

논문 2000-9-3-04

변위센서응용을 위한 피라미드형 실리콘 터널링소자의 제조

마 대영, 박기철, 김정규

Fabrication of the pyramid-type silicon tunneling devices for displacement sensor applications

Tae Young Ma*, Ki Cheol Park*, Jeong Gyoo Kim*

요약

터널링 전류는 전극사이의 거리에 지수적으로 비례한다. 따라서 터널링 전류의 변화측정을 통하여 전극간격의 미세변위를 측정할 수 있다. 본 실험에서는 micro-tip과 membrane사이에 터널링 전류가 흐르는 피라미드형 실리콘 터널링소자를 micro-electro-mechanical systems (MEMS) 공정을 이용하여 제조하였다. 단결정 실리콘을 KOH 용액안에서 이방성 에칭 시켜 micro-tip을 제조하였으며, 이때 SiO₂막을 마스크로 사용하였다. Si₃N₄막으로 membrane을 형성하였다. 마스크 방향에 따른 에칭 진행과정의 차이를 조사하였으며 membrane으로 사용한 Si₃N₄막의 stiffness를 측정하였다. 실험으로 측정하기 어려운 영역의 Si₃N₄막 stiffness 예측을 위한 모델식을 제시하였다.

Abstract

The tunneling current is exponentially dependent on the separation gap between a pair of conductors. The detection of displacement can be, therefore, carried out by measurement of a variation in the tunneling current. In this experiment, we fabricated pyramid-type silicon tunneling devices in which a tunneling current flow between a micro-tip and Si₃N₄ thin film membrane. A MEMS process was used for the fabrication of the tunneling devices. The micro-tips were formed on Si wafers by undercutting a differently oriented square of SiO₂ with KOH. The stiffness of the Si₃N₄ films were observed and the model for the stiffness calculation, which is useful in predicting the stiffness even when the stiffness ranges beyond the scope of the normal experimental condition, was suggested.

1. 서론

scanning tunneling microscopy (STM)의 개발에 따라 진공 또는 가스 분위기 내에서도 터널링 전류가 흐른다는 것이 밝혀졌다.^[1] 터널링 전류(I_{tun})는 두 전극사이의 간격(s)과 다음의 비례관계를 갖는다.^[2]

$$I_{tun} = \frac{V}{R_0} \exp(-\alpha s \sqrt{\psi}) \quad (1)$$

여기서 V, R₀, α 및 ψ는 각각 전극사이의 전압, 유전 물질, 전극사이의 전위장벽에 비례하는 상수 (1.025 eV^{-1/2} Å⁻¹) 및 전위장벽을 나타낸다. 따라서 터널링 전류의 변화측정을 통해 전극간격의 미세한 변위를 추정할 수 있으며, 현재 이 방법을 이용한 가속도 센서^[2], 자기 센서^[3], 적외선 센서^[4]의 개발이 이루어지고 있다. 특히 터널링 소자의 한쪽 전극을 membrane위에 형성

경상대학교 전기전자공학부, 자동화 및 컴퓨터 응용기술연구소(Division of Electrical and Electronic Eng. Research Institute of Automation & Computer Eng.)

<접수일자 : 2000년 1월 24일>

할 경우, membrane에 인가된 극소량의 압력변화가 s의 변화를 유발하므로 이 현상을 이용하여 membrane에 올려진 극소량의 무게를 측정할 수 있다.

본 논문에서는 micro-tip과 membrane 사이에 터널링 전류가 흐르는 터널링 소자를 제조하였다. 단결정 실리콘을 이방성 에칭 시켜 micro-tip을 제조하였으며 초기 에칭방향에 따른 에칭 진행과정의 차이를 조사하였다. Si₃N₄막을 membrane으로 사용하였으며, 제조된 소자의 측정 한계를 예측하기 위하여 Si₃N₄막의 stiffness를 측정하였다. 실험으로 측정할 수 없는 범위의 stiffness계산을 위하여, membrane에 가해진 힘에 의한 membrane의 회절깊이를 구할 수 있는 모델식을 제시하였다.

2. 실험

그림 1은 본 실험에서 제조한 소자의 구조를 나타낸 것이다. 본 소자는 micro-tip위의 아래 전극, 회절 전극, membrane에 부착된 위 전극으로 구성되어 있다. micro-tip과 위 전극사이에 150 mV의 전압이 인가되며, 위 전극과 회절 전극사이에 200 V이상의 높은 전압이 인가된다. micro-tip과 위 전극사이의 간격이 10 Å정도가 되면 전류가 흐르기 시작한다. 회절 전압에 의한 정전력은 membrane을 아래쪽으로 끌어당기며 이를 통하여 적극간격의 미세한 조정이 가능하게 된다. 이때 membrane에 인가되는 힘이 전극간격을 감소시키며 이것이 전류를 일정하게 유지하려는 회절 전압을 증가시키게 된다.

1.0 μm 두께의 SiO₂가 입혀진 실리콘웨이퍼(p-type, <100>, 30~60 Ωcm)를 기판으로 사용하였다. SiO₂를 100 x 100 μm의 사각형만 남기고 제거한 후 80 °C, 45% KOH에 넣었다. 에칭시간이 30분 경과한 후부터 30초 간격으로 웨이퍼를 꺼내어 현미경으로 에칭 상태를 점검하였다. 시간이 경과함에 따라 underetching에 의해 실리콘 피라미드가 형성되기 시작하였다. underetching이 완전히 끝나면 마스크로 사용된 SiO₂막이 원래자리에서 이탈되는 것을 확인할 수 있다. 실리콘의 이방성 에칭에 의해 그림 2와 같은 30 μm 높이의 피라미드가 형성되었다. 실리콘의 식각속도는 KOH의 온도에 비례한다. 따라서 비커에 담겨진 KOH의 안쪽과 바깥쪽의 온도편차에 의해 제조된 피라미드의 높이가 달라질 수 있다. 본 실험에서는 온도편차를 줄이

기 위한 별도의 공정을 도입하지않고 4 인치 웨이퍼위에 32개의 소자를 제조하였으나 제조된 tip의 외형에는 차이가 없었다. 그러나 웨이퍼의 크기가 증가할 경우에는 KOH의 온도분포를 균일하게 유지하기 위한 장치가 고안되어야할 것이다. 피라미드형태의 micro-tip위에 증착될 전극과 실리콘 기판사이의 전기적 절연을 위해 1 μm의 산화막을 습식산화법으로 입혔다. lift-off 방법으로 아래 전극과 회절 전극을 형성하였으며 전극 재료로는 Ti/Pt/Au 다층막이 사용되었다. Ti, Pt, Au막은 e-beam evaporator로 증착하였으며 두께는 각각 200 Å, 300 Å, 1000 Å이었다. membrane을 얻기 위하여 1.0 μm의 Si₃N₄막을 low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD)로 증착하였다. 이때 NH₃ : Si₂H₆ = 20 : 100의 가스를 사용하였으며 증착온도는 835 °C였다. Si₃N₄막 위에 2 x 2 mm²의 전극을 Ti/Pt/Au 다층막으로 제조하였다. double-side aligner를 사용하여 전극의 반대편에 전극과 대칭인 패턴을 만든 후 그 부분의 Si₃N₄막을 건식 에칭으로 제거하였다. 마지막으로 90 °C, 10 %의 KOH에서 3시간 에칭하여 실리콘을 완전히 제거하고 Si₃N₄막 남겼다. PR을 spacer로 하여 두 웨이퍼를 마주 보게한 후 약하게 접착시켰다. 회절 전극에 200 V의 전압을 인가하여 정전력으로 membrane을 micro-tip쪽으로 회절시킨 후, 터널링 전류가 감지될 때까지 두 웨이퍼를 압박하였다. micro-tip과 membrane 사이에는 150 mV의 전압을 인가하였으며 대기압 상태에서 전류를 측정하였다. 회절전압은 200 V에서 350 V까지 50 V 간격으로 변화시켰다.

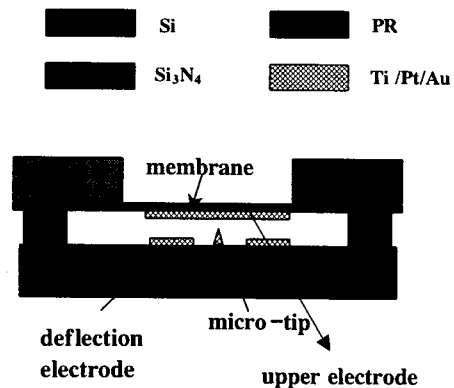


그림 1. 터널링 소자의 구조

Fig. 1. Cross-sectional schematic of a tunneling device.

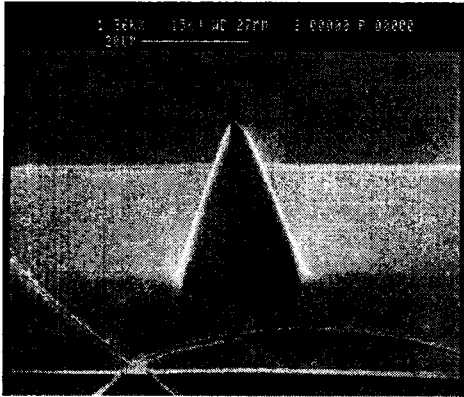


그림 2. 제조된 미세 팁의 SEM 사진
Fig. 2. SEM micrograph of a micro-tip.

3. 결과 및 고찰

실리콘의 이방성 에칭을 이용하여 피라미드형의 micro-tip을 제조하였다. 그림 3에 KOH농도에 따른 실리콘 및 산화막의 에칭비를 나타내었다. 산화막의 에칭비가 실리콘에 비해 1/100 정도 밖에 되지 않는다. 따라서 산화막을 실리콘 에칭을 위한 마스크로 사용할 수 있다. 마스크용으로 적합한 산화막의 두께를 그림 3에서 구할 수 있다. 본 실험에서는 3000 Å의 산화막을 마스크로 사용하였다. 실리콘의 경우 (110)방향의 에칭속도가 (100)에 비해 2배정도 빠르다. 산화막 마스크의 변을 실리콘 기판의 (110) 및 (100)방향과 평행으로 배열하고 에칭한 후 그 과정을 조사하였다. 그림 4에 5분 및 10분간 에칭한 후의 현미경 사진을 나타내었다. (110)면으로 에칭이 시작되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 (100)면에 평행으로 배열한 산화막 마스크로 제조한 피라미드 팁의 경우 에칭시간은 짧으나 형성된 팁의 높이가 낮고 밑면적이 작아 팁의 강도가 약해진다. 본 실험에서는 산화막 마스크를 (110)방향에 평행으로 배열하고 팁을 제조하였다. 그림 5에 피라미드 팁의 위에서 찍은 SEM사진을 나타내었다. (311)방향의 8개면이 만나서 팁을 이루고 있다.

센서에 응용할 Si₃N₄막의 측정 한계와 적정 두께를 구하기 위하여 인가된 힘(F)에 따른 막의 deflection depth(D)를 측정하였다. 측정을 위해 probe 힘의 조절이 가능한 stylus profiler(Dektak 3030)을 사용하였다. 인가할 수 있는 최소 힘은 10⁻⁵ N이었다. 그림 6에 측

정 결과를 나타내었다. 힘의 증가에 따라 D가 선형으로 증가하였으나 외삽법으로 구한 F=0에서의 D는 0이 아니었다. 이 문제를 검토하기 위하여 좀 더 두꺼운 실리콘 membrane을 제조하고 동일한 측정을 행하였다. (그림 7) 40 μm 두께의 실리콘 membrane은 하나의 선형곡선을 나타내었으나, 30 μm 두께의 membrane은 2개의 선형 영역을 나타내었다. 따라서 두께가 얇은 Si₃N₄막의 경우 10⁻⁵ N이하에서는 그림 6의 점선과 같은 특성을 나타낼 것으로 예상된다. Roark's formular에 의하면 D는 F와 다음의 관계를 갖는다.^[5]

$$D = \frac{\alpha FA}{(Et^3)} \quad (2)$$

여기서 α는 비례상수, A는 membrane의 면적, E는 Young's modulus, t는 membrane의 두께이다. D와 F의 관계가 선형인 경우 식(2)를 이용하여 F에 따른 D의 값을 얻을 수 있으며 그에 따른 터널링 전류의 변화를 식(1)을 이용하여 예측할 수 있다. 그림 6 및 7에 의하면, membrane이 두꺼운 경우에는 하나의 비례상수로 식(2)를 사용할 수 있으나 membrane의 두께가 감소함에 따라 구간별로 다른 비례상수를 적용해야한다. 측정장치의 한계인 10⁻⁵ N이하에서는 점선과 식(2)를 이용하여 F와 D의 관계를 유추할 수 있다. α를 0.2로 하여 계산한 결과, 1.0 μm의 Si₃N₄막을 membrane으로 사용하면 10⁻¹² g의 물체까지 감지할 수 있을 것으로 나타났다. 그림 8에 완성된 소자의 회절 전압에 따른 전류의 변화를 나타내었다. 회절 전압 200 V에서 1.2 nA의 전류가 흘렀으며 회절 전압이 증가함에 따라 전류는 지수적으로 증가하였다. 만약 전극간의 간격이 양전극에 인가된 전압에 의한 Coulomb force에 비례하여 감소한다고 가정하면 본 소자의 전류-전압 특성은 식(1)을 만족하게 된다. 따라서 본 소자에 흐르는 전류는 터널링에 의한 전류인 것으로 추정할 수 있다. membrane에 인가된 미소한 힘을 전류변화로 감지할 수 있는 본 소자는 각종 센서의 제작에 응용될 수 있다. 그러나 대부분의 공정을 실험자의 경험 및 수작업에 의존하는 현재의 공정은 생산성에 한계를 가지고 있다. 따라서 본 소자를 상용화를 위한 센서에 적용하려면, tip제조 및 assembly과정의 자동화를 위한 장치의 개발이 요구된다.

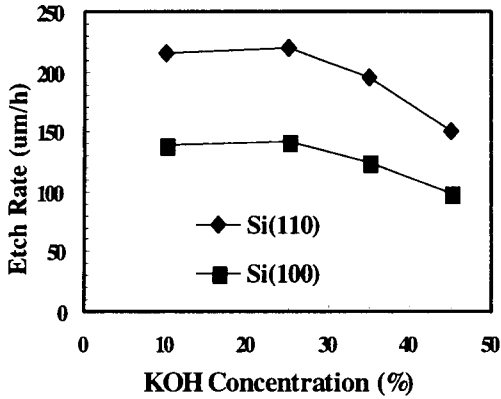


그림 3. KOH 농도에 따른 Si의 에칭 비
Fig. 3. Etch rate of Si versus the concentration of KOH.

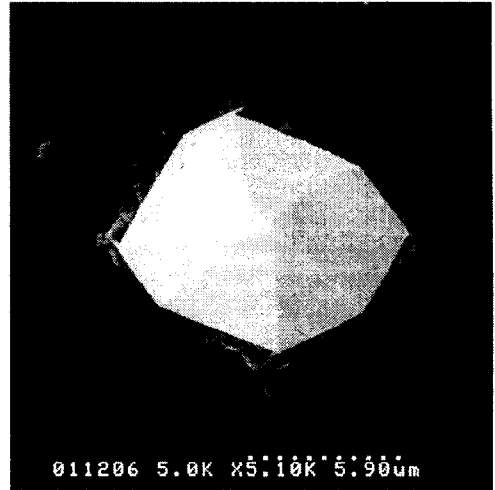


그림 5. 위에서 찍은 miro-tip의 SEM 사진
Fig. 5. SEM micrograph of micro-tip from top-view.

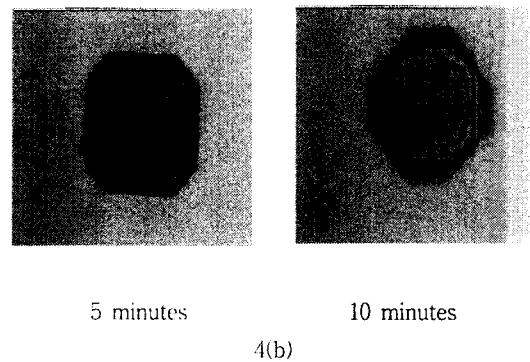
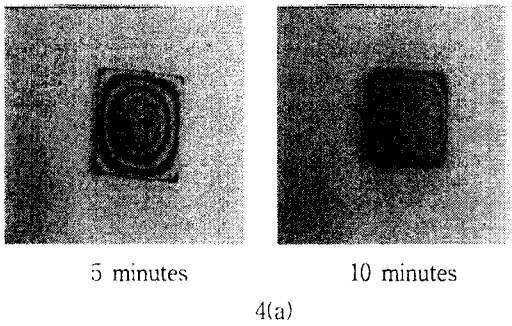


그림 4. 마스크 배열에 따른 under-etching 진행과정의 현미경 사진:(a) (100) 및 (b) (110) aligned masks.
Fig. 4. Microphotographs of under-etching patterns for (a) (100) and (b) (110) aligned masks.

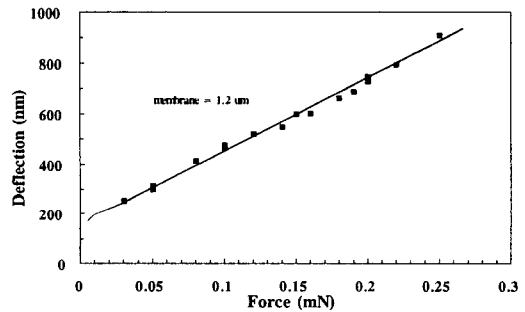


그림 6. Si₃N₄막의 인가된 힘에 따른 회절 깊이의 변화
Fig. 6. Deflection depth variation of Si₃N₄ film as a function of the applied force.

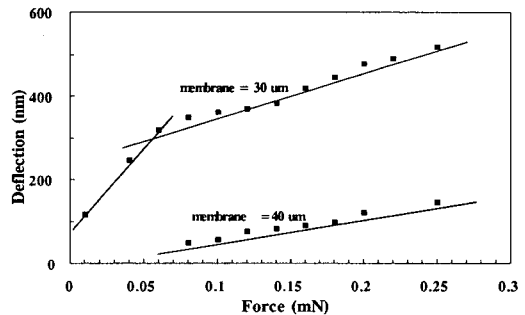


그림 7. Si 판의 인가된 힘에 따른 회절 깊이의 변화
Fig. 7. Deflection depth variation of Si plates as a function of the applied force.

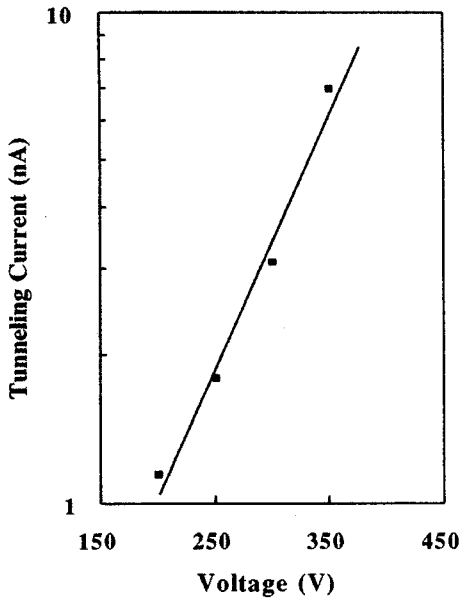


그림 8. 터널링 소자의 회절전압에 따른 전류변화
 Fig. 8. Current dependence of the tunneling device on the deflection voltage.

4. 결 론

micro-tip과 membrane사이의 전류가 회절전압에 지수비례하는 터널링 소자를 MEMS공정을 이용하여 제조하였다. 단결정 실리콘을 이방성 에칭 시켜 micro-tip을 제조하였으며 Si₃N₄막을 membrane으로 사용하였다. 산화막 마스크를 실리콘의 (110)방향과 평행으로 배열하고 에칭한 결과 (311)방향의 8개면이 만나는 피라미드형의 팁을 얻을 수 있었다. 센서에 응용할 Si₃N₄막의 측정 한계 및 적정 두께를 구하기 위하여 인가된 힘에 따른 Si₃N₄막의 deflection depth 변화를 측정하였

다. membrane이 두꺼운 경우에는 하나의 선형영역만 확인되나 membrane의 두께가 감소함에 따라 비례상수가 다른 다수의 선형영역이 나타났다. 선형영역의 비례상수를 0.2로 하여 계산한 결과, 1.0 μm의 Si₃N₄막을 membrane으로 사용하여 10⁻¹² g의 물체까지 감지할 수 있을 것으로 예측된다. 완성된 소자의 경우 회절 전압 200 V에서 1.2 nA의 전류가 흘렀으며 회절 전압이 증가함에 따라 전류는 지수적으로 증가하였다.

참고문헌

[1] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber and E. Weibel, "Tunneling through a controllable vacuum gap," Appl. Phys. Lett., vol. 40, no. 2, pp. 178-180, 1982.
 [2] S. B. Waltman and W. J. Kaiser, "An electron tunneling sensor," Sensors and actuators, vol. 19, pp. 201-210, 1989.
 [3] C. H. Liu, A. M. Barzilai, J. K. Reynolds, A. Patridge, T. W. Kenny, J. D. Grade and K. Rockstad, "Characteristics of a high-sensitivity micromachined tunneling accelerometer with micro-g resolution," IEEE J. Microelectromech. Syst., vol. 7, no. 2, pp. 235-244, 1998.
 [4] L. M. Miller, J. A. Podosada, E. Kruglick, T. W. Kenny, J. A. Kovach and W. J. Kaiser, "A μ-magnetometer based on electron tunneling," 1996 IEEE-MEMS Workshop pp. 46 -472, 1996.
 [5] T. W. Kenny, J. K. Reynolds and W. J. Kaiser, Rev. Sci. Instrum, vol. 67, pp. 112, 1996.

著 者 紹 介

마 대 영

「센서학회지 제5권 제1호」 논문96-5-1-06 p. 37 참조
 현재 경상대학교 공과대학 전기전자공학부 교수

김 정 규

「센서학회지 제6권 제2호」 논문97-6-2-11 p.171 참조
 현재 경상대학교 공과대학 전기전자공학부 교수

박 정 규

「센서학회지 제6권 제2호」 논문97-6-2-11 p.171 참조
 현재 경상대학교 공과대학 전기전자공학부 교수