

KOH 용액을 이용한 단결정 실리콘의 이방성 식각특성에 관한 연구

김환영, 천인호, 김창교*, 조남인

선문대학교 전자공학과, 아산, 336-840

*순천향대학교 전기공학과, 아산, 336-745

A study on anisotropic etching property of single-crystal silicon using KOH solution

H.Y. Kim, I.H. Chon, C.K. Kim* and N.I. Cho

Department of Electronic Engineering, Sun Moon University, Asan 336-840, Korea

**Department of Electrical Engineering, Soonchunhyung University, Asan 336-745, Korea*

요 약 KOH 용액을 이용한 단결정 실리콘의 이방성 식각 특성을 조사하였다. n형 (100) 단결정 실리콘 웨이퍼를 시료로 사용하였으며, 식각 비율이 월등히 작은 SiO₂층을 실리콘 식각의 마스크로 사용하였다. 실리콘의 식각속도와 식각상태는 KOH 용액의 농도와 온도조건 뿐만 아니라 용액의 균일도, 용액의 교반속도와 교반방향 등에 따라 큰 차이가 발생하였다. 실리콘의 식각 속도는 KOH 농도가 낮아질수록 증가하며, 온도는 높아질수록 증가하는 경향을 보였으며, 20 wt%~50 wt%의 농도 범위와 50°C~105°C의 온도 범위에서 식각속도는 10 μm/hr~250 μm/hr로서 큰 폭으로 변화하였다. 식각된 표면의 거칠기중 hillock의 발생은 (100)면과 (111)면의 식각 속도 비율이 커질수록 증가함을 알 수 있었다.

Abstract The anisotropic etching behavior of single crystal silicon were studied in aqueous KOH solution. N-type (100) oriented single crystal silicon wafers were used for the study, and the SiO₂ layer, whose etching rate is known to be much slower than that of silicon in the KOH solution, was used as a mask for the silicon etching. The silicon etching rate and the etching properties are shown to be a function of etchant temperature uniformity, circulation speed, and circulation direction of the etchant as well as the etchant concentration

and the temperature. The etching rate is increased as the temperature is increased from $10 \mu\text{m/hr}$ to $250 \mu\text{m/hr}$ in the range of $50^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$. Hillock density and height is observed to be correlated with the etchant concentration and the etch temperature. The variation of the hillock density was explained by the ratio between the etching rate of (100) orientation and that of (111) orientation.

1. 서 론

반도체 집적회로 기술에 기반을 두고 있는 미세기전소자(MEMS : Micro Electro Mechanical System)기술은 1980년대 처음 시도되었으며 국내외적으로 센서분야에서 그 활용도를 확대해 가고 있는 추세이다. 이는 MEMS 기술이 3차원구조를 구현하는데 유리하며[1-3], 극소형 센서의 구현이 가능하기 때문이다. 주요 응용분야는 압력센서[4], 가속도계[5] 등을 들 수 있다[6]. MEMS 기술에 의한 소자의 구현은 많은 경우 실리콘 재료를 이용하는데, 그이유는 실리콘 재료의 기계적, 전기적 성질에 대한 많은 데이터가 축적되어 있기 때문이다. 또한 단결정 실리콘은 결정방향에 대한 식각비율의 강한 의존성 때문에 다양한 실리콘 구조들을 고도로 제어할 수 있고 재현할 수 있다. KOH는 무기성 용액으로 단결정 실리콘을 이방성 습식 식각하는 용액으로 널리 이용되어 왔다[7]. 실리콘의 이방성 식각은 $\langle 100 \rangle$ 면의 식각속도가 54.7° 의 사이각을 이루는 $\langle 111 \rangle$ 면의 식각속도와 비교할 때 약 100 : 1 정도로 빠르게 식각이 진행됨으로[8] 가능하며, 결과적으로 역피라미드 형태를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 KOH 용액을 이용하여 단결정 실리콘의 식각 특성을 알아보려고 하며, 특히 KOH 용액의 농도와 온도, 또는 기타 공정조건(예, 교반 및 비교반, 용액의 유속방향과 마스크 패턴의 방향, 용액의 온도

균일도)이 최종적으로 실리콘 구조에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험방법

단결정 실리콘의 이방성 식각 실험을 위해 먼저 $\langle 100 \rangle$ 인 n-type Czchralski방법으로 성장시킨 4inch 웨이퍼를 이용하여, 웨이퍼 위에 CVD(Chemical Vapor Deposition)방법으로 SiO_2 막을 5000 \AA 을 적층시켰다. 다음은, $10 \mu\text{m}$ 의 선폭을 갖는 마스크 패턴을 이용하여 SiO_2 막을 사진식각 하였다.

PR 코팅후 대류식 오븐을 이용하여, 90°C 에서 15분 정도 soft bake 했는데, 이 과정은 코팅후 잔존하는 용매를 증발시키고, 감광액과 웨이퍼 사이의 접착력을 증대시킨다. QUINTEL사 Q-2001CT모델의 mask aligner를 사용하여 4초간 노광 후 현상액 DPD-100을 상온에서 원액 그대로 사용하여 22초 동안 현상 시켰다. 현상이 끝난 웨이퍼는 감광막의 손상을 방지하기 위해 135°C 에서 20분간 가열하여 경화시킨다. 이 과정까지 준비된 웨이퍼는 $1 \times 2 \text{ cm}$ 의 크기로 시료를 준비한다. 시료를 48%HF와 DI water를 70 : 30 비율로 혼합한 용액에 5분 정도 담그어 SiO_2 막을 마스크 패턴을 따라 식각하였다. 그후에 PPS-100N stripper를 이용하여 감광막을 제거했다. 여기에서 실리콘 웨이퍼 상에 남아있는 SiO_2 층은 KOH 용액에 대하여

마스크 역할을 하게 된다.

이방성 식각을 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 식각액의 온도와 농도를 일정하게 유지하기 위해서 항온조를 중탕방식을 채택했다. 항온조는 전기 히터와 온도 조절기를 이용하여 상온에서 200°C 범위 내에서 온도를 일정하게 유지 시킬 수 있고, 실리콘 오일을 이용한 중탕방식으로 KOH 용액의 온도편차는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이다. 항온조의 머리에는 교반기, 냉각기, 온도계가 설치된다. 교반기는 회전속도가 최고 600 rpm이며, 냉각기는 리비히 냉각기를 사용하였고, 온도계는 수은 온도계로서 0~200°C까지 온도를 잴 수 있다. 교반기는 항온조 내의 식각액을 항온조 바닥에서 10 cm 정도 위에서 시계방향으로 일정한 속도로 회전시켜 줌으로써 농도와 온도차이를 고르게 해 주는데 본 실험에서는 200 rpm으로 회전하였다. 냉각기는 실험온도가 고온일 경우에 기체화한 식각액을 냉각시켜 줌으로써 농도를 균일하게 유지하게 한다. 또한 온도계는 중탕기와 항온조 내의 식각액의 온도차이를 보정해 주는 역할

을 함으로서 정확한 온도를 유지할 수 있다.

시료꽃이는 시료를 수직으로 꽂을 수 있게 하였는데, 그것은 KOH용액에 의해서 실리콘 웨이퍼가 식각될 때의 발생하는 수소기포가 웨이퍼의 표면에 흡착하는 양을 줄임으로서 좋은 표면 거칠기를 얻을 수 있기 때문이다. 85 % KOH를 DI water에 용해 시켜서 20~50 wt%의 농도로 만들어진 KOH용액을 50~105°C 범위에서 변화 시켰으며, 식각 정도와 모양을 보기 위하여 시료를 수직으로 잘라 그 단면을 주사형 전자현미경(SEM), JEOL 모델 JSM-6400으로 관찰하였으며, 가속전압은 20 kV로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

KOH 용액에 의한 단결정 실리콘의 식각 결과로서 기대되는 구조는 SiO_2 층 마스크가 식각된 부분에 대하여 (100) 결정면에서 54.7°의 각도를 이루면서 이방성 식각이 이루어진 형태이며 이러한 모양에서 식각된 측면 또는 실리콘 표면의 거칠기는 없어야 한다. 그러나 실험결과, 양호한 이방성 식각을 구현하기 위하여 KOH 용액의 온도의 균일성, KOH 용액의 교반 방향, 마스크 패턴과 웨이퍼의 결정성 일치 등도 고려하여야 하며, 식각속도는 KOH 용액의 농도 및 온도에 따라 크게 변함을 알 수 있었다. 또한 식각된 실리콘의 <100>표면에도 피라미드 모양의 작은 돌출부가 발생하였는데 이를 hillock이라고 부른다[9-10]. Hillock의 발생밀도와 크기는 바닥의 거칠기에 악영향을 미침은 자명하다. Hillock의 모양은 일반적으로 밑면이 4각형인 경우와 8각형인 경우의 2종류이나 본 실험에서는 4각형의 밑면 모양 피라미드 형태만을 볼 수 있었다. Fig. 2는 식각

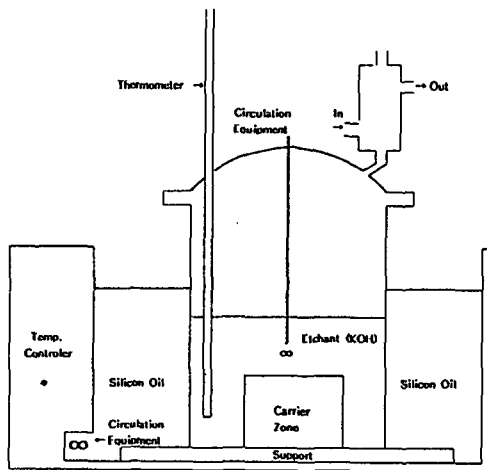
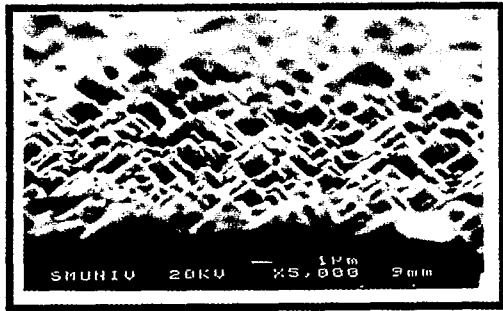


Fig. 1. A scheme of the etching experimental equipment.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. The hillock of silicon (100) plane with different etchant temperatures when the concentration is fixed at 20 wt% :
(a) 50°C, (b) 60°C, (c) 90°C.

후 실리콘 (100) 표면에서 발생된 hillock을 SEM으로 관찰한 결과로서, KOH용액의 농도를 20 wt%로 고정하고 온도를 변화시켰을 때 hillock의 밀도와 크기가 변화함을 보여주고 있다. Fig. 에서 (a)는 50°C, (b)는 60°C, (c)는 90°C 일때를 각각 나타낸다. 여

기서 알 수 있는 것은 온도 증가에 따라 hillock의 밀도와 크기가 현저히 감소한다는 것이다. 즉 (a) 50°C인 경우 hillock의 밀도가 $1\sim 2/\mu\text{m}^2$ 이며 높이는 $3\mu\text{m}$ 정도 이지만, (b) 60°C인 경우 hillock의 밀도는 $0.3/\mu\text{m}^2$ 정도이며 높이는 $2\mu\text{m}$ 정도로 감소하였고, (c) 90°C인 경우는 밀도가 $0.1/\mu\text{m}^2$ 이하, 높이는 $0.5\mu\text{m}$ 이하로 급격히 감소 하였다. 또한, hillock의 밀도와 크기는 KOH 용액의 농도가 낮을수록 커지는 관계가 관찰되었다. 이렇게 관찰된 KOH 용액 상태와 hillock의 발생 상태와의 관계는 식각공정 중 이웃하는 결정면들의 식각속도의 차이에 기인하지만 [9-10], 단순히 식각속도로만 설명할 수는 없다. 후술하겠지만, 실리콘의 (100)면의 식각속도는 KOH 용액의 농도가 낮거나, 용액의 온도가 높을수록 증가하는 경향이 관찰되었다. 결정면에 따른 식각속도는 KOH 용액 상태인 용액의 농도, 용액의 온도, 용액의 산도 또는 용해된 실리콘 양에 따라 민감하게 변하는 것으로 알려져 있다[11-12]. 타 연구팀의 실험결과에 따르면[6], 실리콘의 (100)면과 (110)면의 식각속도는 약 1.6의 비율을 가지며 용액의 온도 및 농도조건에 따라 비교적 작은 변화폭을 보이지만, (100)면과 (111)면의 식각속도는 비율이 30~200이 되는 큰 변화폭을 가지며, 용액의 온도가 감소할수록 이 비율은 커지는 것으로 보고되어 있다. 따라서, hillock의 발생은 (100)면의 식각속도에만 관계되는 것이 아니라 (100)면과 (111)면의 식각속도 비율에 따라 달라지는데 그 비율이 커질수록 hillock의 발생이 증가한다고 할 수 있다.

식각실험을 통하여 식각된 실리콘의 측면인 (111)면에서 거칠기가 관찰되기도 하였다. Fig. 3은 그러한 예 중 (111)면의 SEM micrograph로서, 거친모양과 평탄한 모양이

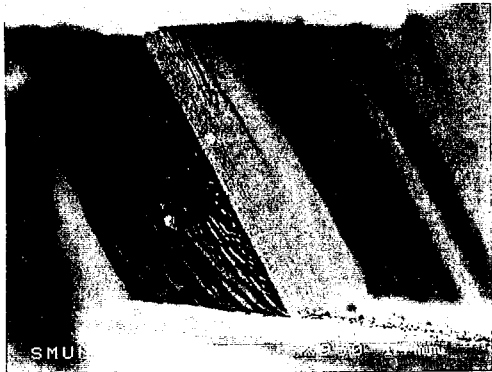


Fig. 3. SEM micrograph of $\langle 111 \rangle$ side wall plane.

동시에 존재한다. 이러한 거친 모양은 (111) 단결정 실리콘 면과 마스크 패턴을 잘 일치시키지 않은 마스크 misalign에 의해 발생됨을 알 수 있었고, 단결정 실리콘 웨이퍼의 1차 절단면과 마스크 패턴을 나란히 정렬시키면 평탄한 측면을 쉽게 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 H. Seide 등[6]의 실험에서도 관찰되었으며, 실리콘의 결정방향에 따라 식각속도가 크게 차이남에 기인한다. 단결정 실리콘에서 (111)면의 식각속도가 가장 느리며 (111)면과 15°의 각도를 이루는 (331)면의 식각속도는 월등히 빠르다. 모든 결정방향 중 가장 식각속도가 빠른면은 (110)면이다. 그러므로 (111)면과 (100)면의 식각속도 차이에 의해서 (111)면 보다 식각속도가 빠른 (331)면과 (110)면을 따라 부분적인 식각이 일어나고 이러한 결과로서 거친 측면이 생길 수 있다. 이를 방지할 수 있는 가장 좋은 방법은 웨이퍼의 1차 절단면을 마스크 패턴과 정확히 일치시켜 노광 및 사진식각작업을 하는 것이다. 실리콘 웨이퍼는 단결정 실리콘을 ingot 형태로 성장시킨 후, X-ray 방법으로 정확한 orientation을 파악하고 1차 절단면을 자르므로 이를 이용한

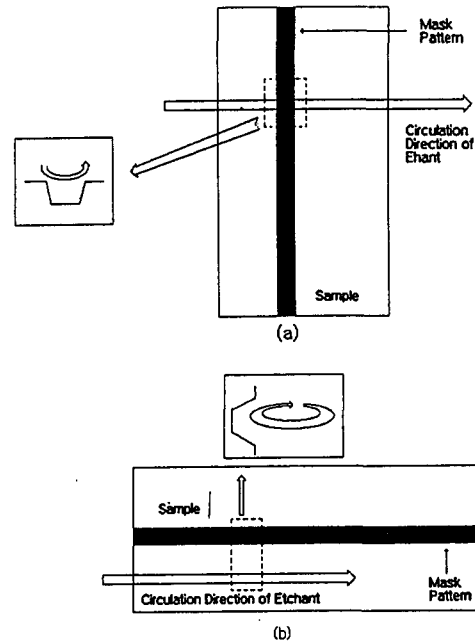


Fig. 4. Schematics of angles between etchant circulation direction and mask pattern : (a) 90°, (b) 180°.

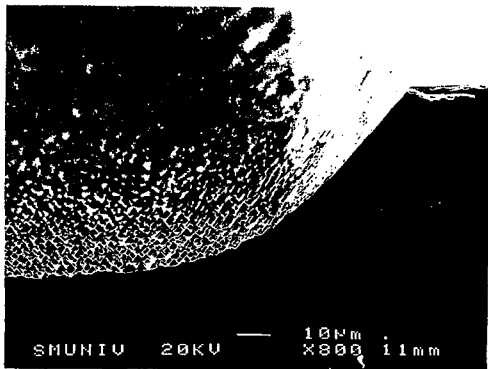
align이 가능해진다.

실험의 결과로서 얻어진 또 다른 Know-how는 KOH 용액을 교반시켜 식각을 실시하면 더욱 빠르게 식각을 수행할 수 있다는 것이며, 이렇게 교반을 할 경우에는 KOH 식각용액의 유속방향과 마스크 패턴의 방향을 일치시킴으로서 양호한 형태를 얻을 수 있는 것이다. Fig. 4(a)는 식각액의 유속방향과 마스크 패턴의 방향이 직각을 이룬 경우를 나타내고 있다. 실리콘의 식각은 KOH 용액의 흐름에 의해 촉진되고 용액의 속도가 커지면 식각속도 또한 빨라진다. 실리콘 웨이퍼가 도랑 모양의 이방성 식각이 이루어지면 밀면의 가장자리는 KOH 용액의 흐름속도가 상대적으로 느리고, 따라서 가장자리의 식각속도가 느림으로 해서 양호한 도랑 모양을 얻을 수 없다. 이렇듯 KOH 용액 흐름방향을

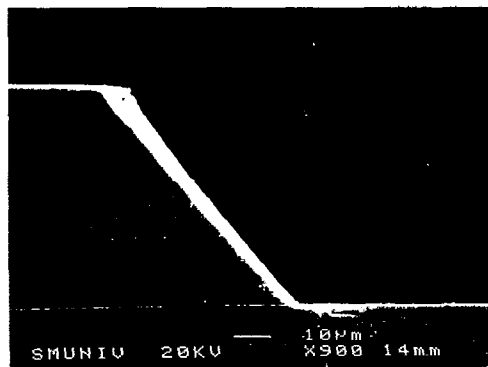
과 마스크 패턴의 방향을 직각으로 하고 실험한 결과를 Fig. 5(a)에서 보여주고 있다. 심한 hillock의 발생과 밀면의 가장자리가 각도를 유지하지 못한 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 4(b)와 같이 KOH 용액의 흐름방향과 마스크 패턴의 방향이 나란한 경우는 도랑 모양의 어느 부분에서나 KOH 용액의 유속이 거의 같으므로 양호한 모양을 얻을 수 있는데 이와 같은 실험의 예는 Fig. 5(b)와 같다.

Fig. 6은 KOH 용액의 농도와 온도의 변화에 따라 (100) 실리콘 웨이퍼의 식각속도를 표시한 것이다. 식각속도는 식각 작업후

SEM 단면 사진을 촬영하고 표면부터의 깊이를 측정함으로써 얻어졌다. Fig. 6에서 알 수 있는 것은 KOH 용액의 낮은농도와 높은 온도는 식각속도가 빠르게 한다는 것이다. 그중에서 KOH 용액의 온도는 식각속도에 더욱 큰 영향을 미치며, 50°C에서 3~12 μ m/hr이던 낮은 식각속도가 105°C에서는 200 μ m/hr정도까지 증가하였다. 한편 KOH 용액의 온도가 일정한 경우, 농도가 진해질수록 식각속도는 낮아지는 경향을 보이니 온도에 따라서는 40 wt%에서 비교적 빠른 식각속도를 나타내고 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. SEM cross-sectional view with respect to angles between mask pattern and etchant circulation direction : (a) 90°, (b) 180°.

4. 결 론

알카리 식각액 중에서, 단결정 실리콘의 식각에 널리 이용되고 있는 KOH 용액을 이용하여 (100)단결정 실리콘 웨이퍼에 대하여 이방성 식각을 실시하였으며, 식각의 결과가 MEMS 응용상 적합한 모양이 되는지를 조사하였다. 단결정 실리콘의 식각 특성은 KOH 용액의 농도와 온도에 따라 크게 달라짐은 물론, KOH 용액의 신선도, 용액의 흐름방향과 속도, 용액의 온도 균일도, 마스크 패턴과 실리콘 결정성과 일치 여부가 모두 실리콘 단결정의 식각 모양에 영향을 줌

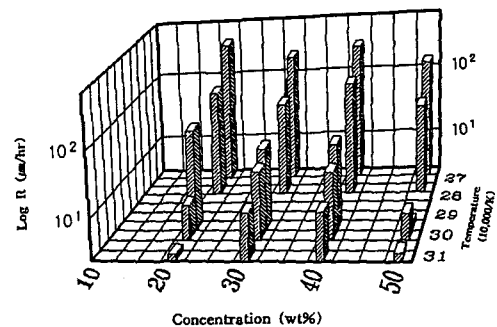


Fig. 6. Silicon etch rate as a function of etchant temperature and concentration.

을 알 수 있었다. (100)방향의 식각속도는 KOH 용액의 온도가 증가함에 따라 크게 증가하였으며 용액의 농도가 진해지면 식각속도는 감소하였는데, 식각속도만을 고려하면 40 wt%, 90°C가 최적의 용액조건으로 판되었다. KOH 용액을 교반할 경우 용액의 흐름 방향과 마스크 패턴의 방향은 평행을 이루는 것이 유리하며, 직각이 되면 일정 깊이 식각이 진행된 후 모서리 부분의 도랑 모양이 각도를 이루지 못할뿐 아니라 실리콘 표면이 거칠어지는 결과를 초래하게 된다. 또한 KOH용액의 온도가 균일하지 않은 경우에는 식각된 실리콘 (100) 표면상태가 매우 거칠었다. 한편 마스크 패턴과 웨이퍼의 1차 절단면과 정확한 align을 하지 않은 경우에는 측면인 (111)면에서 심한 거칠기가 관찰되었다. Hillock의 발생은 KOH 용액의 농도가 증가하거나 용액의 온도가 낮아질 때 그 밀도와 크기가 늘어나는 경향을 보여 주었는데 그것은 (100)면과 (111)면의 식각속도 비율에 의해 설명되었다.

감사의 글

본 논문은 정보통신연구관리단 “대학기초연구지원사업”의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K.E. Bean, IEEE Trans. Electron Devices ED-25 (1978) 1185.
- [2] E. Bassous, IEEE Trans. Electron Devices ED-25 (1978) 1178.
- [3] H. Seidel and L. Csepregi, Sensor and Actuators 4 (1983) 455.
- [4] K.E. Petersen, Proc. IEEE 70(1982) 1241.
- [5] L.M. Roylance and J.B. Angell, IEEE Trans. Electron Devices ED-29 (1985) 27.
- [6] H. Seidel, L. Csopregi, A. Heuberger and H. Baumgartel, J. Electrochem. Soc. 137 (1990) 3612.
- [7] R.M. Finne and D.L. Klein, J. Electrochem. Soc. 114 (1967) 965.
- [8] A. Reisman, M. Berkenblit, S.A. Chan, F.B. Kaufman and D.C. Green, J. Electrochem. Soc. 126 (1979) 1406.
- [9] S. Tan, H. Han and R. Boudreau, Sensor and Actuators A36 (1993) 233.
- [10] L.M. Landsberger, S. Naseh, M. Kahrizi and M. Paranjape, IEEE Trans. J. Microelectromechanical Systems 5 (1996) 106.
- [11] L. Ristic, Sensor Technology and Devices, Ch. 3(Artech House, Boston, 1994).
- [12] N.F. Raley, Y. Sugiyama and T. van Duzer, J. Electrochem. Soc 131 (1984) 161.