방향이며 높은 종횡비(aspect

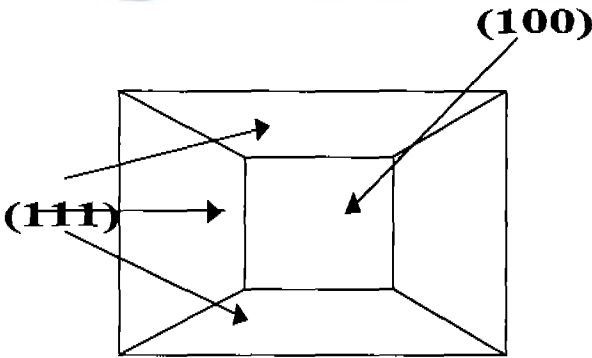




(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Anisotropic etching on (a) (100) surface, (b) (110) surface (c) top view schematics of the (100) surface.

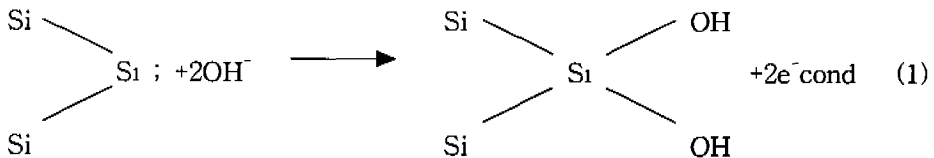
ratio)를 가지고 식각된다. 그림 5(c)는 그림 5(a)를 위에서 본 식각 모양을 나타낸 것이다. 위와 같은 결과가 생기는 이유로는 실리콘이 다이아몬드 결정 구조를 가지며 <100>방향에 대한 식각률은 <110>방향에서 보다 조금 높으며 이 두 방향은 <111>방향에서 보다 적어도 10배 이상의 아주 높은 식각률을 가지기 때문이다(Ristic, 1994). 실리콘 이방성 식각은 실리콘 센서의 구조 제작을 위해서 매우 중요하며, 집적회로 제조공정에서 사용되는 재료의 이방성 식각 기술에서 시스템의 집적을 가능하게 하기 위하여 기존 공정기술과의 호환성은 필수적인 요건이다. 그러나 이러한 조건은 현재 사용되고 있는 식각액으로는 항상 가능하지는 않다.

실리콘 이방성 식각 용액으로는 Hydrazine 용액, EDP(ethylenediamine pyrocatechol) 용액, KOH(potassium hydroxide) 용액, CsOH(cesium hydroxide) 용액, NH<sub>4</sub>OH 용액 및 TMAH(tetramethyl ammonium hydroxide) 용액 등이 있다(Wu and Ko, 1987), (Wu 등, 1986), (Seidel 등, 1990). 이방성 식각액중에 KOH 용액은 좋은 식각 표면과 낮은 독성을 지니고 있어서 가장 광범위하게 사용되고 있지만 Si/SiO<sub>2</sub>의 식각률 비가 낮고, 이동성 이온(K<sup>+</sup>)의 오염 때문에 습식 이방성 식각 후 몇 가지 열공정을 수행해야 하는 등 집적회로 공정과의 호환성에 문제가 있다(Camon and Mektadir, 1995). Hydrazine 용액과 EDP 용액의 경우는 용액의 특성이 불안정하고 인체에 유해한 성질을 지니고 있으며, CsOH 용액의 경우는 높은 가격 때문에 어려움이 있다(Yam 등, 1991). NH<sub>4</sub>OH 용액은 이온에 무관하고 집적회로 공정과 호환성이 있는 이방성 식각액으로 제안되었으나 특성이 좋고 힐복이 없는 표면을 얻기가 어렵다는 단점이 있다. TMAH 용액은 EDP 용액과 유사한 특성을 지니면서, 보다 안전하고 시간에 따라 균일한 식각률을 가지며 집적회로 공정과 뛰어난 호환성을 가지지만 가격이 높다는 단점을 가지고 있다(Merlose 등, 1993), (Acero 등, 1995). 하지만 이 식각 용액들은 실리콘 이방성 식각 공정에 모두 빈번히 사용되고 있으며, 제각기 특징을 지니고 있다. 표 2는 이러한 실리콘 이방성 식각에 쓰이는 대표적인 용액에 대한 특징을 명시한 것이다(Kurt, 1982).

Table 2. Comparison of properties of various anisotropic etchants  
(Kurt.1982)

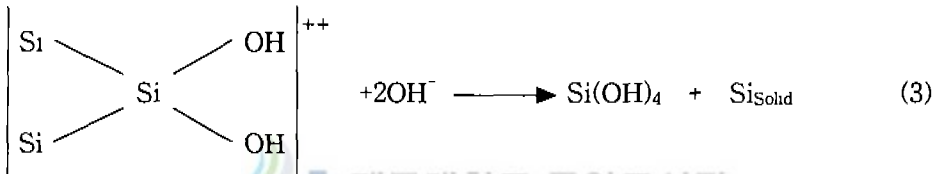
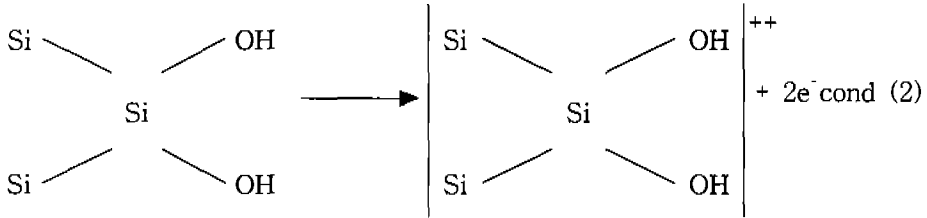
Etchant [Ref.]:	Si Etch Rate 80°C ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	SiO <sub>2</sub> selectivity	Aluminum selectivity	Relative safety	CMOS compatibility
KOH (20wt.%)	2	Low	Low	High	No
Ammonium hydroxide (3.7wt %)	0.5	High	Yes(with Si)	High	Yes
Hydrazine (35wt.%)	2	High	Yes(with Si)	Very Low	Yes
EDP	1.2	High	Yes	Low	Yes
TMAH (2wt.%)	0.8	High	Yes(with Si)	High	Yes

다음은 이러한 식각 용액에 대한 일반적인 실리콘에 대한 식각 메커니즘을 나타낸 것이다.

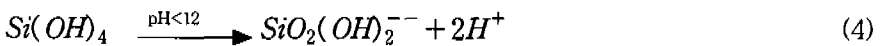


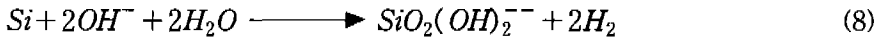
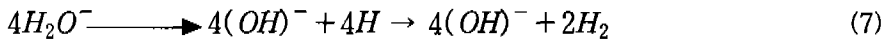
실리콘은 최외각에 4개의 전자를 채워져 있다. 물분자(H<sub>2</sub>O)의 OH<sup>-</sup> 이온이 실리콘

론의 dangling 이온과 결합하면서 두 개의 전자는 전도대로 투입된다. 이상의 반응식은 식(1)과 같다. 식 (2)는 Si(OH)<sub>2</sub>에 이웃하는 격자 원자들의 Si-Si의 결합은 가용성의 실리콘 화합물을 얻기 위해 파괴되며 양이온화 된다.



식(3)은 식(2)에서 형성된 실리콘 화합물은 두 개의 OH<sup>-</sup> 이온과 반응하여 가용성의 실리콘 화합물인 Si(OH)<sub>4</sub>를 생성한다. Si(OH)<sub>4</sub>는 확산에 의해 고체 표면 위에 생성된다. 그러나 높은 pH 벌크 전해용액에서 Si(OH)<sub>4</sub>는 식(4)와 같이 반응한다



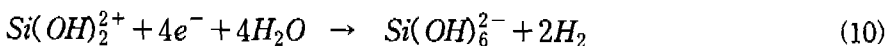


식 (5),(6) 및 (7)에서는 과잉전자가 물분자로 전달되어  $H^+$ 와  $OH^-$  이온을 형성한다. 이렇게 형성된  $OH^-$  이온은 Si 원자를 수화시키면서 Si 표면을 용해 가능한  $SiO_2(OH)_2^{--}$ 의 형태로 제거되면서 식각이 진행된다. 이 과정을 식 (8)에서 나타내고 있다.

### III. 제안한 TMAH 용액과 첨가물에 따른 실리콘 식각

TMAH 용액은 KOH 용액에 비해서 용액의 pH가 감소하면 할수록 킬록이 거의 형성되지 않으면서 (100) 식각면에서의 수소 발생을 무시할 수 있다. TMAH 용액에 실리콘을 첨가하면 알루미늄을 식각하지 않는 성질 때문에 후면 정렬과 같은 공정을 거쳐지 않고서도 모든 공정이 끝난 반도체 소자의 이방성 식각이 가능하다. 현재 가장 널리 쓰이고 있는 EDP 용액의 경우 가열시 발생하는 증기가 매우 유해하므로 안전에 유의해야 하는 단점이 있다. TMAH 용액의 경우는 EDP 용액과 거의 같은 식각 특성을 지니면서도 EDP 용액보다 안전하다는 측면에서 TMAH 용액이 유리하다. 그러므로 EDP 용액과 유사한 식각 특성을 지니면서 보다 안전하고 시간에 따라 균일한 식각률을 가지며 집적회로 공정과 뛰어난 호환성을 갖는 TMAH 용액을 선택하여 실리콘 이방성 식각을 하였다(Ristic, 1994).

pH의 농도에 따른 알루미늄 부식(corrosion)은 Pourbaix에 의해 연구 발표되었다(M. Pourbaix, 1996). 그림 6은 Pourbaix 다이어그램으로 알루미늄이 양극 성질인 중성 pH에서는 보호(passivation)되지만 알칼리성과 산성에서는 부식됨을 보이고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 pH 8~12의 농도에서는 알루미늄 식각률이 점차 감소되는데 이러한 감소는 실리콘에서 생성되는 실리카와 반응하여 알루미늄 실리카라는 박막을 형성하여 보호막의 역할을 하기 때문이다. TMAH 용액에서 알루미늄 보호막 증착을 위한 실리카는 실리콘의 첨가에 의한 형성될 수 있다 식(9)와 (10)은 실리콘을 용해함으로써 용액의 pH가 감소되며 알루미늄의 보호막인 실리카가 생성됨을 보이고 있다.



Potential(V) Relative to Standard Hydrogen Electrode

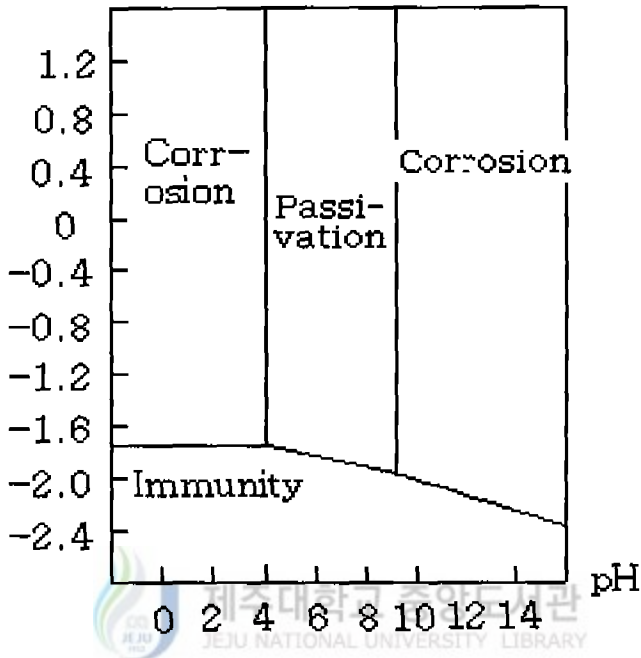


Fig. 6. A simplified Pourbaix diagram showing aluminum corrosion behavior as a function of pH and electrochemical potential at 25°C (P.Scheitzer, 1969).

위의 결과에서 TMAH 용액의 농도에 따른 적정한 실리콘의 양과는 비례관계를 알 수 있다. 그림 7은 실리콘의 양과 TMAH 용액의 농도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그러나 TMAH 용액에 과도한 실리콘의 첨가는 바람직하지 못하다. 왜냐하면 TMAH 용액에 실리콘이 첨가 시 용액의 pH값은 감소되며, 이것은 별

크 전해액에  $\text{OH}^-$  이온이 감소되면서 실리카 형성이 또한 감소되기 때문이다. 이로 인해 식각률이 감소된다.

KOH 용액과 비교하면 TMAH 용액 안에 수소발생은 <100>식각 면에서는 힐록의 형성을 무시할 수 있을 정도로 작다. 하지만 식각 용액이 pH 13이하일 경우 식각 시 힐록 형성에 의해 표면이 매우 거칠게 되며 식각 표면의 평탄도의 문제가 발생된다. 이러한 힐록은 실리콘이 TMAH 용액에 식각 시 식(11)과 같이 작은 수소거품을 생성하여 표면에 고착되면 실리콘 표면의 부분적 가상마스크(pseudo-masking)를 형성하며, 그림 8은 3wt.% TMAH 용액에 식각 시 노출된 실리콘 (111) 표면에 힐록의 형성을 보이고 있다. 현재 많이 쓰이는 식각 용액 중에서 KOH 용액도 낮은 식각 온도에서는 힐록을 형성한다.

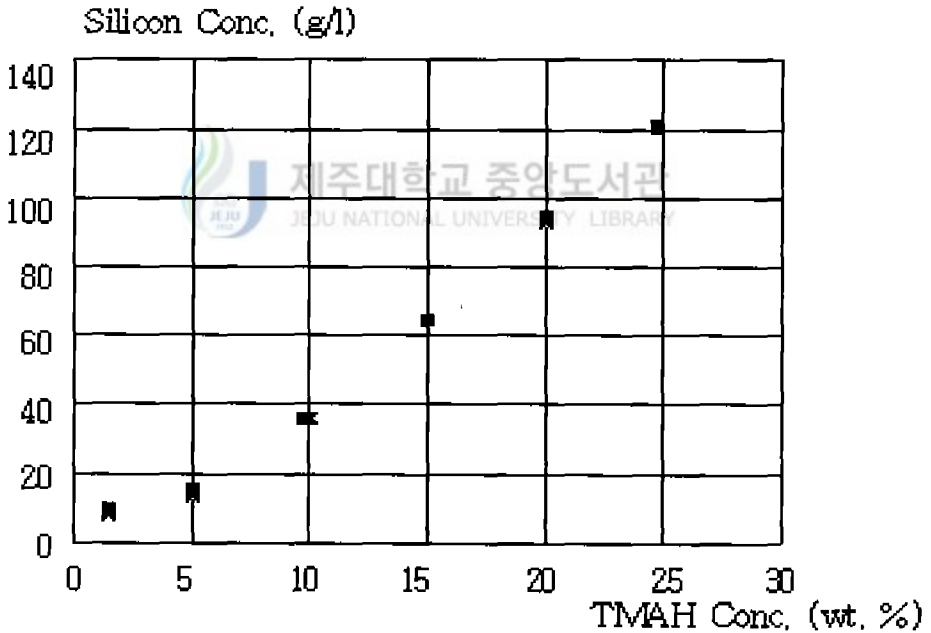


Fig. 7. The amount of dissolved silicon required to passivates exposed aluminum for various TMAH concentrations(Schakenberg 등, 1991).



KOH 용액일 경우 힐록의 형성을 감소하기 위해 농도를 증가시켜 거품의 평균 크기가 감소되면서 더 작은 흔적(footprint)을 발생시킨다. 결국 거품이 사라지는데 걸리는 잔여 시간(dwell time)을 짧게 함으로써 표면 상태를 좋게 하는 방법을 사용한다. 그러나 KOH 용액에서 힐록 현상을 없애기 위한 환경은 높은 산소 압력 하에서 산소가 포화 상태여야 하는데 부산물인 수소 가스와 반응 시 문제가 되므로 특별한 장치가 요구되며 화기성이 강한 물질이므로 위험하다는 문제점을 갖고 있다. TMAH 용액일 경우 잔여 시간을 감소시켜 표면에 거품이 고착되는 것을 막아 힐록의 형성을 억제할 수 있는데, 이것은 실리콘 표면의 습식 각(wetting angle)을 변화시켜야 된다. 이를 위해 계면 활성제를 첨가한다. 그러나 TMAH 용액에 계면 활성제의 첨가는 매우 민감한 반응을 보일 수도 있다.

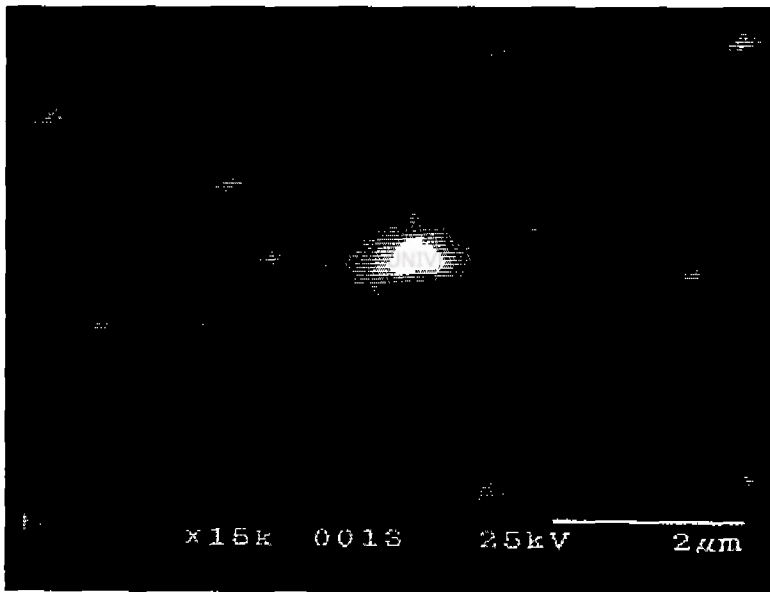
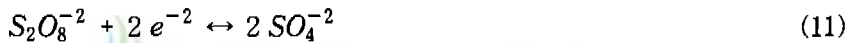


Fig 8. SEM photograph of top view of a silicon hillock which appeared after etching using 3wt.% of TMAH solution in deionized water (김영민, 1996)

예를 들어 FC\_129 같은 첨가물에 의해서는 식각 정지가 일어나는 원인이 되기도 하며 수용액의 초음파 교란으로 인해 수소 거품이 잔여 시간을 감소시킬 수 있으나 미세 기계 장치의 파괴를 가져올 수 있으므로 적당한 계면 활성제 선택이 필요하다. 계면 활성제로는 강력한 산화제인  $K_2S_2O_8$ (potassium peroxydisulfate),  $Na_2S_2O_8$  (disodium peroxydisulfate),  $(NH_4)_2S_2O_8$  (diammonium peroxydisulfate) 등이 있다. 이 세 가지 중 K와 Na를 포함하는 peroxydisulfate는 안정적이지만 이동성 이온에 의한 MOSFET의 게이트 전하축적으로 인하여 문턱전압 전위 현상의 원인이 되므로 CMOS 제조에 부적합하다. 그래서 다소 안정성이 떨어지고 보관 시 냉장고에 저장해야 하는 단점이 있지만 알카리 이온을 함유하지 않기 때문에 MOS 제조에는 적합한 APODS( $(NH_4)_2S_2O_8$ )를 사용할 수 있다 APODS는 식각 용액에 첨가하여 사용시 비교적 안전하며 폐기시 특별한 잔여물 문제가 없는 장점을 갖는다.



식 (11)는 이러한 계면 활성제 첨가에 따른 반응식이다. 그러므로 실리콘 또는  $Si(OH)_4$ 가 첨가된 TMAH 용액에 계면 활성제로 APODS를 사용하면 전면 식각 공정이 가능하며 식각률 및 알루미늄,  $SiO_2$  및  $Si_3N_4$ 에 대한 선택비가 좋으며 안정적이며 폐기하는데 쉬운 장점을 가지고 있다.

## IV. 실험

### 4.1 식각 패턴 설계 및 제작

본 연구에서는 센서 내부 또는 실리콘 기판과의 열적 차단을 위한 소자들에 널리 이용되고 있으며  $\text{Si}_3\text{N}_4$  및  $\text{SiO}_2$  막의  $\text{NON}(\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4)$  구조의 절연막을 갖는 다이아프램을 사용하였다. NON 구조의 절연막을 형성하기 위한 기판으로 결정면이 (100), 비저항이  $2\sim 3\Omega \cdot \text{cm}$ , 직경이 5인치, 두께가  $610\sim 640\mu\text{m}$ 인 붕소가 도핑된 p형 실리콘 웨이퍼를 사용하여 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$ +APODS 용액에서의 식각 특성을 분석하였다. 우선, 실리콘 기판 위에 NON구조의 절연체 박막을 적층하기 위하여,  $780^\circ\text{C}$ 에서 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 방법으로  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 층을 상하 각각  $1500\text{\AA}$ 씩 증착하였고, 중간에  $\text{SiO}_2$ 층은 APCVD(atmospheric pressure chemical vapor deposition)법을 이용하여  $4000\text{\AA}$  증착하였다.  $\text{SiO}_2$ 층과  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 층 두께의 합이  $7000\text{\AA}$ 이 되게 하여 샌드위치 형태로 적층된 절연층을 형성하였다. 이와 같이 형성된 NON 절연막 위에 사진 식각 공정을 통하여 패턴을 형성하였다. 건식식각과 습식식각을 번갈아 가면서 사용하여 NON 절연막의 패턴을 형성한 후 실리콘 이방성 식각을 행하여 NON 절연막 다이아프램을 제작하였다.

그림 9는  $\text{Si}_3\text{N}_4(1500\text{\AA})/\text{SiO}_2(4000\text{\AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(1500\text{\AA})$  적층 절연체 박막을 실리콘 기판 위에 CVD공정을 이용하여 증착한 후 NON 브릿지형 다이아프램 제조 공정을 보여주고 있다(김영민, 1996).

본 연구에서는 두 종류의 샘플을 준비하였다. 실리콘 위에 NON 절연막 구조를 갖는 다이아프램 위의 시험용 패턴을 사용, 실리콘 미세가공 후에 식각 변화를 및 표면상태를 평가할수 있는 그림 10의 마스크 패턴을 사용하였으며 그림 11은 알루미늄 박막에 대한 식각 변화 및 보호 특성에 대한 실험을 위해 알루미늄 배선이 들어간 MOSFET를 사용하였다.

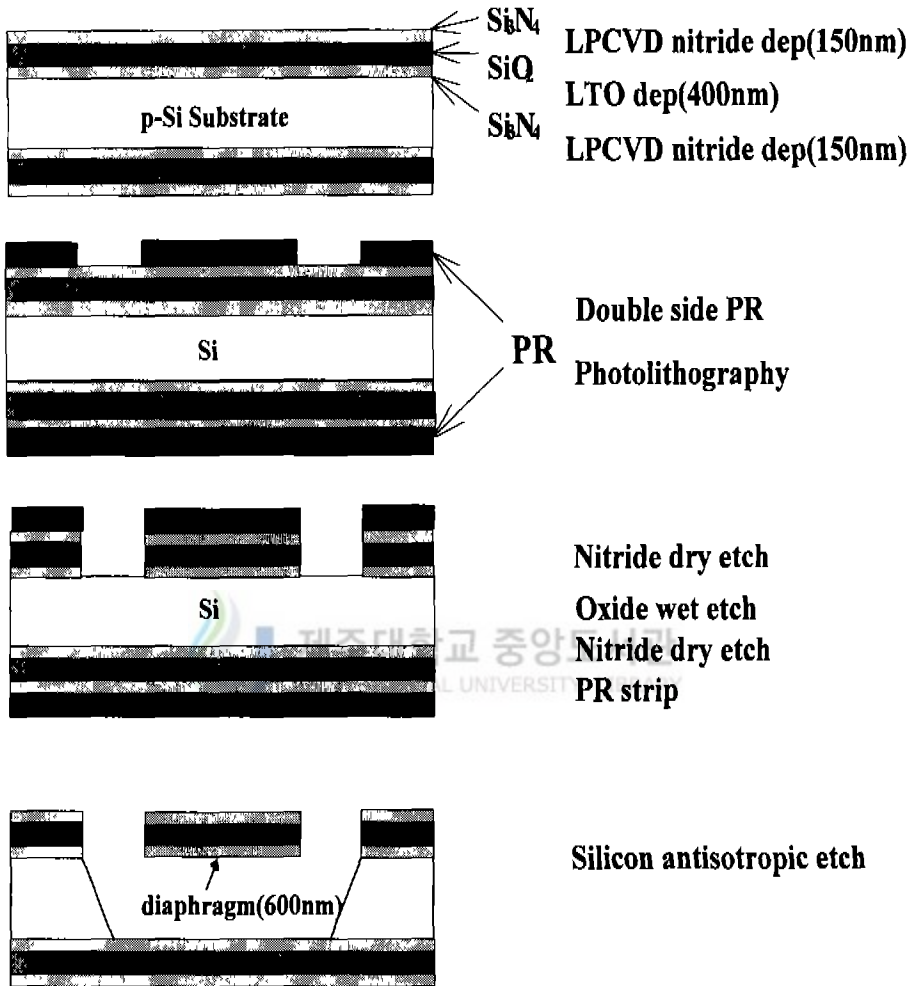


Fig. 9. Cross-sectional structure of insulator diaphragm using front-side silicon anisotropic etching techniques.



## 4.2 식각 공정

그림 12는 본 실험에 사용된 실리콘 이방성 식각 장치를 보여주고 있다. 반응조의 재질은 PYREX를 사용하였으며 냉각장치를 사용하여 반응조의 식각액 농도를 균일하게 유지시켰다. 반응조를 가열하기 위하여 온도변화가 약  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 갖는 항온수조(Model WB-31D, Jeio Tech Co)를 사용하였으며 실제 온도는 수은 온도계를 사용하여 측정하였다. 반응조의 용량은 300ml 정도이며 크기는 2인치 실리콘 웨이퍼나 조각 웨이퍼를 사용할 수 있는 크기로 하였다. 그림 12와 같은 이방성 식각 장치를 이용하여 TMAH용액에 대한 실험을 하였다.

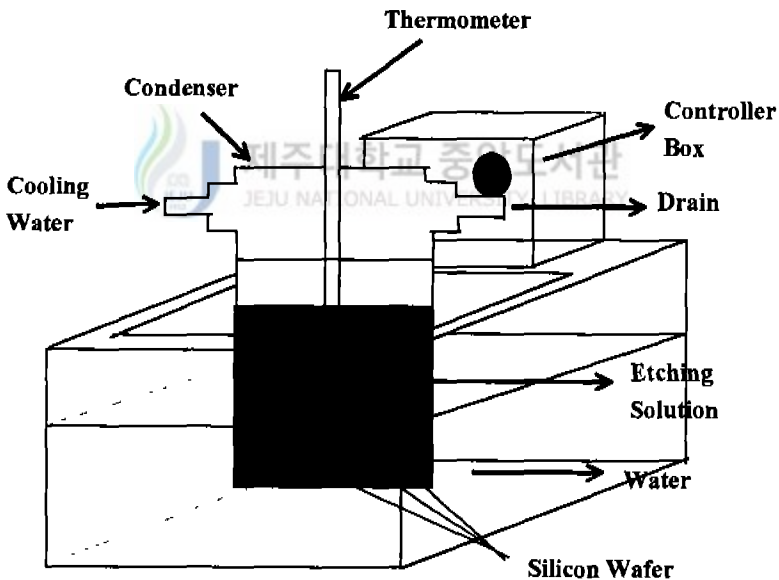


Fig. 12. Apparatus of silicon anisotropic etching system.

위의 식각 용액을 이용하여 실험에서는 먼저 TMAH 용액의 농도를 일정하게 유지한 상태에서 온도변화에 따른 식각률 변화, 둘째 온도를 일정하게 유지한 상태에서 TMAH 용액의 농도변화에 따른 시험용 패턴의 식각률 변화, 셋째 TMAH 용액에 실리콘 분말을 첨가했을때의 식각률 변화 및 표면 상태, 네째 실리콘 분말 대신  $\text{SiO}_4$ 와 표면 특성과 관련된 APODS 첨가시 식각 변화를 측정하였다 또한 테스트 패턴의 다양한 식각차과 결정 방향에 따른 식각 방향 및 식각 형태를 관찰하였다

실험에서 사용된 식각액은 TMAH (Aldrich 사제, 10wt.%) 용액을 탈이온수와 조합하여 3wt %, 5wt % 및 10wt.%의 용액을 제조하여 사용하였다. Si 분말 (Aldrich 사제, 325mesh, 99%), Silicic acid (Aldrich 사제,  $<20\mu\text{m}$ , 99.9% 이상) 및 APODS (Sigma 사제, 99.2%)를 적정량 TMAH 용액에 첨가하여 식각 용액을 제조하였다

5wt.% TMAH 용액에 리터당 6g의 Si 분말을 첨가하였다. 실리콘은 웨이퍼, 또는 웨이퍼 조각으로 첨가할 수 있으나 이러한 것들은 완전히 용해시키는데 수 시간이 걸리므로 가장 적절한 방법으로 Si 분말을 첨가시켰다. Si 분말은 웨이퍼 조각보다 급속하게 용해되며, 이러한 과정에서 생산되는 수소 가스는 많은 양의 거품 (bubbling)을 발생시킨다. 이를 억제하기 위해 비교적 낮은 온도인  $45^\circ\text{C}$ 에서 용해시켰다 하지만 Si 분말을 용해 시 완전히 용해하지 못하고 잔여 물질 등이 형성되는 문제점이 있다. 그래서 Si 대신  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 를 첨가함으로써 실리콘 표면상태에 영향을 줄일 수 있는 잇점이 있다. 본 실험에서는 리터 당 16g의  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 를 용해시켰다 힐록을 제거하기 위한 계면 활성제로는 TMAH+Si 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$  용액에 소량(2~5g/l)의 APODS를 적정량 첨가하였다. APODS를 희석시키기 위해 비교적 고온인  $85^\circ\text{C}$ 에서 스티어링(Stirring)을 이용하여 용해시켰다

측정 장치로는 광학 현미경(Bx60 Olympus Co) 및 전자 현미경(S-2460N, Japan) 등을 사용하였고, 식각된 표면의 특성 및 식각 깊이를 측정하였다.

## V. 결과 및 고찰

### 5.1 TMAH 용액을 이용한 식각 특성

그림 13은 다이아프램 및 캔티레버 구조 등 다양한 구조를 갖고 있는 시험용 샘플의 전자현미경 사진이다. 전체 크기는  $3000\mu\text{m} \times 3000\mu\text{m}$ 이다. 그림 13의 (1)~(9)는 패턴 모양에 따른 식각 특성과 식각률을 측정하기 위한 샘플이다.

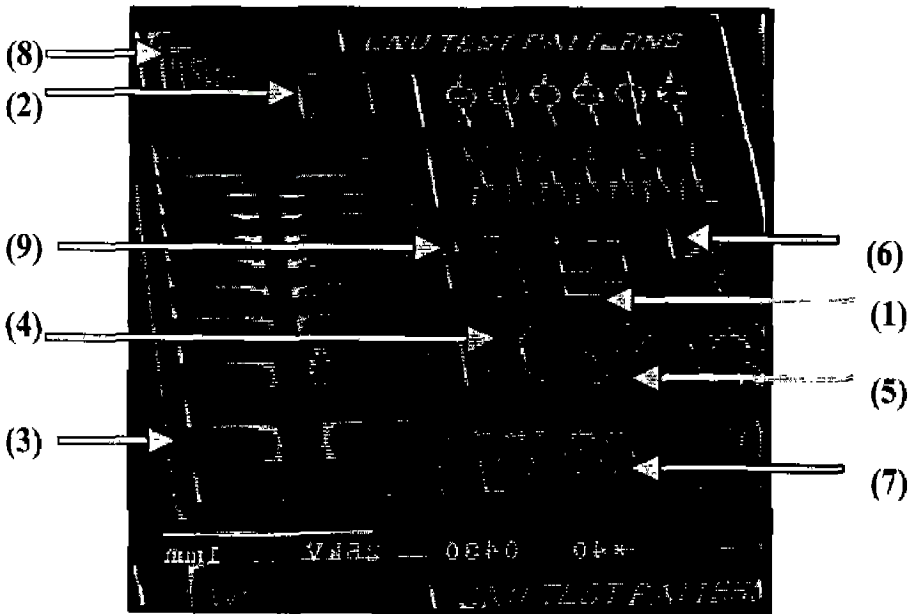


Fig. 13 SEM photograph of test pattern.



그림 14는 85°C에서 5wt% TMAH 용액에 Si (6g/l) 또는 Si(OH)<sub>4</sub> (16g/l)를 첨가한 용액과 이 용액에 APODS(2g/l)를 각각 첨가 한 용액에 대한 식각률을 각각 나타낸 것이다 이 실험에서 첨가물 변화에 따른 식각률을 측정한 결과, Si 보다는 Si(OH)<sub>4</sub> 첨가시 식각률이 개선됨을 보이고 있다. TMAH 용액에 Si 분말

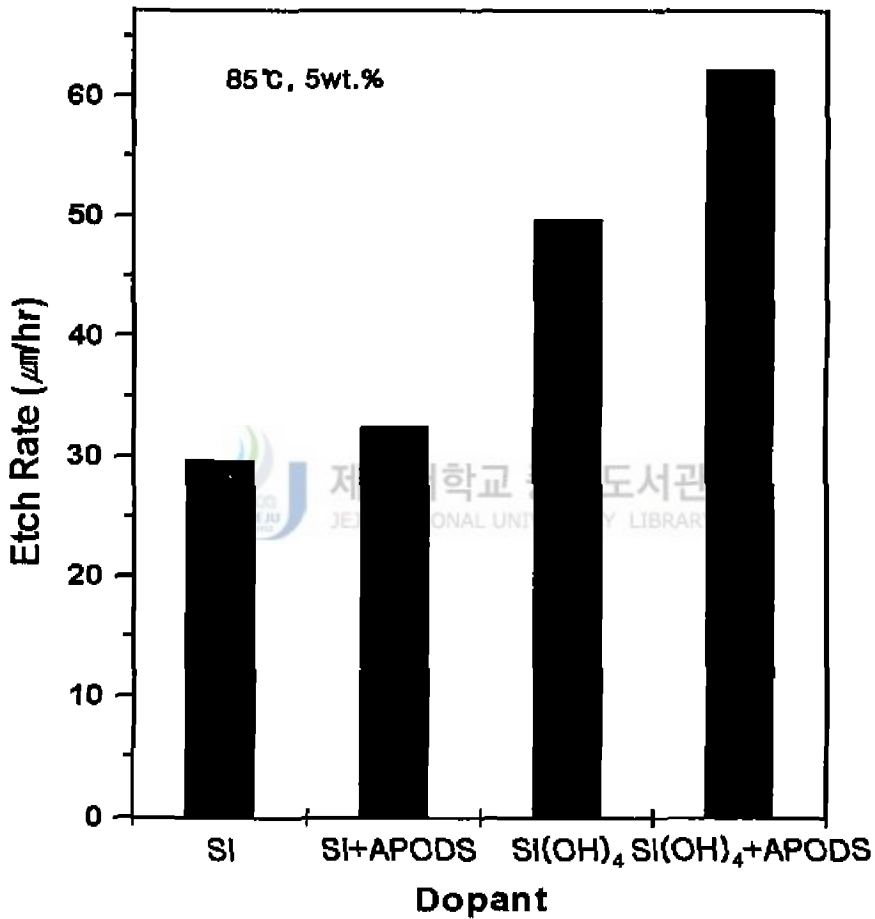


Fig. 14 Etch characteristics of p-type (100) silicon in TMAH(5wt%) solutions with dissolved Si(6g/l), Si(6g/l)+ APODS(2g/l), Si(OH)<sub>4</sub>(16g/l) and Si(OH)<sub>4</sub>(16g/l)+ APODS(2g/l) at 85°C

을 첨가 할 경우 수소의 생성을 억제하기 위해 45℃의 저온을 유지하며 용해시켰다. 이 경우 용해 과정에서 식각 용기 바닥에 잔여 물질 등이 형성된다. 이는 식각률의 저조 및 표면 상태의 헐룩 생성의 원인이 된다. 이에 비해  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 을 첨가시 고온에서 용해되며 잔여물질 없이 용해된다. 또한 Si 분말 또는  $\text{Si}(\text{OH})_4$ 에 계면 활성제인 APODS를 첨가함으로써 식각률이 개선됨을 알수 있었다

그림 15은 85℃에서 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$  (16g/l)+APODS(2g/l) 용액에 TMAH 용

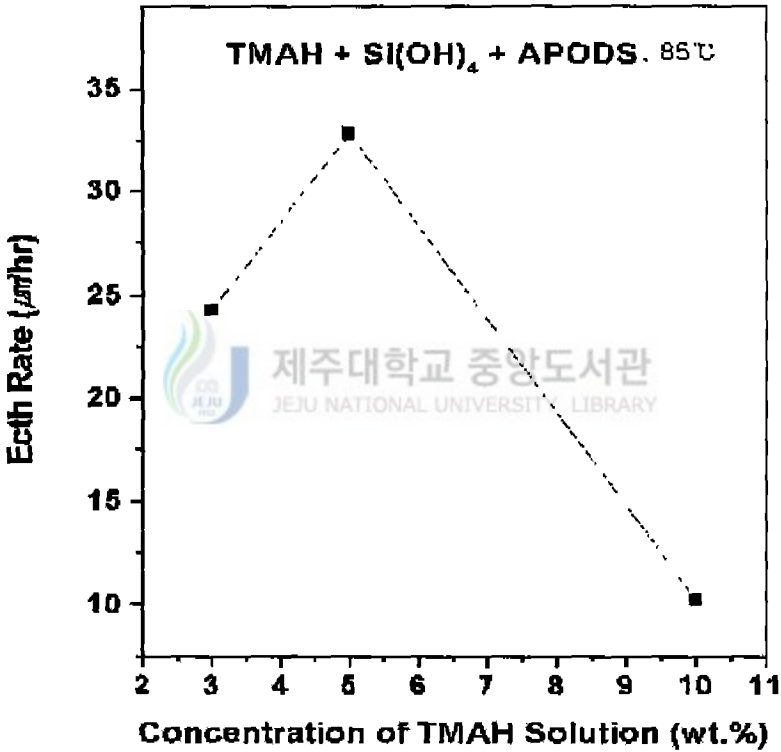
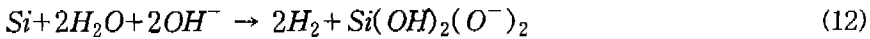


Fig. 15. Etch rate vs. various concentration of TMAH solutions with dissolved silicic acid(16g/l) and APODS(2g/l) characteristics of p-type (100) silicon at 85℃.

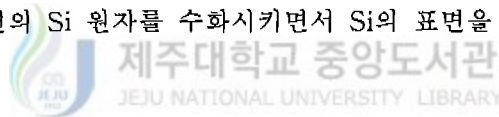
액의 농도를 각각 3, 5, 10 wt.%로 변화를 주었을 때의 식각률 특성에 관한 실험 결과를 보이고 있다. 일반적으로 순수 TMAH 용액에서의 식각률은 농도가 낮을수록 온도가 높을수록 식각률이 높다

하지만 위의 결과에서 보면 3wt.% TMAH 용액의 식각률은 5wt.% TMAH 보다 낮음을 볼 수 있다 이것은 식각정지 현상에 의한 것이다. 식각정지의 기본 메커니즘은 양극산화 현상에 있으며, 식각정지 메커니즘을 보면 다음과 같다

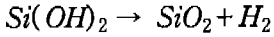
식(12)에서 이방성 식각 용액에서 H<sub>2</sub>O는 우선 Si-Si 결합을 파괴해 Si-H와 Si-OH를 만든다. H<sub>2</sub>O와 OH<sup>-</sup>에 의한 계속된 반응은 식각 용액에 용해될 수 있는 형태인 Si(OH)<sub>2</sub>(O<sup>-</sup>)<sub>2</sub>를 형성한다.



결국 이온화 된 실리카 Si(OH)<sub>2</sub>(O<sup>-</sup>)<sub>2</sub>의 형태로 제거되며 식각이 진행된다. 물분자의 OH 이온은 표면의 Si 원자를 수화시키면서 Si의 표면을 공격한다.



이 OH<sup>-</sup>이온들은 물분자에 의해 실리콘 표면이 더 이상 식각 되는 것을 방해하고 밀도가 낮은 산화막을 계면에 형성시킨다. 이것은 물분자에 대한 보호막이다. 이러한 현상은 식각률을 감소시키고 산화막 성장속도를 증가시켜 식각을 정지시킨다. 결국 3wt.% TMAH+Si(OH)<sub>4</sub>+APODS 용액의 농도가 5wt.% TMAH+Si(OH)<sub>4</sub>+APODS 용액보다 식각률이 저조한 원인은 과도한 Si(OH)<sub>4</sub>가 첨가됨으로써 식각 표면에 산화막이 형성되어 식각 정지가 발생되기 때문이다 이러한 산화막은 식(14)와 같이 수소의 발생으로 인하여 형성된다.



(14)

그림 16은 TMAH(5wt.%) + Si(OH)<sub>4</sub>(16g/l) + APODS(2g/l) 용액에서 온도(80℃, 85℃, 90℃)의 변화를 주었을 때 식각률 변화를 보여주고 있다. 온도가 증가할수록 식각률이 증가되는 일반적인 특성을 보임을 알 수 있다. 이 때 식각률은 식각 용액의 농도에 1차 비례 관계를 나타내고 있다.

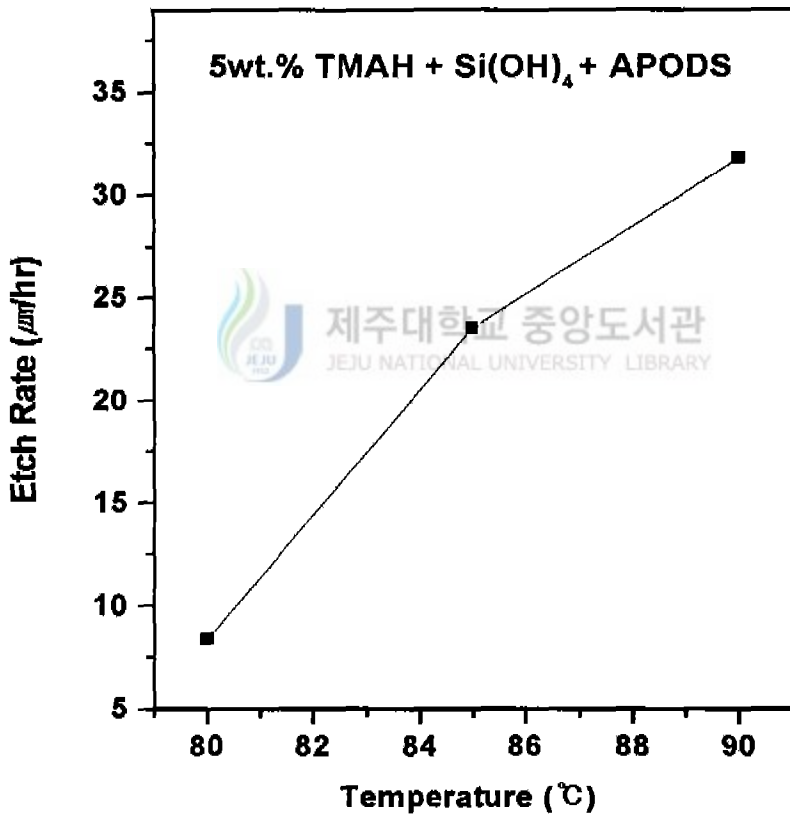


Fig. 16. Etch rate vs various temperature characteristic in the TMAH(5wt.%) + silicic acid (16g/l) + APODS(2g/l) for p-type (100) silicon etch.

그림 17에서는 TMAH(5wt.%) + Si(OH)<sub>4</sub>(16g/l) + APODS(2g/l) 용액에 일정온도 85°C에서 식각을 행했을 때 각 패턴에 따른 식각률 결과를 보이고 있다. 여기서 각 농도에 대한 식각률은 패턴의 모양과 관계없이 거의 일정한 값을 보이며 보임을 알 수 있다. 3wt.% 용액의 농도에서 각 패턴의 평균치는 약 53μm/hr이며 5wt.%의 용액의 농도에서는 63μm/hr, 10wt.% 용액에서는 36μm/hr의 값을 보이고 있다. Heath 등은 80°C, TMAH 4wt.% 농도에서 54μm/hr의 식각률을 보인다고 보고 한다 있다(Hesketh and Harrison, 1994). 5wt.% 용액의 농도에서의 식각률이 64μm/hr으로 Hesketh 등이 보고 했던 TMAH 4wt.% 농도에서의 결과 보다 약간

그림 18은 알루미늄의 두께가 1.2μm이며, 케이트 넓이(W)대 길이(L)가 40μm/ 20

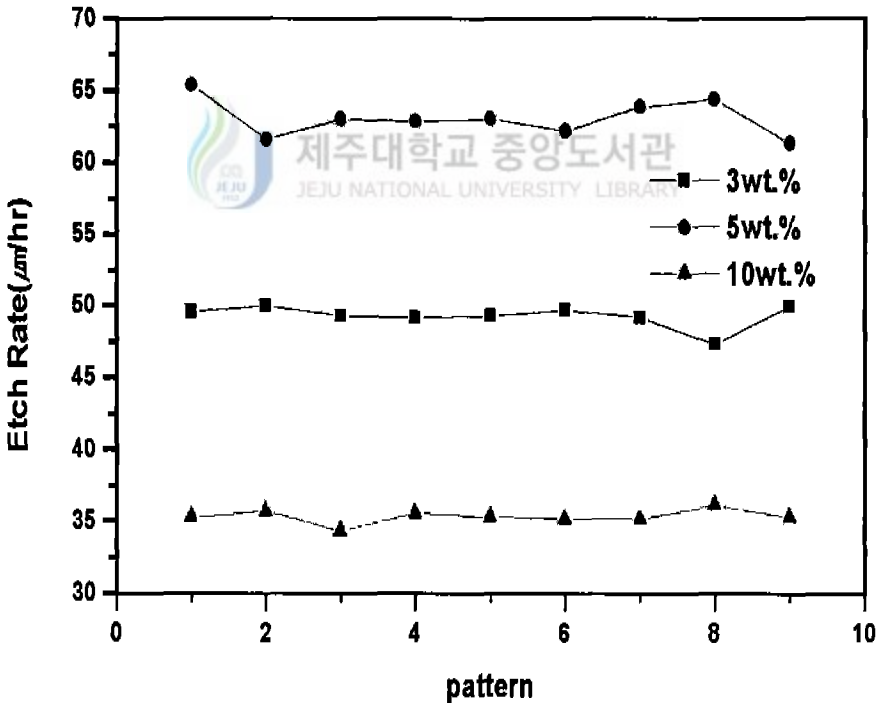


Fig. 17. Etch rate vs TMAH(5wt.%) + Si(6g/l), Si(OH)<sub>4</sub>(16g/l) + APODS(2g/l), p-type (100) silicon etch.

인 시험용 MOSFET의 사진이다

그림 19에서는 그림 18의 MOSFET를 이용하여 TMAH (wt %)+Si(4g/l) 용액에서 TMAH 용액의 농도와 식각 온도의 변화에 따른 MOSFET의 알루미늄 배선에 미치는 영향을 평가한 현미경 사진이다. 이 결과 TMAH 용액의 농도가 5wt.% 이하에서는 예견된 바와 같이 알루미늄 배선에 어떤 영향도 미치지 않았다. 그러나 TMAH 용액의 농도가 10wt %에서는 알루미늄 배선이 보호되지 못하는 것으로 나타났으며 온도가 높아짐에 따라 알루미늄의 식각 현상이 두드러졌다. 식각 용액은 금속 박막인 알루미늄을 손상시키는 원인이 되며, 알루미늄은 공기에 노출시 알루미늄 산화층( $Al(OH)_3$ )를 형성한다 이 산화층은 알칼리 용액에서 식(15)와 같이 반응되며  $Al(OH)_4^-$ 를 형성한다.

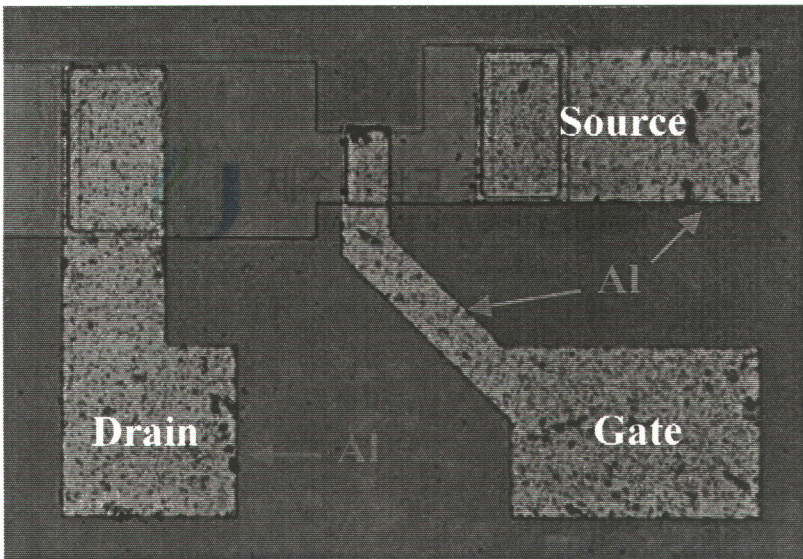
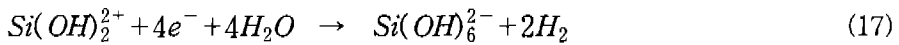
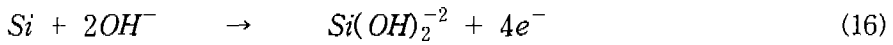


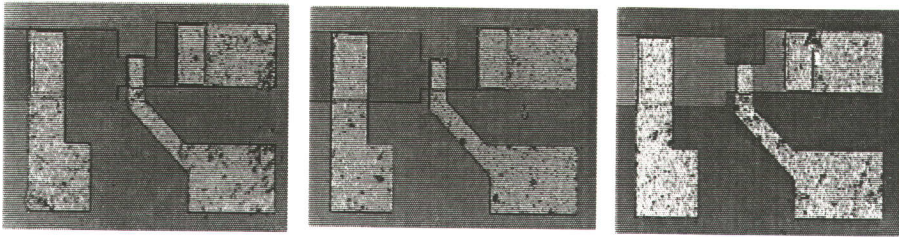
Fig. 18 Test pattern MOSFET's photograph.



계속적인  $OH^-$  이온이 증가되면서  $Al(OH)_4^-$ 가 증가된다. 이것은 알루미늄 손상을 감소시킨다. 이러한 감소는 첨가된 실리콘 분말에서 생성되는 실리카와 반응하여 알루미늄 실루카 박막이 형성되어 보호막의 역할을 하기 때문이다 식 (16)과 식 (17)은 실리콘을 용해함으로써 알루미늄의 보호막인 실리카의 반응식을 보이고 있다



TMAH(5wt.%) +  $Si(OH)_4$ (16g/l) + APODS(2g/l) 용액에서의 식각은 패턴에 관계 없이 일정한 식각률을 얻을 수 있으며 농도와 온도에 대해 선형적인 특성을 보였다. 또한 계면 활성제인 APODS를 첨가함으로써 실리콘이나  $Si(OH)_4$  만을 첨가했을 때보다 식각률이 개선 및 저농도에서의 식각 표면의 힐록 형성의 문제점을 개선하여 보다 양호한 식각 표면을 얻을 수 있었다.

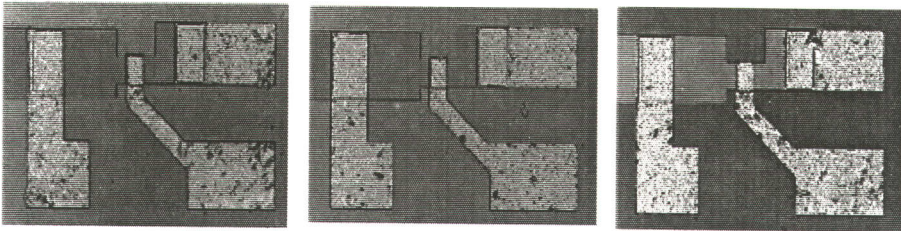


80°C

85°C

90°C

(a) TMAH 3wt.%

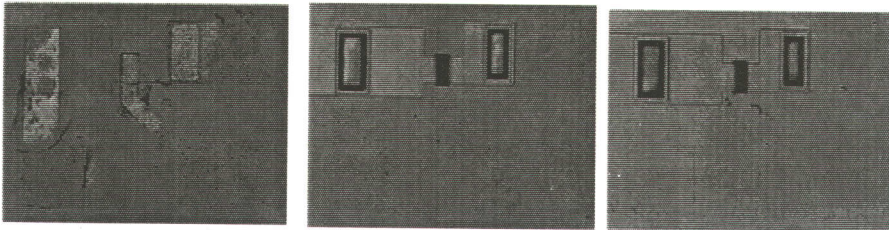


80°C

85°C

90°C

(b) TMAH 5wt %



80°C

85°C

90°C

(c) TMAH 10wt %

Fig 19. Photograph of etched MOSFET in the (a) TMAH(3wt.%)/Si(10g/l), (b) TMAH (5wt.%)/Si(18g/l), (c) TMAH (10wt.%)/Si(37g/l) solution at 80,85,90°C, respectively.



## 5.2 패턴 모양에 따른 식각 방향 및 식각 특성

이방성 식각액에 의한 패턴의 깊이와 홀의 모양은 식각창에 따라 결정면의 방향과 식각 용액에 의해 결정된다. 그림 20은 각기 다른 식각창의 크기와 모양에 따라 식각 진행 방향이 틀리며 완전 식각 시 나타난 패턴의 형성을 그림으로 나타

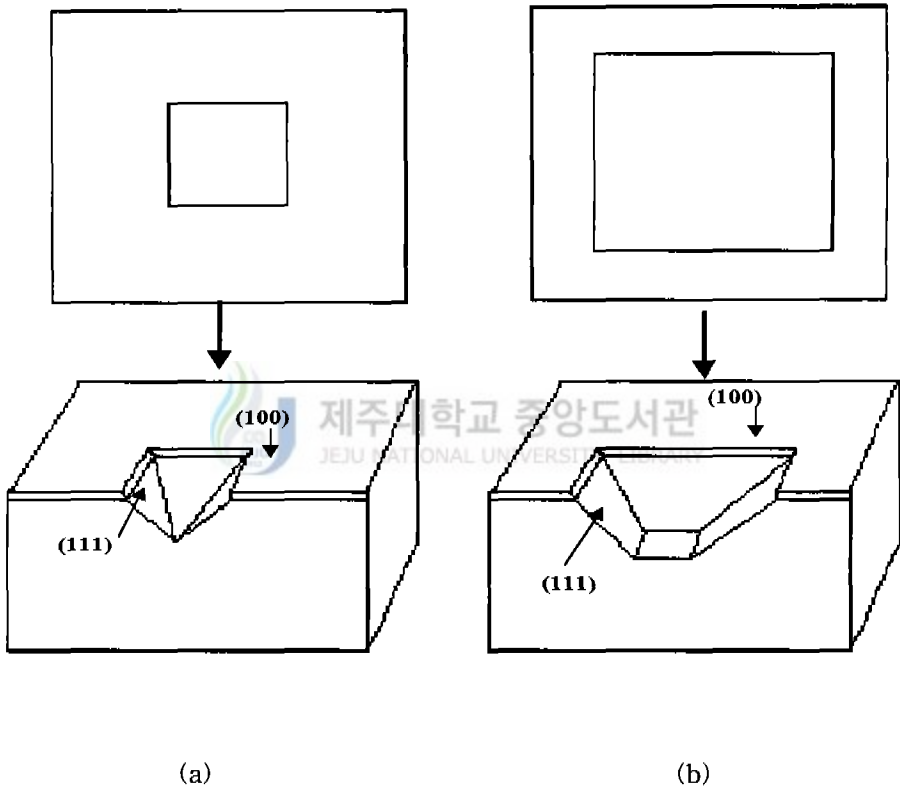


Fig. 20. (a) A square opening oriented  $\langle 100 \rangle$  directions of as  $\langle 110 \rangle$  wafer yields a pyramidal pit with  $[111]$  side wall (b) The point of intersection of the  $\langle 111 \rangle$  planes is deeper, and a flat-bottomed pit can be created by stopping the etch

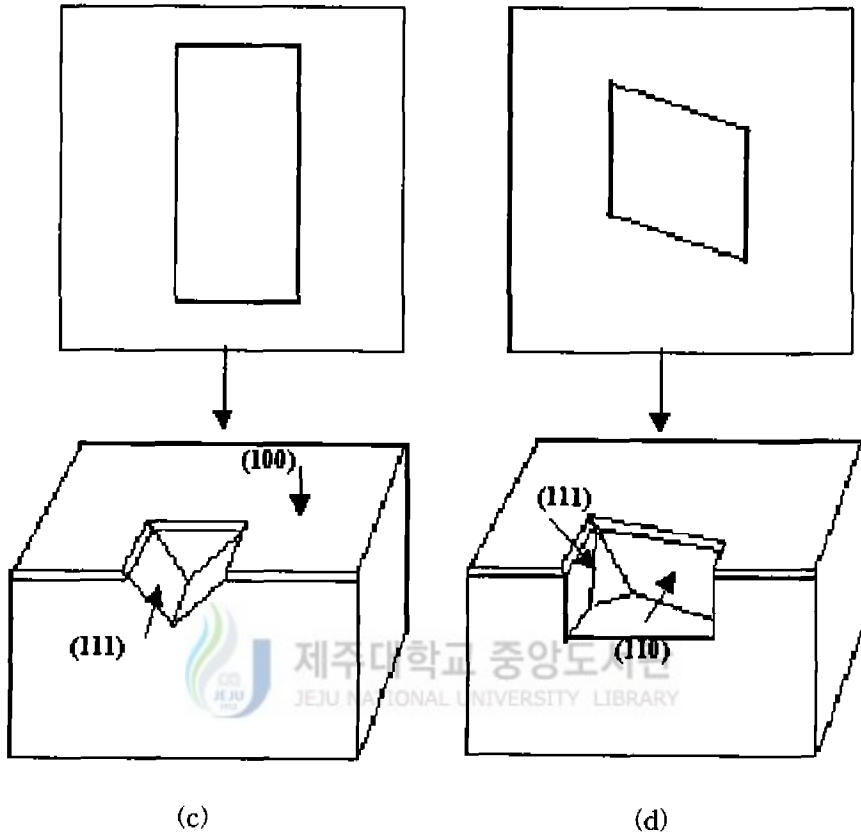


Fig. 20. (c) a rectangular opening on the same wafer gives V-shaped groove  
 (d) etching a wafer that has a different surface orientation.

타내었다. 그림 20(a)는 결정면이 (100)와 (111)면에 대해 정사각형의 식각창인 경우 식각 정지점에 도달된 피라미드형의 홈이 생성되었다. 그림 20(b)는 그림 20(a)보다 충분히 큰 직사각형의 식각창을 식각했을 때 (111)면의 교차점이 더 깊

게 되면서 식각 정지점에 달하는 깊이에 도달하기 전에 식각이 정지되고 만다. 이것은 54.7°의 경사면을 이루며 평탄한 바닥(flat-bottom)의 패턴 모양을 갖는 결과를 보였다. 그림 20(c)는 (100)면에 대해 비교적 긴 평행한 직사각형의 식각 창일 경우 식각 패턴은 V형 패턴을 형성하였다. 그림 20(d)는 (100)과 (110) 결정면에 대해 방향성이 서로 어긋난 식각창일 경우 식각된 홀의 모양은 다른 결정 방향을 가지는 웨이퍼 방향에 따라 식각이 진행됨을 보이고 있다. 여기서 결정면이 (100)와 (111) 웨이퍼일 경우, 사각의 식각창은 (111) 결정면을 따라 54.7°로 식각된다. 이와 같이 그림 20에 나타난 결과를 보면 식각되어 형성된 모양은 식각창이 결정 방향 및 식각 창의 모양과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그림 21은 3가지 캔티레버 패턴이 시간에 따라 각이 진행되는 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 둥근 모양과 직사각형 모양의 각기 다른 패턴에 따라 식각 진행 방향이 틀리며 완전 식각 시 모양 또한 다름을 알 수 있다. 여기서 (100)웨이퍼 요면 모양의 식각창이 식각됐을 때 (111)방향의 옆면을 갖는 돌출된 얇은 직사각형 홀이 생성된다. 패턴의 모양은 웨이퍼 표면의 홀의 영역뿐만 아니라 홀의 깊이와도 관계있다. 여기서 이방성 식각이 진행되는 동안 모서리 부분의 둥근 모양과 직사각형 모양의 식각창 따라 식각 방향이 서로 다름을 알 수 있다.

일반적으로 식각 특성은 온도, 식각액의 성분, 노출된 실리콘표면의 원자결합밀도, 식각 용액의 pH와 같은 요소 등 여러 가지의 영향이 있다. 따라서 결정 방향에 따른 이방성 식각액의 식각률 메커니즘을 설명하기는 어렵다. 실험결과 (100) 결정면의 이방성 식각은 (111) 면의 식각에 비해 급속하게 진행되며, 약 10배 정도의 식각률의 차이를 보이고 있다. 이것은 (100)면과 (111)면에 식각시 54.7°로 식각되는 원인이 된다. (110) 면은 (100)과 (111)면의 중간정도의 식각률을 갖는다. 대부분 이방성 식각에 쓰이는 실리콘 웨이퍼는 <100>과 <111>방향의 웨이퍼를 많이 사용되며, 결국 이방성 식각 용액에 의해 형성된 홀의 형태는 식각액에 의한 것 일뿐만 아니라 웨이퍼 표면의 결정 방향에 의해 결정되며 식각 방향 또한 일정한 규칙을 갖고 식각되므로 패턴 설계 시 이용할 수 있다.

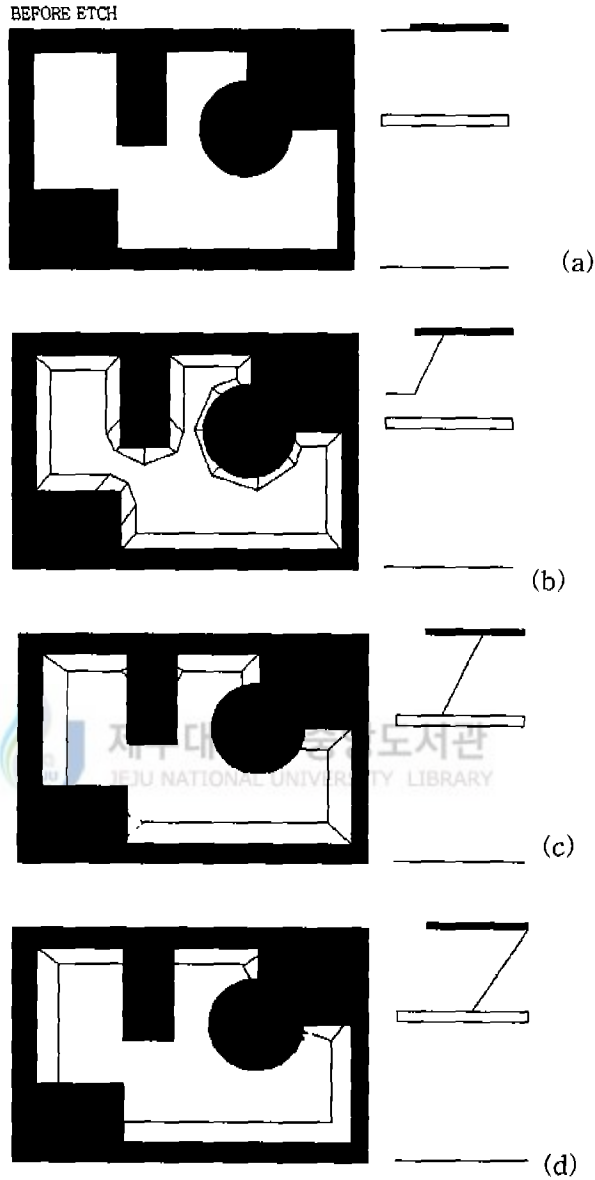


Fig. 21 Oxide cantilever can be formed by undercutting an oxide etching mask. (a) before etch, (b),(c) and (d) progressive etched patterns with time.

그림 22에서 그림 28까지는 85°C에서 TMAH(5wt.%) +siliic acid (16g/l) +AP ODS(2g/l)의 식각액을 사용하여 그림 13의 시험용 패턴을 식각한 NON 절연막의 식각패턴에 대한 전자 현미경 사진으로 식각 진행 과정 및 방향을 나타낸 것이다. 그림 22는 브릿지형 다이아프램이 시간에 따른 식각 진행 과정 및 진행 방향을 나타낸 현미경 사진이다. 그림 22(b)는 사각의 모서리 부분에서 식각이 이루어져 점차 그림 22(c) 및 22(d)와 같이 일정한 결정 방향에 따라 식각이 진행됨을 보이고 있다. 그림 22(e)는 화살표 방향인 8각형의 결정 방향으로 식각이 진행됨을 나타낸 것이다. 그림 22(f)는 3시간 30분 동안 식각한 후에 나타난 브릿지형 다이아프램의 전자현미경 사진이다.

그림 23 또한 브릿지형 다이아프램으로 그림 23(b)에서 알 수 있듯이 모서리 부분에서 식각이 진행되어 점차 그림 23(c)와 23(d)에 8각형의 결정 방향으로 식각이 진행된다. 그림 23(e)는 식각 진행 방향을 그린 것으로 8각형의 결정면을 따라 식각된다. 그림 23(f)는 3시간 30분이 지난 후 식각된 모양을 SEM한 사진이다.

그림 24에서는 웨이퍼의 결정면과 어긋난 방향의 홀일 경우 식각 진행과정 및 방향을 나타낸 것이다. 그림 24(b)는 초기 식각이 진행과정을 나타낸 것이다. 점차 식각이 진행됨에 따라 그림 24(c)와 24(d)에서 보면 결정면과 동일한 방향에서는 식각이 전혀 이루어지지 않고 있다. 반면 결정면에 대해 어긋난 방향에 대해서는 활발한 식각이 진행되고 있음을 알 수 있다. 충분한 시간이 흐른 뒤 완전 식각이 된 후 두 패턴은 서로 만나게 됨을 그림 24(f)에서 보이고 있다.

그림 25는 웨이퍼 결정방향과 식각 진행과정을 보인 것이다. 그림 25(b)에 초기 식각에서 알 수 있듯이 결정면과 서로 다른 방향에 대해 식각이 진행된다. 시간이 지남에 따라 그림 25(c)와 25(d)에서 보면 8각형의 결정 방향으로 식각되며 결정면과 수직 또는 평행인 면에 대해서는 식각이 이루어지지 않고 있다. 그림 25(e)는 식각이 진행방향을 나타낸 것이다. 완전 식각 후 패턴의 모양은 그림 25(f)와 같이 4개의 포켓을 이루고 있다.

그림 26은 그림 23과 유사한 패턴으로 브릿지형 패턴위에 결정면과 다른 홀을 추가한 패턴이다. 그림 26(b)는 사각 모서리 부분과 가운데 홀부분에서 식각이 이

루어져 점차 그림 26(c)과 26(c)와 같이 일정한 방향으로 진행되어 완전 식각시 그림 26(f)과 같은 결과를 보였다. 그림 26(e)는 식각이 진행되는 방향을 내었다.

그림 27은 결정면과 평행하면서 직각인 두께가 서로 다른 L자형 패턴의 식각 진행과정을 나타낸 것이다 L자형의 패턴은 결정면과 직각이거나 또는 평행한 식각창의 방향일 경우 식각의 진행이 없으며, 결정면과 방향이 다른 모서리 부분에만 식각이 진행됨을 보이고 있다.

그림 28는 식각창의 모양과 크기에 따른 식각 모양을 나타낸 것이다. 그림 28(b)와 28(c)는 식각이 진행과정을 나타낸 것으로 4개의 모서리 부분을 갖는 식각창으로 크기가 클수록 식각이 잘 이루어 지며, 식각 후 크기에 관계없이 그림 28(d)에서 처럼 동일한 면적에 식각이 형성됨을 알 수 있었다.

표 3은 식각창의 모양과 결정면의 방향에 따라 형성된 모양을 명시한 것이다

위와 같은 결과 다이아프램, 브릿지 및 켄티레버 구조 등 절연막 위에 식각패턴들의 식각을 행한 결과 모두가 기계적인 변형이 거의 없는 양호한 구조를 나타내었다. 식각은 결정면과 동일한 방향 또는 직각인 방향에서는 진행되지 않으며 서로 다른 결정방향에 대해 식각이 진행됨을 알 수 있다. 이 결과로 인해 면밀한 패턴 설계를 위해서는 이방성 식각액뿐만 아니라 결정 방향에 따른 식각 방향의 또 다른 면를 탐구할 필요가 있다.

Table 3. The relation between opening, surface orientation, and structure

Opening (Window)	Surface Orientation	Structure
Square	<100>	Pyramidal pit or truncated pit
Retangular	<100>	Rectangular pit (trench)
Circle	<100>	Pyramidal pit
Arbitrarily shaped close pattern	<100>	Rectangle pit



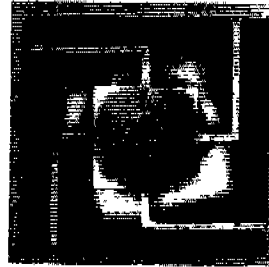
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

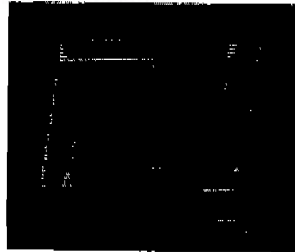
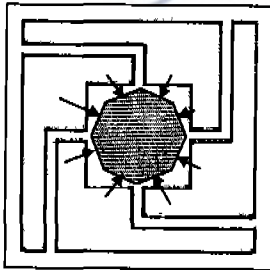
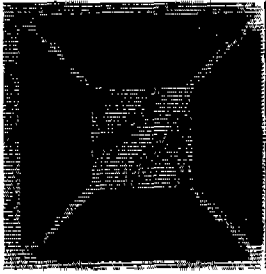
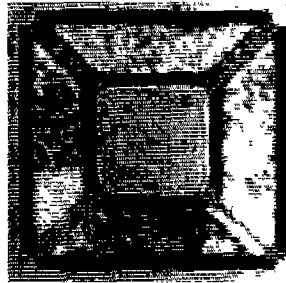


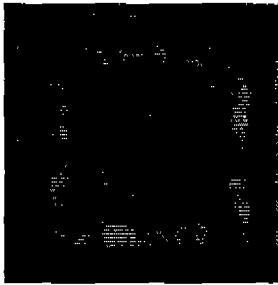
Fig 22. Etching procedure of bridge type diaphragm in the TMAH(5wt.%) + silicic acid(16g/l) + APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr).



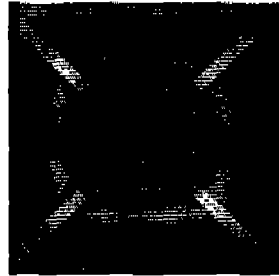
(a)



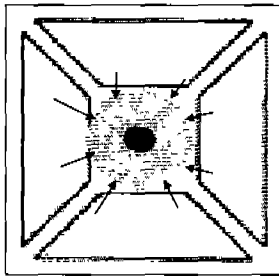
(b)



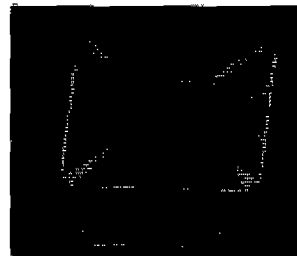
(c)



(d)



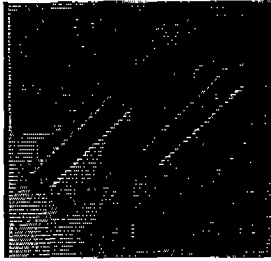
(e)



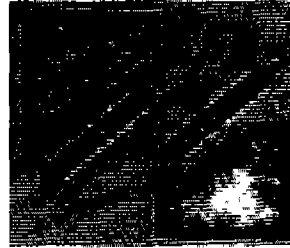
(f)

Fig. 23 Etching procedure of bridge type diaphragm in the TMAH(5wt.%)+silicic acid(16g/l)+APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr).

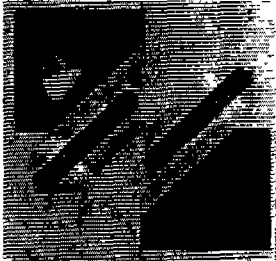




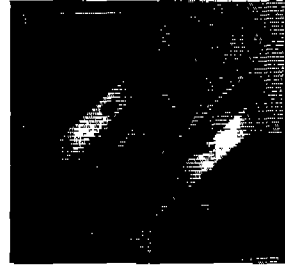
(a)



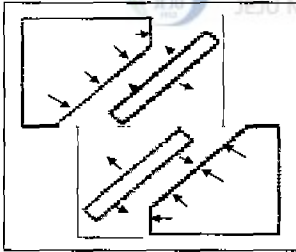
(b)



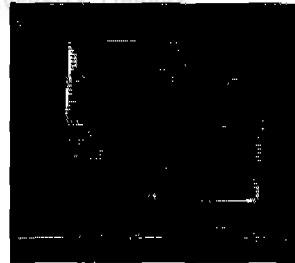
(c)



(d)

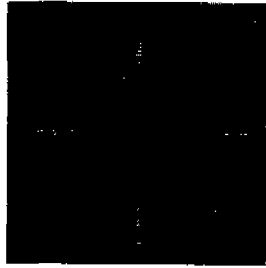


(e)



(f)

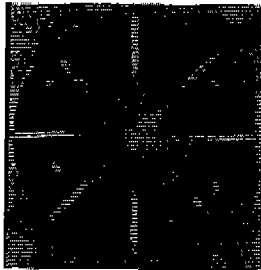
Fig. 24. Etching procedure of bridge type diaphragm in the TMAH(5wt.%) + silicic acid(16g/l) + APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr).



(a)



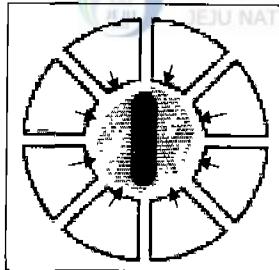
(b)



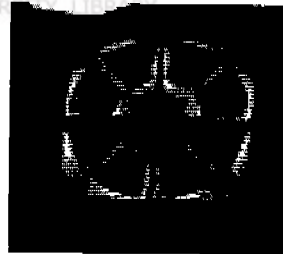
(c)



(d)



(e)

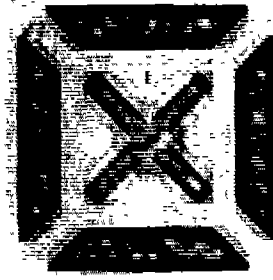


(f)

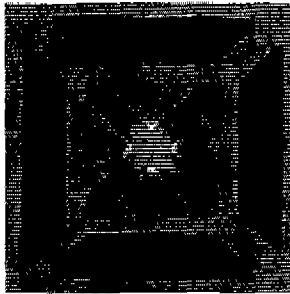
Fig. 25 Etching procedure of bridge type diaphragm in the TMAH(5wt.%)+silicic acid(16g/l)+APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr).



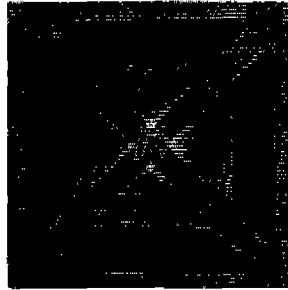
(a)



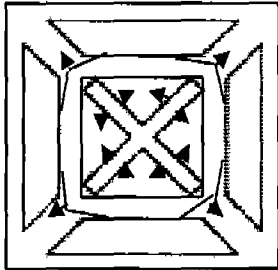
(b)



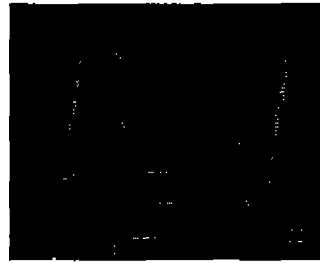
(c)



(d)

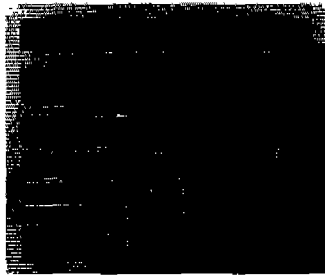


(e)

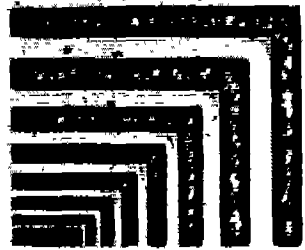


(f)

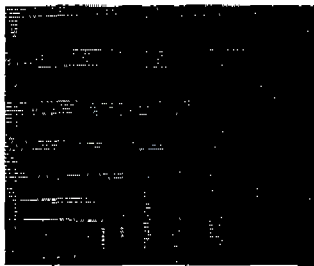
Fig 26. Etching procedure of bridge type diaphragm in the TMAH(5wt.%)+silicic acid(16g/l)+APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr).



(a)



(b)



(c)



(d)

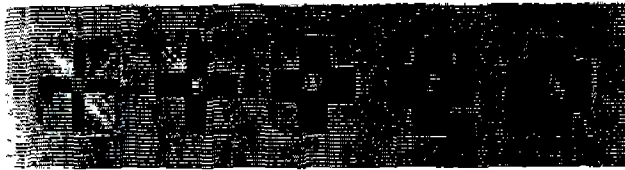
Fig 27. Etching procedure of L type diaphragm in the TMAH(5wt.%)+silicic acid(16g/l)+APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr)



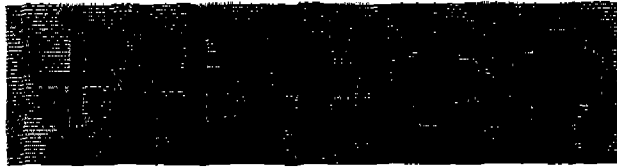
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 28 Etching procedure of cross type diaphragm in the TMAH(5wt.%) + silicic acid(16g/l) + APODS(2g/l) solution at 85°C with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) Test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) Fully etched shape (3.5hr).

## VI. 결 론

실리콘 미세가공 기술에 의한 마이크로센서, 액추에이터 및 시스템용 3차원 미세 구조물을 제작하기 위해 기초공정에서도 사용가능한 TMAH 용액에 Si 분말, silicic acid( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) 및 APODS를 첨가한 식각 용액의 식각 특성을 연구하였다.

TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$ +APODS 용액에서의 식각 결과 후면 정렬과 같은 공정 없이 모든 공정이 끝난 반도체 소자의 금속 배선에 실리카막을 형성하여 알루미늄을 보호하며, 식각 시 수소가스의 발생을 억제하여 식각된 실리콘의 표면에 생성되는 힐록을 방지함으로써 보다 양호한 식각 표면을 형성할 수 있었다. 이것은 전면 실리콘 이방성 식각 공정을 통하여 후면 식각 공정에서 필요로 하는 양면 마스크 정렬과 복잡하고 번거로운 공정들을 피할 수 있다. 또한 마이크로 센서 응용에 쓰이는 다양한 형태의 브릿지형 다이아프램을 식각한 결과 대부분이 내재 응력이 나타나지 않았으며 결정 방향에 따라 일정한 식각 방향을 갖는 완벽한 모양을 갖추고 있으며 패턴의 모양과 관계없이 일정한 식각률의 결과를 얻을 수 있었다. TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$ +APODS 용액의 실리콘 이방성 식각률의 특성은 농도가 증가함에 따라 식각률이 감소하며, 온도가 증가함에 따라 식각률이 증가하였다. 따라서 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+ $\text{Si}(\text{OH})_4$ +APODS 용액에서의 미세가공 기술은 집적회로 제조 공정 기술 및 미세가공 기술에 사용되어 각종 센서 제조기술로 유용하게 사용될 것이다.

## 참고문헌

- M. C. Acero, J. Esteve, Chr. Burrer and A. Götz, "Electrochemical etch-stop characteristics of TMAH : IPA solutions," Sensors and Actuators A. 46-47, 1995, pp. 22-26.
- H Baltes, and D. Moser, 1993, "CMOS Vacuum sensors and other application of CMOS thermopile," The 7th Int'l conf Solid-state sensors and Acutators, pp. 736-741.
- P Schweitzer, 1996, Corrosion and Corrosion Protection Handbook, editor, marcel Dekker, Inc , New York.
- Crary, Selden B., 1987, "Thermal Management of integrated Microsensors," Sensors and Actuators, 12, pp. 303-312.
- Lee, D. B. 1969, "Anisotropic etching of silicon," journal of Physics, Vol. 40, No.11, October, pp. 4569-4574.
- Klaassen, Erno Hilbrand, 1996, "Micromachined instrumentation systems," Stanford University, May, 1996, pp.2.5.1-2.5.5.
- Hesketh, Peter J. and D. Jed Harrison, 1994, "Micromachining : The Fabrication of Microstructures and Microsensors," The Electrochemical Society Interface, pp 21-25.
- Jaeggi, D.S. Baltes and D. Moser, 1992, " thermoelectric AC power sensor by CMOS technology," IEEE Electron device letters, vol.13, no.17, pp. 366-368
- James B. Angell, stephen C. Terry and Phillip W.barth, "Silicon micromechanical Devices." pp. 36-47.

- Thong, J. T, J. W. K. Choi, C. W. Chong, 1997, " TMAHW etching of silicon and the interaction of etching parameters", Sensors and Actuators A 63, pp 243-249.
- 김영민, 도양희, C.C Liu (EDC/CWRU), 이광만, 1996 "실리콘 미세가공 기술과 백금 박막을 이용한 마이크로 열센서," 한국 센서학회, ISSN 1225-3278, pp. 99-104
- Kalvester, E., L. Lofdahiand G.Stemme, 1994, "A small-size, silicon microphone for measurements in turbulent gas flow," Sensors and Actuators A, 45, pp. 103-108
- R, Kirt Williams and Richard S. Muller, 1998, "Etch rates for Micromachining processing", journal of microelectromechanical systems Vol. 5, No. 4, December 1996, pp 256.
- Sato, K. M. Shikida, T. Yamashiro, K. Asaumi, Y. Iriye, and Yamamoto, Nagoya University Chikusa, 1998 "Anisotropic etching rates of single-crystal silicon for TMAH water solution as a function of crystallographic orientation", IEEE, pp. 556-561.
- Kurt E. Petersen, 1982, "Silicon as a mechanical material.", proceeding of the IEEE, Vol.70 No. 5, MAY, pp. 420-425, 1998, "Bulk micromachining of silicon", IEEE, Vol. 86, No. 8, August pp. 1536-1545.
- Lenggenhager, R., D Jaeggi, P. Malcovati, H. Duran, H. Baltes, E. Doering, 1975, "CMOS Membrane Infrared Sensors and Improved TMAHW Etchant," Journal of solid-state circuits, Vol. SC-10, No. 4, August, pp. 20.5.1-20.5.4.
- Les M. Landsberger, Mojtaba Khrizi, makarand Paranjape and Sasan naseh, 1997, "Variation of under-etched planes appearing in Bulk-micromachined



- silicon TMAH etchant," Sensors and material , Vol, 9, No 7, pp 417-424
- Masayuki Sekimura, 1999, "Anisotropic etching of surfactant-added TMAH solution",IEEE, pp 650-656.
- Mehregany Mehran, 1993, " Microelectromechanical Systems," IEEE, June, pp 14-20.
- Merlos, A. , M Acero, M. H. Bao, J. Bausells and J. Esteve, 1993, "TMAH/IPA anisotropic etching characteristics," Sensors and Actuators A. 37-38, pp. 737-743.
- M. Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution, Pergamon Press, New York, 1996.
- Mirshiro Shikida Kazuo, Kenji Tokoro and Daisuke Uchikawa, 1999, " Comparison of anisotropic etching properties between KOH and TMAH solutions", IEEE, pp 315-320.
- Nim H. Tea, Veljko Milanovic, 1997, " Hybrid postprocessing etching for CMOS-Compatible MEMS", Journal of microelectromechanical systems, Vol. 6, No.4, December, pp. 363-367.
- Osamu Tabata, 1995, " pH-controlled TMAH etchants for silicon Micromachining.", Transducer'95, eurosensors IX, pp. 83-86.
- Peter J. Hesketh and D.Jed Harrision, 1994, " Micromachining : the fabrication of microstructures and microsensors", The Electrochemical society Interface, pp. 21-23.
- Qiu, Ernst Obermeier li and Axel Schubert, 1995, " A Microsensor with integrated heat sink and flow guide for gas flow sensing applicatio" " The 8th international conference on solid-state sensors and actuators, and eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June, 25-29, pp. 520-523.

- Ristic Ljubisa, 1994, " Sensor Technology and Devices," chap 2-4, Chap 8, Artech House.
- Sato, K., Shikida, M., Yamashiro, T., Asami, K., Iriye, Y., and Yamamoto, M., 1998, " Anisotropic etching rates of single-crystal silicon for TMAH water solution as a function of crystallographic orientation", IEEE, pp. 556-561
- Seidel, H., L Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgärtel, 1990, "Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions," J. Electrochem. Soc., Vol 137, pp. 3626-3632.
- Susumu Sugiyama, Osamu Tabata, Keiichi Shimaoka and Ryouji Asahi, "Micromachined Sensors Using Polysilicon Sacrificial Layer Etching Technology," pp. 6.1.1-6.1.4.
- Sze, S. M, "Semiconductor Sensors," chap2. chap7, JOHN WILEY & SONS, 1994
- Wu, M. P, Q. H. Wu and W. H. Ko, 1986, " A study on deep etching of silicon using ethylenediamine-pyrocatechol-water," Sensors and Actuators, vol. 9, pp 333.
- Wu, X. P. and W. H. Ko, "A study on compensating corner undercutting in anisotropic etching of (100) silicon," Tech. Digest, Transducers 1987, Fourth Int Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Tokyo, pp 126.
- Yam, J. D. Ip, J J. Santiago-Aviles and J. N. Zemel, "An investigation of the Anisotropic Etching of (100) Silicon Using Cesium Hydroxide," Sensors and Actuators A. 29, pp. 121-126.
- 이광만, 도양희, 류재연, 김영민, 고희선, 1997, " CMOS 열전대를 이용한 마이크로 진공센서에 대한 연구" ISRC 96-E-4040, pp 14-15, pp 21-27.

Schakenberg, U W. Benecke, P.Lange, 1991, "TMAHW etchants for silicon micromachining" Technical Digest, Transducer'91. San Francisco, pp. 815-818



## 감사의 글

감사합니다

본 논문이 이루어지기까지 물심양면으로 힘써주신 지도 교수님인 이광만 교수님께 깊은 감사를 드리며 아울러 심사위원이신 도양희 교수님과 강민제 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 본 연구 논문을 쓸수 있게 항상 격려 해주신 김경식 교수님, 고성택 교수님, 김경연 교수님께도 깊이 감사 드립니다.

그리고 회사생활을 하면서도 대학원 과정과 논문이 완성될 수 있도록 배려 주신 한국통신 제주통신망운용국 임직원 여러분에게 감사를 드립니다.



항상 어려움이 있을 때 조언을 아끼지 않았던 영민오빠, 성숙, 경희, 창일오빠 그리고 대학원 생활동안 많은 도움과 본 논문이 완성하기까지 도와준 요섭군과 효용군에게도 진심으로 감사를 드리고 남은 대학생활 알차게 보내며 좋은 결과 있길 바랍니다. 또한 일년 동안 학교와 회사를 같이 오가며 도움주신 유정언니에게도 감사를 드립니다.

항상 격려와 용기로 삶의 지혜를 가르쳐 주신 형부, 언니들 그리고 귀여운 조카들에게도 고마움을 전하며, 그 무엇보다도 어렵고 힘들 때 용기와 사랑을 주신 부모님께 진심으로 감사드리며 이 글을 바치고 싶습니다.

1999. 12.

고 희 선.