

집속된 아르곤 이온 레이저에 의한 실리콘의 미세가공 및 평가

Microprocess of silicon using focused Ar⁺ laser and estimates

정재훈*, 이천, 황경현**

*인하대학교 전기공학과

**한국기계연구원

Jae-hoon Cheong*, Cheon Lee*, Kyoung-hyun Hwang**

*Department of Electrical Engineering, Inha University

**Korea Institute of Machinery & Material

Abstract

Focused Ar ion laser beam can be utilized to fabricate microstructures on silicon substrate as well as other materials(e.g. such as ceramic). The laser using in this study is an argon ion laser with maximum power of 6 W, wavelength of 514 nm. This laser beam is focused by objectives with a high numerical aperture, a long working distance. We have achieved line width about 1 μm with high scan speed. The resolution for Si machining is determined by the selectivity of the chemical reaction rather than the laser spot size. In this study, we have obtained the maximum etch rate of 434.7 $\mu\text{m}/\text{sec}$ with high aspect ratio. The characteristics of etched groove was investigated by scanning electron microscope(SEM) and auger electron spectroscopy(AES). It is assumed that the technique using argon ion laser is applicable to fabricate microstructures.

1. Introduction

레이저 유도 프로세스는 가공 재료의 표면 손상이 적고 공정이 간단하기 때문에 금속, 절연체, 반도체 혹은 유기재료 등의 미세가공에 많이 이용되고 있으며 지난 10여년간 활발한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 광학계를 이용하여 레이저 빔을 집속하고 시료에 직접조사하는 공정(direct write:laser direct etching, doping, and deposition)은 일괄작업(batch process)하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 그러나 좁은 영역에 선택적으로 미세가공을 할 수 있고, 짧은 시간에 높은 에너지 밀도를 가할 수 있는 장점이 있다. 따라서 마스크와 포토레지스트 없이 직접 가공할 수 있으므로 기존의 다른 가공기술과 비교하여 공정을 최소화할 수 있으며, 높은 경제성이 기대된다. 또한 레이저를 이용한 미세가공은 projection printing 이나 포토레지스트를 사용한 이중작업에 비해 정밀도(resolution)가 뛰어나고, 기존의 일괄작업기술과 연계하여 응용할 수 있다. 최근에 들어 컴퓨터 디자인 프로그램을(computer-aided design(CAD)) 를 사용하여 실제

3-Dimensional 구조의 실현을 위한 층별제거(layer-by-layer removal)가 가능하다.[4].

지금까지는 μm 급의 초소형 기계제작을 위해 반도체 메모리 소자 공정에 쓰이던 미세가공 기술을 그대로 응용해 오고 있지만 초소형 기계가 실용화되기 위해서는 다양한 형상과 3차원적인 구조를 갖는 초소형 부품을 고정밀도를 가지고 고속으로 가공하는 기술이 요구된다. 따라서 집속된 레이저 빔을 이용한 미세가공법은 이에 적합한 기술로 연구개발이 시급히 요구되고 있다. 본 연구는 레이저 미세가공기술을 이용하여 각종 산업전반과 의료분야로의 폭넓은 응용이 기대되는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 분야의 부품재료로서 주로 사용되는 실리콘 기판위에 마이크로단위의 초소형 구조체들의 고속가공 실현성 여부를 타진하기 위하여 수행되었다.

2. Experiment

- ▶ 실리콘 웨이퍼의 레이저 유도 식각

(1) 레이저 유도 건식 식각

실리콘 웨이퍼의 가공에 사용된 실험장치는 최대출력 6 W, 사용파장 514.5 nm 의 아르곤 이온 레이저와 빔확장기, 빔의 유도를 위한 반사경, 그리고 0.5의 Numerical Aperture(NA), 10 mm 의 긴 working distance를 갖는 광학현미경으로 구성하였다. 실험에 사용된 시료는 (1 0 0)방향, n-type 으로 도핑된 실리콘이다. 시료는 반응가스 및 산과의 반응을 배제시키기 위해 스테인레스 스틸 (SUS304)로 제작된 반응용기에 장착되고, 레이저 빔의 유도를 위해 석영유리(quartz)로 창을 내었다. 반사경을 조정하므로써 빔을 주사(scan)하는 것은 매우 어렵고 고가의 장비를 필요로 하므로, 본 실험에서는 x-y-z 축으로 이동이 가능한 스테이지위에 반응용기를 고정하였다. 스테이지는 0.1 μm 의 이동정밀도를 가지고, 최대속도가 200 μm/sec 로 PC 로 제어가 가능하였다. 3차원적인 가공을 실현하기 위해 광학현미경의 z축을 고정하고 대물렌즈를 장착하였고, refocus 는 스테이지의 z축을 움직임으로써 가능하도록 고안하였다. 반응가스인 CCl₂F₂ 의 주입은 flow meter와 valve/gauge를 포함한 시스템을 이용하여 300 mbar에서 대기압 정도까지 미세하게 조절하고, 10⁻³ Torr 까지 진공을 얻어낼 수 있는 로터리 펌프로써 실험 전후의 particle 들을 제거하였다.

본 실험에서는 CCl₂F₂ 가스압을 300 mbar ~ 1 기압까지 변화시켰으며, 광학현미경을 이용하여 빔의 크기를 0.95 μm 까지 집속시켰다. 레이저 출력(출력밀도)을 100 mW(약 3.18 MW/cm²)에서 수

W(수십 MW/cm²)로, 빔의 주사속도는 10 μm/sec 에서 200 μm/sec로 변화시키면서 실험하였다. 또한 광학현미경에는 가공형상의 관찰 및 촬영을 위해 폴라로이드 카메라를 장착하였다.

대기압의 Chlorine 가스 분위기에서 아르곤 이온 레이저로써 실리콘 웨이퍼 표면에 약 20~30 MW/cm² 정도의 출력밀도를 갖는 빔을 조사했을 때 매우 쉽게 용점(melting point)까지 상승할 수 있으며 이에 의해 생성된 흠은 국부적 온도 상승 효과에 의해서만 발생을 하고 약 1000 °C 에서 이 가스들에 의해 실리콘은 매우 급격한 습격을 받게 된다[5]. 실리콘 웨이퍼를 에칭하는 데 사용된 CCl₂F₂ 가스는 AlGaAs/GaAs multi-layer[6] 와 세라믹 등 다양한 재료의 에칭에 사용되는 가스로서 실리콘 웨이퍼 에칭시에 가스가 시료 표면에 흡수되고 레이저 빔에 의해 국부적으로 가열이 되면 흡수된 가스들이 전리되는 반응기구(mechanism)을 갖는다. 여기서 전리된 Cl⁺ 라디칼은 식각에 직접 관여하고, F 라디칼은 용점까지 가열시 생성된 흠(hole)을 더욱 활성화시켜 원활한 식각에 기여하게 된다. 사용된 파장에서는 photo-chemical 한 반응은 거의 일어나기 어렵고 대부분의 반응이 thermal-chemical 한 반응이 차지하고 있다.

(2) 레이저 유도 습식 식각

레이저 유도 습식 식각은 실리콘 웨이퍼 위에 집적화된 구조체들을 형성하는데는 많은 한계점을 보이고 있지만, 형성된 흠의 형태가 빔의 gaussian

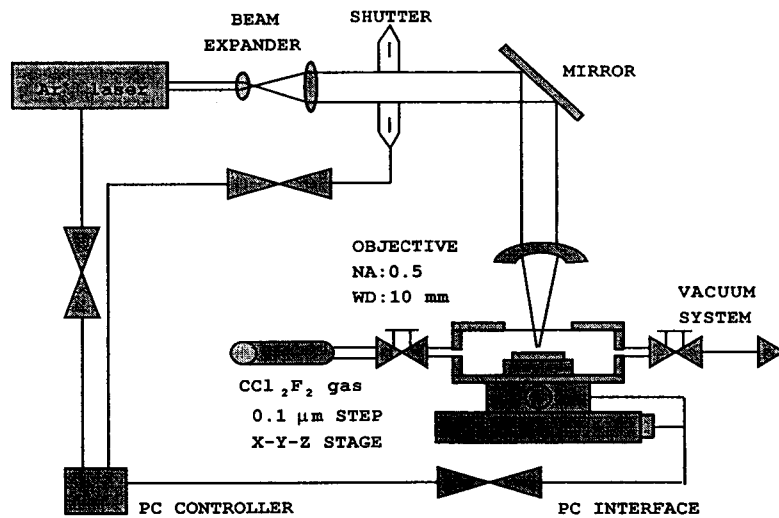


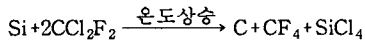
그림 1. 레이저 유도 식각의 시스템 개략도

형을 하고 있으며, 흡벽면이 매우 매끄럽고 반응 생성물의 퇴적이 거의 없다. 이는 레이저 빔에 의해 실리콘 표면이 국부적으로 뜨거워지게 되어 강한 대류현상이 일어나기 때문에 시료와 반응용액과의 화학적 반응에 의해 생성된 물질이 용액으로 녹아 들어가기 때문인 것으로 보인다. 가공변수는 건식의 경우와 마찬가지로 레이저 빔출력과 주사 속도로 하였으며, 레이저출력은 비교적 낮은 출력인 100 mW에서 500 mW까지 변화를 주었다. 실험에 사용된 시스템은 용액안에 시료를 약 1 mm 정도 담그고 실험중 기판 및 용액의 온도 상승으로 인하여 시료에 근접해 있는 광학렌즈에 증발된 용액 및 반응물질의 흡착을 방지하기 위해 석영유리(quartz)를 창으로 사용한 테프론 용기를 제외하면 레이저 유도 건식식각의 경우와 동일하다. 식각된 형상도 역시 주사 전자 현미경으로 관찰하였다.

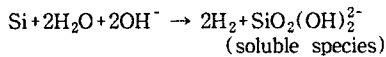
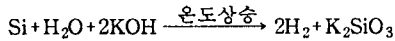
(3) 실리콘과 반응물질과의 반응메커니즘

시료인 실리콘과 CCl₂F₂ 가스 및 KOH 용액과의 반응 메커니즘은 다음과 같다.

- 건식식각의 경우



- 습식식각의 경우



건식식각의 경우 C 와 SiCl₄ 의 반응물이 생성된다. 이와 같은 결과는 SEM 사진에서도 보여주고 있으며 이러한 반응물들은 아세톤을 사용한 초음파 세척에 의하여 제거할 수 있다. 습식식각의 경우, 물에 잘 녹는 물질(K₂SiO₃)이 생성되며 이는 위에서 밝혔듯이 국부적 온도상승에 의한 대류에 의해 더욱 잘 녹아들게 되어 실리콘 표면에는 거의 남지 않게 된다.

3. Results and discussions

가. 실리콘의 레이저 유도 건식식각

집속된 아르곤 이온(Ar⁺) 레이저 빔에 의한 기판 표면의 국부적 온도 상승은 곡선을 3차원 열전달 방정식을 이용하여 수치적으로 계산하여 시뮬레이션하였다. 이를 기준으로 레이저 출력변화에 따른 실리콘 웨이퍼 표면의 국부적 온도 상승을

예측하고 각 실험결과를 분석하였다. 본 실험에서 실리콘 웨이퍼를 용융(melting)하기 위한 문턱값(threshold value) 은 공기중에서는 980 mW, 3×10⁻¹ Torr 의 진공에서는 400 mW, 그리고 CCl₂F₂ (1atm) 가스분위기 하에서는 300 mW 였다.

CCl₂F₂ 가스 385 Torr, 레이저 빔 출력 600 mW, 빔 주사속도 8 μm/sec 에서 최소선폭 1.5 μm 를 얻었고, 동일 가스압, 출력 1.2 W 에서 빔 주사속도를 10 μm/sec 로 했을 때 최대 홈깊이 41.3 μm 를 얻을 수 있었다. 그리고 최대 중형비(maximum aspect ratio)는 가스압 385 Torr, 빔출력 1.2 W, 빔 주사속도 10 μm/sec 에서 5.95 로 매우 큰 값을 얻을 수 있었고, 최대 식각율(maximum etch rate) 은 가스압 385 Torr, 빔출력 2.4 W, 빔 주사속도 10 μm/sec 에서 434.7 μm/sec 를 얻을 수 있었다.

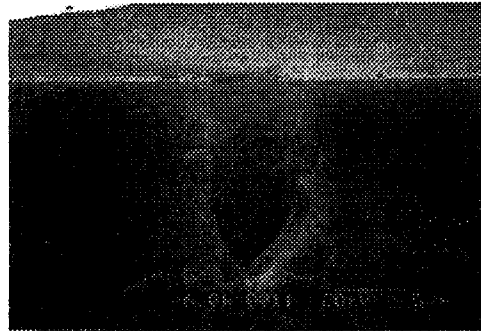


그림 2. 식각후 시료의 단면 SEM 사진 (Microscope)사진 (CCl₂F₂ 가스압 385 Torr, 빔 주사속도 10 μm/sec, 빔출력 900 mW)

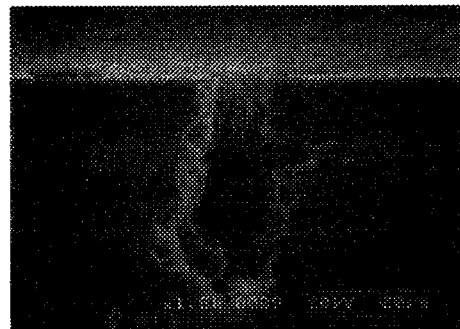


그림 3. 식각후 시료의 단면 SEM 사진 (CCl₂F₂ 385Torr, 빔주사속도 10 μm/sec 빔출력 2.4W)

나. 실리콘의 레이저 유도 습식 식각
반응용액인 KOH 수용액(2N)에서 최대총깊이는 빔출력 120 mW, 주사속도 8 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 에서 10 μm 를 얻을 수 있었으며, 최소선폭도 같은 조건하에서 7 μm 로 aspect ratio 는 1.4, etch rate 은 83.3 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 을 얻을 수 있었다.

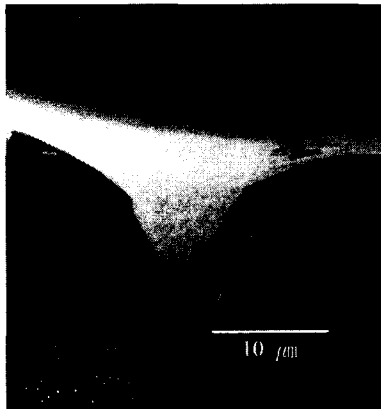


그림 4. 레이저 유도 습식식각된 실리콘의 단면 사진(빔출력 150mW, KOH(2N), 주사속도 8 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

다. 연구결과에 따른 고찰 및 향후 실험계획
결과적으로 비교하여 볼 때, 레이저유도 습식 식각에 비하여 건식식각의 경우가 홈의 선폭, 깊이 그리고 종횡비(aspect ratio)와 에칭율(etch rate)이 훨씬 월등함을 보이고 있다.

마이크로머신이나 micro-fluidic devices 의 경우, 수~수십 μm 정도의 선폭을 가지며 부드러운 표면상태를 요구하는 것들도 있기 때문에 비교적 거친 표면과 벽면을 보이는 건식식각에 비해 습식 식각의 경우가 이러한 특수한 분야에 응용될 것으로 생각된다. 그러나, 이미 기존의 미세가공을 위한 기술들에 의해 일괄공정이 가능하므로 선폭이 넓은 습식식각은 그만큼 응용성면에서 떨어진다고 볼 수 있다.

본 연구는 세라믹 및 III-V족 반도체, 그리고 실리콘 등 다양한 재료에 대한 노하우를 바탕으로 실제 마이크로머신에 응용가능한 마이크로 구조체의 실현을 향후 목표로 삼고 있다. 이미 아르곤 이온 레이저와 같은 continuous wave 와 엑시머(excimer) 레이저와 같은 펄스 레이저를 사용한 마이크로 단위의 구조체들을 선보인 문헌들이 대단히 많다. 본 시스템을 사용하여 마이크로 단위의 구조체를 실제로 구현하고 그 전기적, 기계적 특성

을 분석하여 마이크로머신으로의 응용가능성을 타진하고자 한다.

4. References

- (1) D.J. Ehrlich and J.Y. Tsao, Eds., Laser Micro fabrication(Academic Press, San Diego, CA, 1989)
- (2) KURT E. RETERSEN, "Silicon As a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, Vol 70, No 5, May 1982, p427
- (3) Yong-Feng Lu; "Laser-induced microprocessing of Mn-Zn ferrite" January, 1991, p. 8
- (4) T.M. Bloomstein and D.J. Ehrlich, Appl. Phys. Lett. 61(1992) 708.
- (5) R.J. von Gutfeld and R.T. Hodgson: Appl. Phys. Lett. 40(4), 15 February 1982 p. 352
- (6) S. Thomas and S.W. Pang, "Dry etching of horizontal distributed Bragg reflector mirrors for waveguide lasers", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol 14, No. 6, Nov/Dec 1996 pp 4119-4123
- (7) W. Westlake, M. Heintze, J. Appl. Phys., Vol. 77, No. 2, p879, 1995
- (8) R. D. Horning, A. Mirza, R. R. Martin, J. Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 3, p796, 1994
- (9) Hua Tang, Irving P. Herman, J. Appl. Phys., Vol. 71, No. 7, p3492, 1992
- (10) Cheon Lee, Mikio Takai, Toshiro Yada, Appl. Phys., A51, p340, 1990
- (11) Mark N. Ruberto, Xiaoge Zhang, J. Electrochem. Soc., Vol 138, No. 4, p1175, 1991
- (12) Noboru Ichinose, " Introduction to fine ceramics " , Ohmsha, 1983, p2
- (13) M. Takai, Y. F. Lu, Appl. Phys. A. 46, p197, 1988
- (14) Y. F. Lu, M. Takai, J. J. Appl. Phys., Vol. 28, No. 10, p2151, 1989