

Ar⁺ ion laser를 이용한 단결정/다결정 Si 식각 특성 분석

이현기, 박정호, 이천*
고려대학교 전기공학과, 인하대학교 전기공학과*

Analysis of single/poly crystalline Si etching characteristics using Ar⁺ ion laser

Hyunki Lee, Jungho Pak, Cheon Lee*
Department of Electrical Engineering, Korea University
Department of Electrical Engineering, Inha University*

Abstract - In this paper, Ar⁺ ion laser etching process of single/poly crystalline silicon with CCl₂F₂ gas is studied for MEMS applications. To investigate the effects of process parameters, laser power, gas pressure, scanning speed were varied and multiple scanning was carried out to obtain high aspect ratio. In addition, scanning width was varied to observe the trench profile etched in repeating scanning cycle. From the etching of 2.6μm thick polycrystalline Si deposited on insulator, trench with flat bottom and vertical side wall was obtained and it is possible to apply this results for MEMS applications.

사(scanning)를 위해 진공 반응로를 PC controller와 연결된 X/Y dc motor stage로 이동시키고, Z stage로 beam을 focussing하였다. 사용된 stage의 최대 이동거리는 25mm이고, 최대이동속도와 해상도는 각각 200μm/s와 1μm이다. 로터리 펌프를 이용해 진공 반응로 내의 잔류가스와 반응 부산물을 배기하고, 주입되는 반응가스의 양은 valve와 gauge system으로 조절하였다.

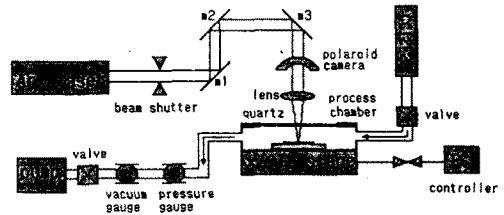


그림 1. Laser 식각 장비

1. 서 론

최근 수 년간 MEMS 가공 분야에서는 원하는 양의 에너지를 국부적으로 빠르게 전달할 수 있는 laser 가공 기술을 MEMS에 응용하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다[1,2]. Laser 가공 기술은 기존의 식각 기술에 필요한 사진공정(photolithography)이 필요 없고, RIE (Reactive Ion Etching) 공정에서 발생하는 활성화된 이온이나 전자에 의한 손상이 없으며, 실질적인 3차원 구조 형성이 가능하다는 장점이 있다.

일반적으로 laser 식각은 pyrolytic(or thermal) 방식과 photolytic(or nonthermal) 방식으로 분류된다. Pyrolytic 방식은 laser에 의해 기판이 열적으로 활성화되고[3], photolytic 방식은 분위기 가스가 여기되어 휘발성의 반응생성물을 만든다[4]. 본 연구에서는 Ar⁺ ion laser에 의해 국부적으로 녹은 Si이 CCl₂F₂ 가스와 휘발성의 반응생성물을 만드는 pyrolytic 방식으로 단결정/다결정 Si의 식각 특성을 분석하여 MEMS에 응용 가능한 공정 조건을 추출하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장비

본 연구에 사용된 식각 장비는 그림 1과 같이 Ar⁺ ion Laser, 3개의 mirror 및 대물 lens, 진공 반응로, X/Y/Z stage, CCl₂F₂ gas, valve와 gauge system, PC controller 등으로 구성되었다. Ar⁺ ion laser는 514nm 파장을 갖고 있으며, beam shutter와 3개의 mirror, 대물 lens, 창(window)을 통해 진공 반응로 내의 Si 시편에 집속된다. 사용된 대물 lens의 개구수(numerical aperture)와 초점거리는 각각 0.5, 10.6mm이며 배율은 50배이다. 반응가스와 반응 부산물에 의한 부식을 막기 위해 진공 반응로를 stainless-steel로 제작하였으며, 창은 laser의 흡수를 최소화하기 위해 석영(quartz)으로 제작하였다. Laser beam의 주

2.2 식각 반응 메카니즘

CCl₂F₂ 분위기에서 Ar⁺ ion laser(514nm)에 의한 Si 식각은 Ar⁺ ion laser에 의해 국부적으로 녹은 Si 이 반응가스 CCl₂F₂에서 분해, 여기된 Cl^{*} radical과 SiCl_x의 휘발성 반응생성물을 만드는 pyrolytic 방식을 통해 이루어지며, 녹지 않은 Si은 CCl₂F₂ 가스와 반응하지 않는다. 식각 반응에 사용된 514nm 파장의 Ar⁺ ion laser는 반응가스를 투과하여 시편에 집속되어 국부적으로 Si를 용융시키는 역할을 한다. 식각 반응은 그림 2와 같이 진행되는데, 먼저 주입된 CCl₂F₂ 가스는 농도차에 의해 Si 표면으로 확산되고(A), 기판에 집속된 laser의 열에너지에 의해 분해, 여기되어 Cl^{*} radical을 생성한다(B). 생성된 Cl^{*} radical은 집속된 laser에 의해 녹은 Si과 반응하여 휘발성의 생성물을 만들고(C), 반응생성물은 반응 영역으로부터 표면 위로 분리된다(D).

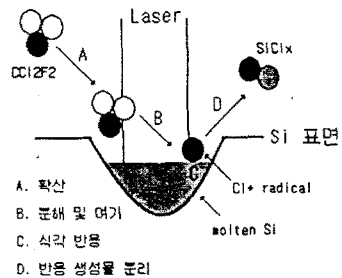


그림 2. 식각 반응 메카니즘

2.3 단일점 Si 식각 특성

Laser에 의한 Si의 식각 특성을 분석하기 위해 우선 laser 출력, 반응가스압력, scanning speed 등의 공정 변수 의존성을 파악하였다. 그리고 scanning을 반복하는 다중주사방식에 의한 형상비 변화와 연속된 scanning cycle에서 scanning width 변화에 따른 trench의 바닥면을 관찰하였으며, 각각의 실험 결과는 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용해 관측하였다.

2.3.1 공정변수 의존성

첫 번째 공정 변수로서 laser 출력 의존성을 파악하기 위하여 반응가스압력과 scanning speed를 각각 450 mbar와 10 μ m/s로 고정시키고, laser 출력을 0.3W에서 0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 2W로 변화시켰다. 실험결과는 그림 3과 같이 0.45W에서 식각이 일어나기 시작하여 laser 출력이 증가함에 따라 식각 깊이가 증가하였다. 이것은 0.45W 이하에서는 Si이 녹지 않아 반응가스와 식각반응을 일으키지 않다가, 임계값 이상에서 laser 출력 증가에 따라 표면의 온도상승으로 녹는 Si의 양이 증가하기 때문이다.

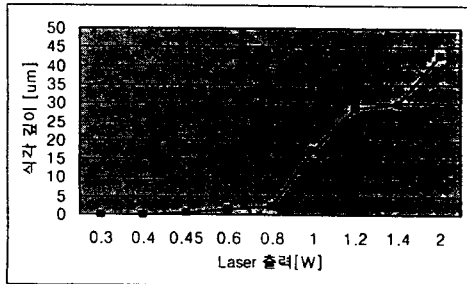


그림 3. Laser 출력 의존성. 반응가스압력 450 mbar, scanning speed 10 μ m/s에서 식각

두 번째 공정 변수로서 반응가스압력 의존성을 파악하기 위하여 laser 출력과 scanning speed를 각각 1W와 10 μ m/s로 고정시키고, 반응가스압력을 0mbar에서 150, 300, 450, 600, 750, 900mbar로 변화시켰다. 실험결과 그림 4와 같이 300mbar 이하에서는 식각 깊이가 급격히 증가했지만, 300mbar 이상에서는 완만하게 증가했다. 이것은 반응가스의 압력이 증가할수록 표면에 흡착하여 생성되는 Cl* radical이 증가하여 식각 반응도 증가하지만, 압력이 더욱 증가하면 가스 분자의 충돌에 의해 확산계수가 감소하여 반응영역에서의 Cl* radical의 증가율이 감소하기 때문이다.

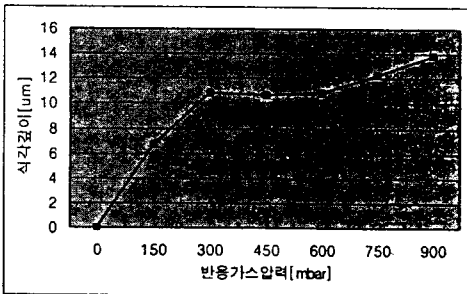


그림 4. 반응가스압력 의존성. laser 출력 1W, scanning speed 10 μ m/s에서 식각

세 번째 공정변수로서 scanning speed 의존성을 파악하기 위하여 laser 출력과 반응가스압력을 각각 1W와 450mbar로 고정시키고, scanning speed를 5, 10, 20, 50, 150 μ m/s로 변화시켰다. 실험결과 그림 5와 같이 scanning speed가 증가할수록 식각깊이가 감소하였다. 이것은 scanning speed가 증가할수록 laser의 잔류시간이 감소하고 그에 따라 녹는 Si의 양이 감소하여 식각반응이 감소하기 때문이다.

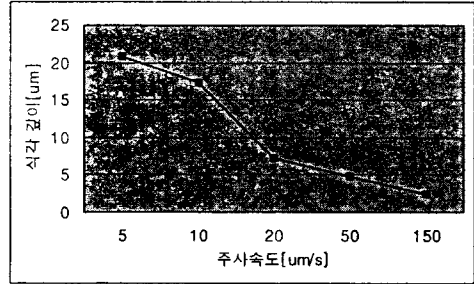


그림 5. Scanning speed 의존성. laser 출력 1W, 반응가스압력 450mbar에서 식각

2.3.2 다중주사방식에 의한 식각 특성

MEMS 구조에 적합한 높은 형상비의 구조를 얻기 위해, scanning을 반복하는 다중주사방식으로 식각된 trench의 형상비를 관찰하였다. 실험조건은 laser 출력과 반응가스압력, scanning speed를 각각 1W, 450 mbar, 50 μ m/s로 고정시키고, scanning을 1, 2, 3, 4 번 반복하였다. 실험결과 주사회수가 증가할수록 형상비가 증가하였으며, 그림 6과 같이 scanning을 4번 반복하는 경우 4.1의 형상비가 얻어졌다.

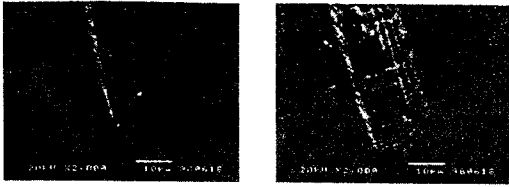


(a) 3번 scanning (b) 4번 scanning

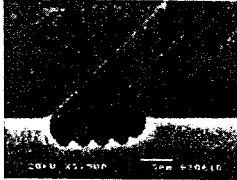
그림 6. 다중주사방식에 의한 식각 특성, laser 출력 1W, 반응가스압력 450mbar, scanning speed 50 μ m/s에서 식각

2.3.3 scanning width 변화에 따른 식각 특성

Laser를 이용하여 폭이 넓은 trench를 제작하기 위해서는 일정한 scanning width 간격으로 stage를 이동시키며 scanning해야 한다. 이 때 scanning width가 큰 경우에는 식각된 trench 바닥에 굴곡이 생성될 수 있으므로 이를 방지할 수 있는 scanning width를 얻기 위하여 laser 출력, 반응가스압력, scanning speed 등의 공정변수를 고정시키고, scanning width를 변화시키면서 trench 바닥면의 거칠기를 관찰하였다. 실험조건은 laser 출력과 반응가스압력, scanning speed를 각각 1W, 450mbar, 100 μ m/s로 고정시키고, scanning width를 1, 2, 3 μ m로 변화시켰다. 실험결과 그림 7과 같이 scanning width가 3 μ m일 때 trench의 바닥면에 굴곡이 심하게 나타났지만, 2 μ m에서는 바닥면의 굴곡이 줄어들고 1 μ m에서는 평면에 가까운 바닥면을 얻을 수 있었다.



(a) width 1 μ m (b) width 2 μ m



(c) width 3 μ m

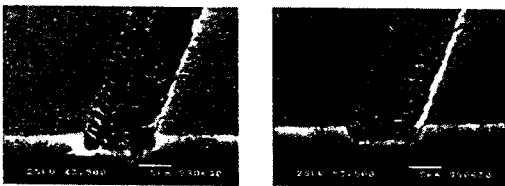
그림 7. Scanning width 변화에 따른 식각 특성, laser 출력 1W, 반응가스압력 450mbar, 100 μ m/s에서 식각

2.4 다결정 Si 식각 특성

MEMS에 응용 가능한 평평한 다결정 Si의 laser 식각 특성을 관찰하기 위하여 산화막 또는 질화막의 절연층 위에 증착된 2 μ m, 6 μ m 두께의 다결정 Si를 식각하였다.

2.4.1 2 μ m 두께의 다결정 Si 식각 특성

절연층 위에 LPCVD 방식으로 증착된 2(μ m) 두께의 다결정 Si를 식각하였다. 절연층은 산화막 위의 질화막의 이중층으로 이루어졌으며, laser 출력과 반응가스압력, scanning speed가 각각 0.6W, 450mbar, 150/200 μ m/s로 유지하고, scanning width 2 μ m에서 8번 scanning 하였다. 실험결과 그림 8과 같이 굴곡이 거의 없는 바닥면을 갖는 trench를 얻었다. 이것은 Ar+ ion laser와 CCl₂F₂ 반응가스에 의한 Si의 식각반응에서 Si와 절연층의 높은 식각선택성 때문이다.

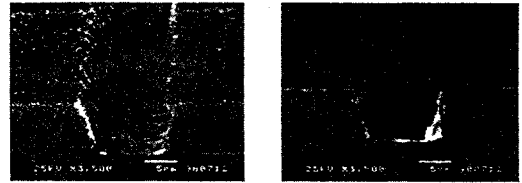


(a) 200 μ m/s (b) 150 μ m/s

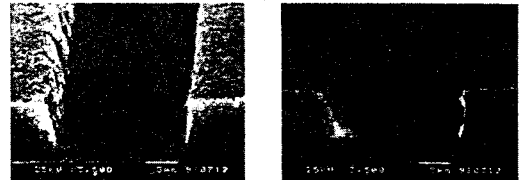
그림 8. 2 μ m 두께의 다결정 Si 식각특성, laser 출력 0.6W, 반응가스압력 450mbar scanning width 2 μ m에서 식각

2.4.2 6 μ m 다결정 Si 식각 특성

Trench의 수직 측벽을 얻을 수 있는 조건을 추출하기 위하여, 절연층 위에 증착한 6 μ m 두께의 다결정 Si를 다중주사방식으로 식각하였다. 실험조건은 laser 출력과 반응가스압력, scanning speed를 각각 0.8W, 450mbar, 150 μ m/s로 고정시키고, scanning width 1, 2 μ m에서 2번 scanning을 반복하였다. 실험결과 그림 9와 같이 scanning width 1, 2 μ m에서 모두 평평한 바닥면과 수직 측벽을 갖는 직사각형 형태의 trench를 얻었다.



(a) scanning width 1 μ m



(b) scanning width 2 μ m

그림 9. 6 μ m 두께의 다결정 Si 식각 특성, laser 출력 0.8W, 반응가스압력 450mbar, scanning speed 150 μ m/s에서 식각

3. 결론

본 논문에서는 CCl₂F₂ 분위기에서 Ar+ ion laser에 의한 단결정/다결정 Si 식각 특성을 분석하였다. 공정변수 의존성을 파악하여 식각이 시작되는 임계 laser 출력이 0.45W이며 출력 증가에 따라 식각깊이가 증가함을 알았다. 또한 반응가스 압력이 300mbar 이하에서는 식각깊이가 급격히 증가하지만, 300mbar 이상에서는 확산계수의 감소로 완만히 증가하는 것을 파악했으며, scanning speed 증가에 따라 식각깊이가 감소하는 것을 알았다. 4번 scanning을 반복하여 4.1의 높은 형상비를 얻었다. 절연층 위에 증착한 2 μ m 두께의 다결정 Si를 식각하여 평평한 바닥면의 trench를 만들고, 6 μ m 두께의 다결정 Si를 laser 출력 0.8W와, 반응가스압력 450mbar, scanning speed 150 μ m/s, scanning width 1, 2 μ m에서 2번 scanning을 반복하여 MEMS에 응용이 가능한 평평한 바닥면과 수직 측벽을 갖는 직사각형 형태의 trench를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 연구비(과제번호 : 01-E-0535)로 수행된 것으로서 이에 감사드립니다.

[참고 문헌]

- [1] M.Mulleborn, H.Dirac, and J.W.Petersen "Three dimensional nanostructures by direct laser etching of Si". Appl. Surf. Sci. 86, 568, 1995
- [2] T.M.Bloomstein, D.J.Ehrlich "Laser deposition and etching of three dimensional microstructure" Transducer91, 507, 1991
- [3] G.V.Trez, R. Beach and R.M. Osgood, Jr. "Rapid direct writing of high aspect ratio trenches in silicon:Process physics. J. V. Sci. Tec.B 6(1).37, 1988
- [4] Seichii Watanabe, Shinjiro Ueda and Mikio TaKai. "Photolytic etching of polycrystalline Silicon in SF₆ atmosphere" Jpan. J. Appl. Phy. 25, L881, 1986