濟州大學校 産業技術硏究所 論文集, 第10卷, 2號, pp.118-126, 1999. 12
Cheju Nat'l Univ. Res. Insti. Ind.Tech. Jour., Vol.10, No.2 pp.118-126, 1999. 12

마이크로센서 응용을 위한 실리콘 미세가공 기술

고 희 선* · 김 영 민** · 권 대 혁*** · 도 양 회**** · 이 광 만****

Silicon Micromachining Techniques for Microsensor Applications

Hee-Seon Ko*, Young-Min Kim**, Dae-Hyuk Kwon***, Yang-Hoi Doh****
and Kwang-Man Lee****

ABSTRACT

Silicon micromachining technology can be used to build microsensors and actuators by using tools derived from standard IC processing. For the silicon micromachining the etching characteristics of tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) by dissolving silicon powder or silicic acid have been studied. The 3, 5 and 10wt.% TMAH solutions, with dissolved silicon powder (6g/l) or with dissolved silicic acid($Si(OH)_4$, 16g/l) were used. And ammonium peroxydisulfate (APODS, 2g/l) dissolved in the solutions were also used. The etch rates of silicon and the etched surface roughness were observed with various etching conditions. The crystallographical aspect on the crystal orientation of silicon have been studied. With sufficiently fresh solutions, these TMAH concentration and combination of etchants, provide repeatable etch properties, does not attack exposed aluminum or silicon dioxode, and provide smooth (100) silicon surfaces.

Key words : silicon micromachining, MEMS, TMAH, silicic acid, APODS.

1. 서 론

실리콘 미세가공 기술은 마이크로 센서, 마이크로 구조 및 마이크로 시스템의 디바이스 제작을 위해 중요하다. 실리콘을 이용한 미세가공 기술 중에서 실리콘 이방성 식각 기술은 고성능 마이크로 센서나 액튜에이터(actuator) 및 시스템 등의 MEMS(microelectromechanical system)개발에 필수 불가결한 핵심기술로서 최근에 활발한 연구가 진행되고 있다. 미세가공 기술은 다양한 화학적 식각을 이용한 사진 식각 공정 기술과 박막 증착 공정의 조합이라고 할 수 있으며 매우 작은 크기를 가지는 삼차원적이고 기계적인 구조 제작이 가능하다.

지금까지 가장 많이 이용된 식각 용액인 EDP (ethylenediamine pyrocatechol)[1] 용액 및 KOH (potassium hydroxide)[2] 용액은 제조 시 마스크 패턴의 후면정렬이 필요하고 이미 형성된 금속박막을 식

* 제주대학교 대학원 전자공학과
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.
** 경북대학교 대학원 전자공학과
Graduate School, Kyungpook Nat'l Univ.
*** 경일대학교 전자정보공학과
Dept. of Electronic & Information Eng., Kyungil Univ.
**** 제주대학교 전자공학과, 산업기술연구소
Dept. of Electronic Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

각 용액으로부터 보호해야 하므로 일반적으로 알려진 표준 CMOS공정이나 표준 바이폴라 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[3]. 실리콘 이방성 식각액으로 최근에 빈번히 사용되고 있는 TMAH 용액은 Si 분말 또는 $Si(OH)_4$ (silicic acid)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 분말 또는 $Si(OH)_4$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 $Si(OH)_4$가 첨가된 TMAH 용액에 대해 연구하였다.[4] 이 경우 나타나는 식각률의 저조 및 식각 표면의 문제점을 해결하기 위해 계면 활성제인 APODS (ammonium peroxydisulfate)를 적정량 첨가하여 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액의 실리콘 이방성 식각 특성을 행한 결과 식각 표면의 힐록을 감소시킬 뿐만 아니라 TMAH+Si 또는 TMAH+$Si(OH)_4$ 용액에 비해 식각률이 개선된 결과를 얻었다. TMAH 용액은 알카리 이온에 의한 오염이 없고 집적화 미세가공 기술 공정에 사용이 가능하며 Si 분말 또는 $Si(OH)_4$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+APODS 또는 TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액 특성에 관련하여 마이크로 센서 응용을 위한 실리콘 이방성 식각 조건을 제시하였다.

II. 실리콘 미세가공 기술

실리콘 미세가공 기술의 목적은 기판으로부터 실리콘을 제거하는데 있다. 이러한 미세가공 기술은 크게 벌크(bulk) 미세가공 기술과 표면(surface) 미세가공 기술로 분류할 수 있으며, 미세가공 기술에 사용되는 물질들은 다결정 실리콘, 폴리머, 유리, 금속 그리고 세라믹 등 다양하다. 벌크 미세가공 기술은 미세구조의 개발에 가장 중요하고 광범위하게 사용되는 식각 기술이며 크게 습식(wet) 식각과 건식(dry) 식각으로 나눌 수 있다. 건식 식각은 고순도의 산을 사용하지 않아 수율과 생산고가 높으나 많은 공정변수나 복잡한 화학 및 물리 반응을 수반하는 등의 문제가 있다. 습식 식각에서 실리콘에 사용되는 식각 용액은 등방성(isotropic) 식각과 이방성(anisotropic) 식각으로 나눌 수 있으며, 불순물의 농도와 식각 용액의 온도에 따라서 식각률이 변화된다. 미세가공 기술은 등방성 식각액보다는 이방성 식각액을 많이 사용한다. 실리콘 이방성 식각은 결정면 방향에 대한 식각률, 불순물 도핑 정도에 따른 식각률, 외부 바이어스의 적용 등에 의존하며 자동적인 식각 정지 메카니즘으로써 사용될 수 있다. 이방성 식각액은 식각률이 실리콘의 결정 방향에 크게 의존하는 기본적인 성질을 가지고 있다. 실리콘 이방성 식각은 실리콘 센서의 구조 제작을 위해서 매우 중요하며, 집적회로 제조공정에서 사용되는 재료의 이방성 식각 기술에서 시스템의 집적을 모두 가능하게 하기 위하여 기존 공정기술과의 호환성은 필수적인 요건이다.

실리콘 이방성 식각 용액으로는 Hydrazine 용액, EDP 용액, KOH 용액, CsOH (cesium hydroxide) 용액, NH_4OH 용액 및 TMAH 용액 등이 있다.[3)~5)] 이방성 식각액 중에 KOH 용액은 양호한 식각 표면과 낮은 독성을 지니고 있어서 가장 광범위하게 사용되고 있지만 Si/SiO_2의 식각률 비가 낮고, 이동성 이온(K+)의 오염 때문에 습식 이방성 식각 후 몇 가지 열공정을 수행해야 하는 등 집적회로 공정과의 호환성에 문제가 있다.[6] Hydrazine 용액과 EDP 용액

Table 1 Comparison of properites of various anisotropic etchants

Etchant [Ref.]:	Si etch rate 80°C (㎛/min)	SiO_2 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

의 경우는 용액의 특성이 불안정하고 인체에 유해한 성질을 지니고 있으며, CsOH 용액의 경우는 높은 가격 때문에 어려움이 있다.[7] NH_4OH 용액은 이온에 무관하고 집적회로 공정과 호환성이 있는 이방성 식각액으로 제안되었으나 특성이 좋고 힐록이 없는 식각 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.[8), 9)] 표 1은 실리콘 이방성 식각에 쓰이는 대표적인 용액에 관한 특징을 명시한 것이다[10].

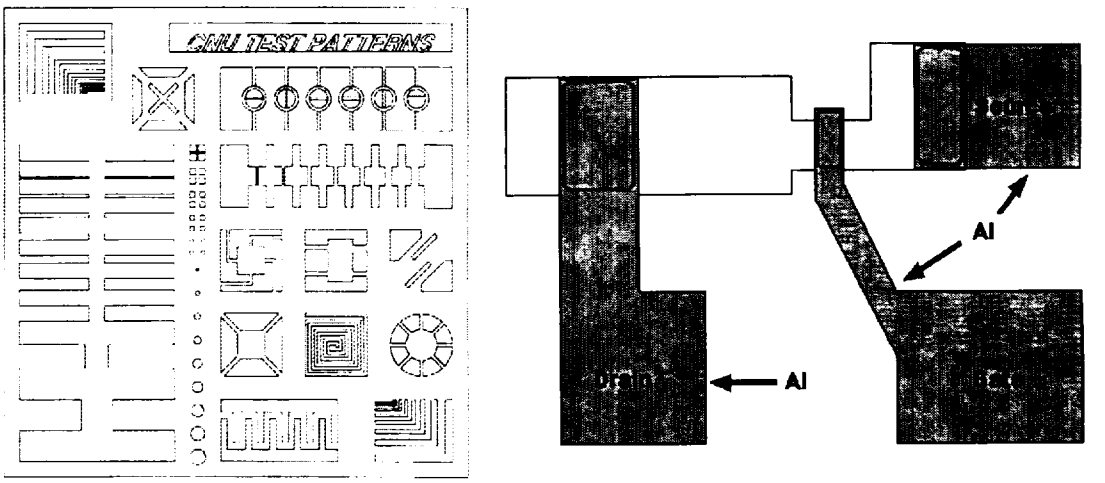
Ⅲ. 실 험

본 연구에서는 센서의 내부 또는 실리콘 기판과의 열적 차단을 위한 소자들에 널리 이용되고 있는 Si_3N_4막과 SiO_2막의 조합으로 이루어진 NON(Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4) 구조의 절연막을 갖는 다이아프램을 사용하였다[11]. NON구조의 절연막을 형성하기 위한 기판으로 결정면이 (100), 비저항이 2~3Ω·cm, 직경이 5인치, 두께가 610~640㎛인 붕소가 도핑된 p형 실리콘 웨이퍼를 사용하여 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액에서의 식각 특성을 분석하였다. 식각액은 TMAH (Aldrich 사제, 10wt.%) 용액을 탈이온수와 조합하여 3wt.%와 5wt.%의 용액을 제조하여 사용하였다. Si 분말 (Aldrich 사제, 325mesh, 99%), $Si(OH)_4$ (Aldrich 사제, <20㎛, 99.9% 이상) 및 APODS (Sigma 사제, 99.2%)를 적정량 TMAH 용액에 첨가하여 식각용액을 제조하였다.

본 연구에서는 두 종류의 샘플을 준비하였다. 실리콘 위에 NON 절연막 구조를 갖는 다이아프램 위의 시험용 패턴을 사용, 실리콘 미세가공 후에 식각 변화률 및 표면 상태를 평가할 수 있는 그림 1(a)의 마스크 패턴을 사용하였으며 그림 1(b)는 알루미늄 박막에 대한 식각 변화 및 보호 특성에 대한 실험을 위해 알루미늄 배선이 들어간 MOSFET를 사용하였다. 실험은 먼저 TMAH에 Si 분말을 첨가했을 때의 식각률 변화 및 표면 상태, 둘째 $Si(OH)_4$를 첨가 시 식각률 변화 및 표면 상태, 셋째 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액의 농도를 일정하게 유지한 상태에서 온도변화에 따른 식각률 변화, 넷째 온도를 일정하게 유지한 상태에서 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액의 농도변화에 따른 식각률 변화 및 식각 진행되는 동안의 방향 및 모양을 관찰하였다.

Ⅳ. 측정 결과 및 고찰

그림 2는 85°C에서 TMAH 5wt.%의 용액에다 Si 분말(6g/l) 또는 $Si(OH)_4$ (16g/l)를 첨가한 용액과 이 용액에다 APODS(2g/l)를 각각 첨가한 용액에 대한 식각률을 각각 나타낸 것이다. 이 실험에서 첨가물에 따른 식각률을 측정한 결과, Si 분말 또는 $Si(OH)_4$에 APODS를 첨가 시 식각률이 향상되었으며, 또한 Si 분말 보다 $Si(OH)_4$를 첨가할 때 더 높은 식각률을 보이고 있다. 식각 용액인 TMAH 용액에 Si 분말을 첨가 할 경우 수소의 생성을 억제하기 위해 45°C의 비교적 낮은 온도에서 용해시켰다. 이 경우 용해과정에서 용기 바닥에 잔여 물질 등이 형성되



(a) (b)

Fig. 1 (a) Test patterns for silicon anisotropic etching. (b) MOSFET for Al protection properties. Al thickness : 1.2㎛. Gate size : W/L = 40㎛/20㎛.

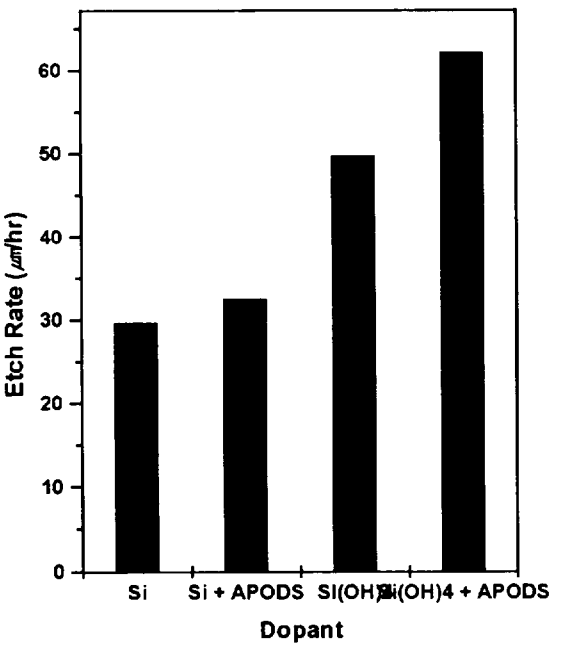


Fig. 2 Etch characteristics of p-type (100) silicon in TMAH (5wt.%) solutions with dissolved Si(6g/l), Si(6g/l) + APODS(2g/l), $Si(OH)_4$(16g/l) and $Si(OH)_4$(16g/l) + APODS(2g/l) at 85℃.

었다. 이는 $Si(OH)_4$를 첨가 시 고온에서 용해하여 잔여 물질 없이 용해되는 경우에 비해 식각률이 저조하고 식각 표면상태를 보다 나쁘게 하는 원인이 된다. 또한 Si 분말 또는 $Si(OH)_4$에 계면활성제인 APODS의 첨가함으로서 식각률이 증가됨을 알 수 있었다.

그림 3은 85℃에서 $Si(OH)_4$(16g/l)와 APODS(2g/l)를 함께 첨가한 TMAH 용액의 농도를 각각 3, 5, 10wt.%로 변화를 주었을 때의 식각 특성을 보이고 있다. 일반적으로 순수 TMAH 용액에서의 식각은 농도가 낮을수록 온도가 높을수록 식각률이 높다. 하지만 위의 결과에서 보면 3wt.% TMAH 용액의 식각률은 5wt.% TMAH 용액보다 낮음을 볼 수 있다. 이것은 식각정지 현상에 의한 것이다. 식각 정지의 기본 메커니즘은 양극산화 현상에 있으며, 식각정지 메카니즘을 보면 다음과 같다. 식 (1)에서 이방성 식각 용액에서 H_2O는 활발한 역할을 한다. H_2O는 우선 Si-Si 결합을 파괴해 Si-H와 Si-OH를 만든다. H_2O와 OH^-에 의한 계속된 반응은 식각 용액에 용해될 수 있는 형태인 $Si(OH)_2(O^-)_2$를 형성한다.

$$Si + 2H_2O + 2OH^- \rightarrow 2H_2 + Si(OH)_2(O^-)_2 \quad (1)$$

결국 이온화된 실리카 ($Si(OH)_2(O^-)_2$)의 형태로 제거되며 식각이 진행된다. 물분자의 OH^-이온은 표면의 Si 원자를 수화시키면서 Si의 표면을 공격한다.

$$Si_2^+ + 2(OH^-) \rightarrow Si(OH)_2 \quad (2)$$

이 OH^- 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 성장 속도를 증가시켜 식각을 정지시킨다. 결국 3wt.% TMAH 용액의 농도에서 5wt.% TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액보다 식각률이 저조한 원인은 과다한 $Si(OH)_4$ 이 첨가됨으로써 식각 표면에 산화막이 형성되어, 식각이 정지되기 때문이다. 또한 산화막인 SiO_2는 식 (3)과 같이 수소의 발생으로 인하여 형성된다.

$$Si(OH)_2 \rightarrow SiO_2 + H_2 \quad (3)$$

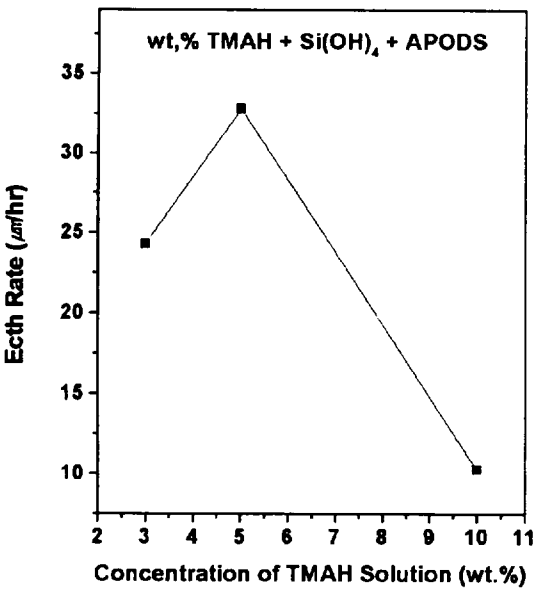


Fig. 3 Etch rate vs various concentration of TMAH solutions with dissolved silicic acid (16g/l) and APODS(2g/l) characteristics of p-type (100) silicon at 85℃.

이 발생된 수소는 실리콘 표면에 부분적 가상 마스크(pseudo-amsking)를 형성하며, 식각 표면위에 힐록(hillock)을 만든다. 이를 제거하기 위해 APODS같은 계면제를 첨가한다. 계면활성제 첨가에 따른 반응식은 식 (4)와 같다.

$$S_2O_8^{-2} + 2e^{-2} \rightarrow 2SO_4^{-2} \quad (4)$$

그림 4는 TMAH(5wt.%)+$Si(OH)_4$(16g/l)+APODS (2g/l) 용액에서 식각온도(80℃, 85℃, 90℃)의 변화에 따른 식각률의 변화를 보여주고 있다. 온도가 증가할수록 식각률이 증가되는 일반적인 특성을 보임을 알 수 있다. 이 때 식각률은 식각용액의 농도에 1차 비례관계를 나타내고 있다.

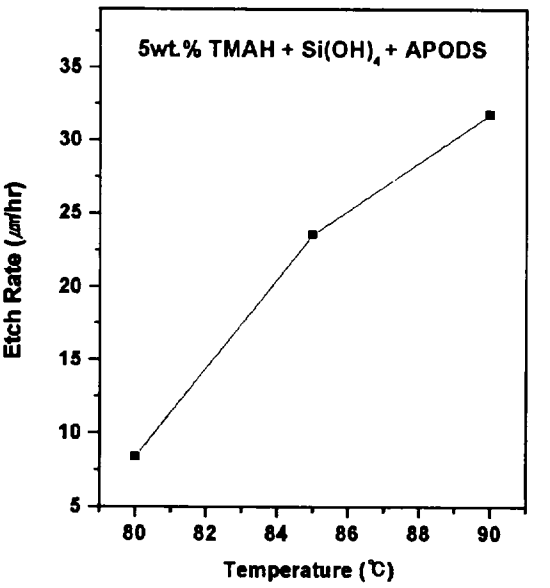
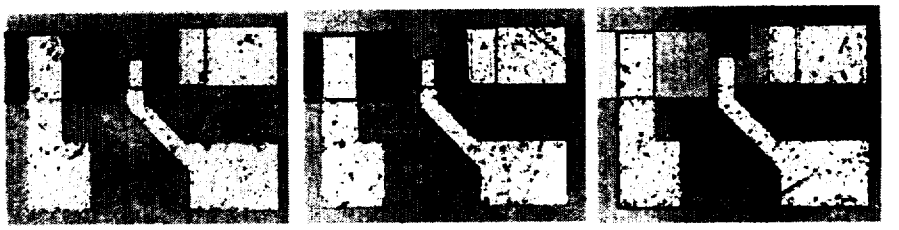


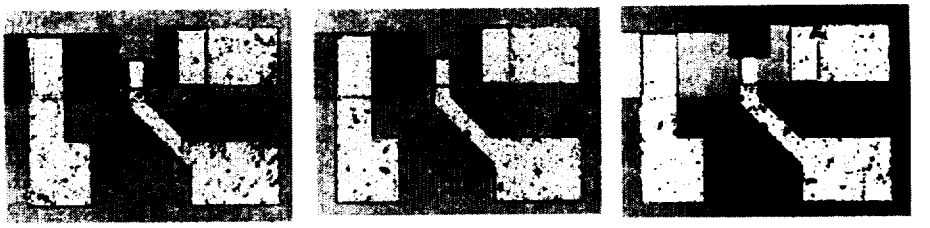
Fig. 4 Etch rate vs various temperature characteristics in the TMAH(5wt.%) +silicic acid (16g/l)+APODS(2g/l) for p-type (100) silicon etch.

그림 5에서는 TMAH+Si(4g/l) 용액에서 TMAH 용액의 농도와 식각온도의 변화에 따른 MOSFET의 알루미늄 배선에 미치는 영향을 평가한 현미경 사진이다. 이 결과 TMAH 용액의 농도가 5wt.% 이하에서는 예견된 바와 같이 알루미늄 배선에 어떤 영향도



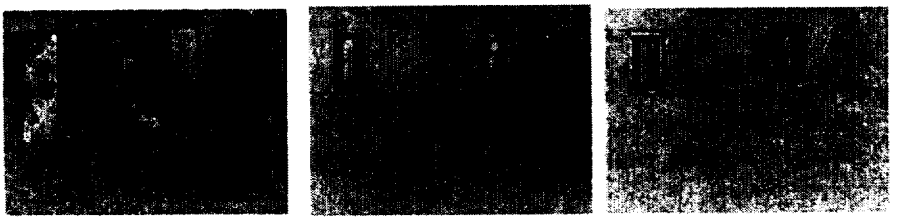
80℃ 85℃ 90℃

(a) TMAH 3wt.%



80℃ 85℃ 90℃

(b) TMAH 5wt.%



80℃ 85℃ 90℃

(c) TMAH 10wt.%

Fig. 5 Photograph of etched MOSFET in the (a) TMAH(3wt.%)+silicic acid (16g/l), (b) TMAH(5wt.%)+silicic acid (16g/l), (c) TMAH(10wt.%)+silicic acid (16g/l) solutions at 80, 85 and 90℃, respectively

미치지 않았다. 그러나 TMAH 용액의 농도가 10wt.%에서는 알루미늄 배선이 보호되지 못하는 것으로 나타났으며 온도가 높아짐에 따라 알루미늄의 식각현상이 두드러졌다. 식각 용액은 금속 박막인 알루미늄을 손상시키는 원인이 되며, 알루미늄은 공기에 노출시 알루미늄 산화층($Al(OH)_3$)를 형성한다. 이 산화층은 알카리 용액에서 식(5)과 같이 반응되며 $Al(OH)_4^-$를 형성한다.

$$Al(OH)_3 + OH^- \rightarrow Al(OH)_4^- \quad (5)$$

계속적인 $Al(OH)_4^-$ 이온이 증가되면서 알루미늄의 손상이 감소된다. TMAH 용액에 Si 분말 또는 $Si(OH)_4$를 첨가함으로써 알루미늄 실리카의 박막이 형성되며 이것은 알루미늄에 대해 보호막의 기능을 한다. 이상의 결과로부터 (100) 실리콘에 대한 식각률과 표면의 특성은 TMAH 용액의 wt.%농도 및 온도에 대하여 적정량의 Si 분말 또는 $Si(OH)_4$를 첨가하여 금속 배선인 알루미늄이 보호될 뿐만 아니라 APODS를 첨가하여 저농도에서의 식각률 및 힐록 형성의 문제점을 제어하여 보다 양호한 식각 표면을

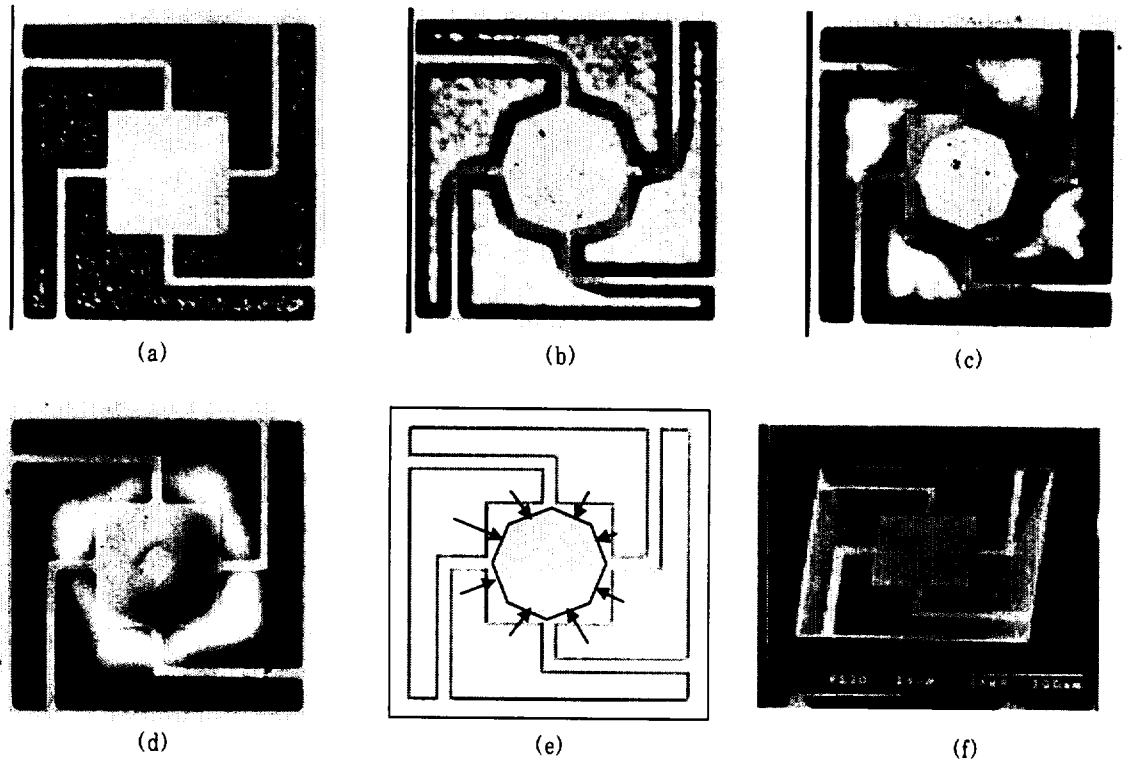


Fig. 6 Etching procedure of bridge type diaphragm in the TMAH(5wt.%)+silicic acid(16g/l)+APODS(2g/l) solution at 85℃ with times (a) 0.5hr, (b) 1hr, (c) 1.5hr, (d) 2hr, (e) test pattern with etching direction on the diaphragm, (f) fully etched shape (3.5hr)

얻을 수 있었다.

그림 6은 85℃에서 TMAH(5wt.%)+silicic acid (16g/l)+APODS(2g/l)의 식각 용액을 사용하여 브리지형 다이아프램의 시간에 따른 식각 진행 과정 및 방향을 나타낸 현미경 사진이다. 그림 6(b)는 사각의 모서리 부분에서 식각이 이루어져 점차 그림 6(c)와 6(d)와 같이 일정한 결정 방향에 따라 식각이 진행됨을 보이고 있다. 그림 6(e)는 화살표 방향인 8각형의 결정 방향으로 식각이 이루어짐을 나타낸 것이다. 그림 6(f)는 3시간 30분 동안 식각한 후에 나타난 브리지형 다이아프램의 전자현미경 사진이다.

그림 7은 3가지 캔티레버 패턴이 시간에 따라 식각이 진행되는 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 둥근 모양과 직사각형 모양의 각기 다른 패턴에 따라 식각 진행방향이 틀리며 완전 식각시 모양 또한 다름을 알 수 있다. 식각된 패턴의 깊이와 홀의 모양은 식각창의 결정면 방향과 이방성 식각 용액에 의해 결정된다. (100)/(111) 웨이퍼일 경우 사각의 식각창은 (111)결정면을 따라 54.7° 로 식각된다. 식각 변화는 일반적으로 온도, 식각액의 성분, 노출된 실리콘 표면의 원자결합 밀도, 식각용액의 수산이온과 같은 여러 요소에 의해 영향 받는다. 하지만 실험 결과 (111)면의 이방성 식각은 (100)에 비해 약 10배정도 느리게 진행되며, 실리콘은 (100) 결정면에서 가장 높은 식각률을 나타내었다. 이와 같이 이방성 식각 용액에서의 식각 변화 및 식각 방향은 결정면의 방향 뿐만 아니라 여러 요소에 의해 결정되어질 수 있으며, 표 2는 실험결과 식각창의 모양과 구조에 따라 형성된 모양을 표시한 것이다. 따라서 더 면밀하게 형성된 멤브레인을 위해서는 이방성 식각 용액에 또 다른 성질을 탐구할 필요가 있다.

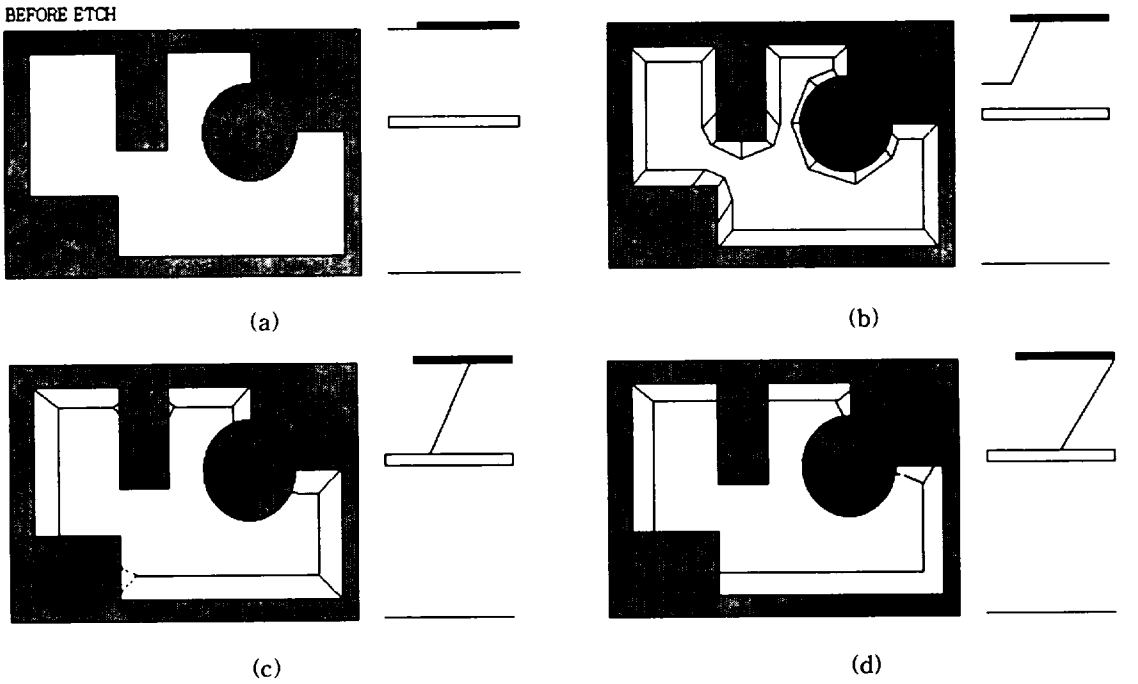


Fig. 7 Oxide cantilevers can be formed by undercutting an oxide etching mask. (a) before etch. (b), (c) and (d) progressive etched patterns with time

Table 2 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

V. 결 론

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

후면 정렬과 같은 공정없이 모든 공정이 끝난 반도체 소자의 금속배선에 실리카막을 형성하여 알루미늄을 보호하고, 식각 시 수소가스의 발생을 억제하여 식각된 실리콘의 표면에 생성되는 힐록을 방지하므로서 보다 양호한 식각 표면을 형성할 수 있었으며, 마이크로 센서 응용에 쓰이는 다양한 형태의 브릿지형 다이아프램을 식각한 결과 대부분이 내재 응력이 나타나지 않은 완벽한 모양을 갖추고 있는 결과를 얻을 수 있었다. TMAH 용액의 농도가 3~10wt.%이고 $Si(OH)_4$(16g/l)와 APODS(2g/l)를 첨가하여 식각 온

도가 80~90℃ 범위에서 형성된 알루미늄 배선이 실리콘 식각과정에서 보호됨을 확인할 수 있었다. 따라서 TMAH+Si+APODS 또는 TMAH+$Si(OH)_4$+APODS 용액에서의 미세가공 기술은 각종 센서 제조기술로 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

1) M. P. Wu, 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.

2) E. D. Palik, Bermudez, V. M., Glembocki, O.J., "Ellipsometric study of orientation-dependent etching of silicon in aqueous KOH", Journal of the Electrochemical Soc., Vol.132, No.4, pp.871-884, 1985.

3) U. Schakenberg, Benecke, W., Lange, P., "TMAHW etchant for silicon micromachining".

4) H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgärtel, 1990, "Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions," J. Electrochem. Soc., Vol.137, pp.3626-3632.

5) X. P. Wu, and W. H. Ko, 1987, "A study on compensating corner undercutting in anisotropic etching of (100) silicon," Tech. Digest, Transducers 1987, Fourth Int. Conf. on Solid State

6) H. Camon and Moktadir, Z "Atomic scale simulation of silicon etched in aqueous KOH solution", Sensors and Actuators A, Vol.46-47, pp.27-29, 1995.

7) J. D. Yam, D. Ip, J. J. Santiago-Avilesand J. N. Zemel, 1991, "An Investigation of the Anisotropic Etching of (100) Silicon Using Cesium Hydroxide," Sensors and Actuators A, 29, pp.121-126.

8) M. C. Acero, J. Esteve, Chr. Burrerand, A. Götz, 1995, "Electro-chemical etch-stop characteristics of TMAH:IPA solutions," Sensors and Actuators A, 46-47, pp.22-26.

9) A. Merlos, 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.

10) Kurt E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material", IEEE, Vol. 70, No. 5, May 1982, Technical Digest, Transducer '91, San Francisco, pp.815-818, 1991.

11) K. M. Lee, S. T. Ko, Y. M. Kim and H. S. Ko, "Micro Vacuum Sensor Using Silicon Micromachining Techniques," Cheju Nat'l Univ., J of Ind. Tech. Inst., Vol. 9, No. 1, pp.121-127, 1998.