

# 집속 아르곤 이온 레이저 빔을 이용한 실리콘 기판의 식각

論 文

48C-4-7

## Etching of Silicon Wafer Using Focused Argon Ion Laser Beam

鄭在訓\* · 李天\*\* · 朴政浩\*\*\*  
(Jae-hoon Cheong · Cheon Lee · Jung-ho Pak)

**Abstract** - Laser-induced thermochemical etching has been recognized as a new powerful method for processing a variety of materials, including metals, semiconductors, ceramics, insulators and polymers. This study presents characteristics of direct etching for Si substrate using focused argon ion laser beam in aqueous KOH and  $CCl_2F_2$  gas. In order to determine process conditions, we first theoretically investigated the temperature characteristics induced by a CW laser beam with a gaussian intensity distribution on a silicon surface. Major process parameters are laser beam power, beam scan speed and reaction material. We have achieved a very high etch rate up to  $434.7 \mu\text{m}/\text{sec}$  and a high aspect ratio of about 6. Potential applications of this laser beam etching include prototyping of micro-structures of MEMS(micro electro mechanical systems), repair of devices, and isolation of opto-electric devices.

**Key Words** : laser-induced thermochemical etching(레이저 유기 열화학 식각), argon ion laser(아르곤 이온 레이저), etch rate(식각율), aspect ratio(종횡비), gaussian intensity distribution(가우시안 분포)

### 1. 서 론

1960년 메이만이 루비 결정에서 처음으로 레이저를 발진 시킨 이후 30여 년간 레이저는 활발히 연구되어 현재 군사, 산업, 과학기술, 의료 등 여러 분야에서 획기적인 첨단 기기로 활용되고 있다. 특히 반도체 집적 회로와 센서 및 마이크로머신 등 집약된 첨단 기술이 요구되는 산업에 있어 집속된 레이저를 이용한 화학적 고속 식각에 관한 연구는 다양한 레이저의 개발과 함께 매우 광범위한 재료들을 대상으로 최근 10여 년간 매우 활발히 진행되어 왔다. 그 이유는 금속, 반도체, 세라믹 등 광부품, 집적 회로, 센서, 마이크로머신 등에 사용되는 거의 모든 재료에 대하여 우수한 가공 특성을 지니고 있기 때문이다[1][2]. 이러한 레이저 식각 기술은 집속된 레이저 빔에 의해 국부적으로 온도가 상승된 기판과 반응 물질간의 화학 반응에 의한 것으로 가공시 가공부위 주변의 손상이 거의 없고, 고속으로 가공할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 좁은 영역을 선택적으로 미세 가공할 수 있으며, 짧은 시간에 높은 에너지 밀도를 가할 수 있어 별도의 마스크 작업 없이 직접 가공하므로 기존의 다른 가공 기술들과 비교하여 공정을 단순화할 수 있고, 장비도 저렴하여 높은 경제성이 기대된다. 본 연구에서는 열적·기계적 특성이 매우 우수하여 마이크로 단위의 초미세 기계 시

스템(MEMS)에 많이 사용되고 있는 실리콘을 대상으로 레이저 빔에 의해 가열된 기판과 반응 물질간의 반응 메커니즘을 밝히고, 그 식각 특성을 조사하였다. 사용된 레이저는 연속파 아르곤 레이저로 빔의 강도가 가우시안 분포를 가지므로, 광학현미경으로 집속하면 수  $\mu\text{m}^2$  영역에 대해 수 ~ 수십  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 의 높은 에너지를 집중시킬 수 있다.

먼저, 집속된 아르곤 레이저 빔에 의한 실리콘 표면의 온도상승 특성을 조사하기 위해 3차원 열확산 방정식[5]을 이용하여 시뮬레이션하고, 실리콘의 용점(1690 K)에 해당하는 레이저 빔 출력을 계산해 내었다. 이를 기준으로, 레이저 가공에 있어 주된 변수로 알려진 레이저 빔 출력, 빔 주사속도 그리고 반응물질의 농도 변화에 따른 식각 특성을 조사하였다. 반응 물질로는 희석된 KOH와  $CCl_2F_2$  가스를 사용하여 각각의 식각 특성을 비교하였다.

### 2. 집속된 레이저 빔에 의한 실리콘 표면의 온도상승 특성

집속된 레이저 빔의 조사(irradiation)에 의해 실리콘 표면이 가열되어 반응 물질(용액 및 가스)과 열 화학반응을 일으키는데, 그 반응 과정은 실리콘 표면의 국부적 온도 변화에 크게 의존한다. 그러므로 레이저 빔 조사에 의한 기판 표면의 온도를 알아내는 것이 매우 중요하다. 공기 중에서 가우시안 빔 분포를 갖는 집속된 레이저 빔 조사에 의해 상승된 기판의 온도는 3차원 열확산 방정식에 의하여 구할 수 있다[5].

실험에 사용된 시료는 (1 0 0) 방향을 갖는 n형 실리콘이고, 표 1은 집속된 레이저 빔에 의한 실리콘 표면의 온도

\* 正 會 員 : 仁何大學 電氣工學科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 仁何大學 電氣工學科 副教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 高麗大學 電氣電子電波工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 1998年 9月 29日

最終完了 : 1999年 2月 6日

상승을 알기 위해 필요한 실리콘의 열적 특성을 나타낸 것이다.

표 1. 실리콘의 열적 특성[3]  
Table 1. Thermal characteristics of silicon

Characteristics	Value
Orientation	(1 0 0)
Type(doping)	n-type wafer
Melting point	1690 [K]
Boiling point	2628 [K]
Absorption coefficient	$a=10^{-4}$ [cm <sup>-1</sup> ]
Reflection coefficient	R=0.38 (300 K)
Thermal conductivity	299/(T-99) [W/cm · K]
Thermal diffusivity	128/(T-159) [cm <sup>2</sup> /sec]
Resistivity	8 ~ 10 [ $\Omega$ · cm]

다음은 3차원 열확산 방정식[5]을 나타낸 것이다.

$$\frac{K(T)}{D(T)} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla [K(T) \nabla T] = Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

(1)식에서 K(T) [W/cm · K] 와 D(T) [cm<sup>2</sup>/sec]는 물질의 열전도 계수와 열확산 계수를 나타내며, 이 두 가지 파라미터는 온도 의존성을 갖는다. 좌변의 첫 번째 항은 온도 T에 대한 시간 변화율을 나타내며, 둘째 항은 온도 T에 대한 공간적 의존성을 나타낸다. 우변의 Q(x, y, z, t)는 외부 열원에 의해 기판에 전달된 에너지를 나타낸다. 여기서 빔이 조사되지 않고 정지상태에 있을 때는 D(T)를 무시할 수 있다 [5]. 또한, (1)식의 K(T)는 Kirchhoff 변환에 의해서 3차원 열확산 방정식으로부터 제거되는데, 선행화된 온도  $\theta$ 를 도입하여 나타낸 식은 다음과 같다.

$$\theta(T) = \theta(T_0) + \int_{T_0}^T \frac{K(T')}{K(T_0)} dT' \quad (2)$$

여기서  $\theta(T_0)$ 와  $K(T_0)$ 는 상수이다. 따라서, 3차원 열확산 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{D(T(\theta))} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla^2 \theta = \frac{Q(x, y, z, t)}{K(T_0)} \quad (3)$$

또한, K(T)와 D(T)는 최소제곱법을 적용하여 오차를 최소화하는 T<sup>-1</sup>의 비례식으로 표현하며, 표 1의 실리콘의 열적 특성에 따라 다음과 같이 나타내어진다.

$$K(T) = \frac{299}{T-99} [W/cm \cdot K] \quad (4)$$

$$D(T) = \frac{128}{T-159} [cm^2/sec] \quad (5)$$

최종적으로 T<sub>0</sub> = 300 K 일 때,  $\theta(T) = 0$  의 근사에

의해[5]  $\theta(T)$ 와 T( $\theta$ )의 해석적 표현식은

$$\begin{aligned} \theta(T) &= \int_{T_0}^T \frac{K(T)}{K(T_0)} dT \\ &= (T_0 - 99) \ln \left( \frac{T - 99}{T_0 - 99} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$T(\theta) = 99 + (T_0 - 99) \exp[\theta / (T_0 - 99)] \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. T<sub>0</sub> 는 레이저 빔이 조사되는 시료의 온도이다. 광반사율(R)도 온도 의존성식을 사용하였다.

$$R(T) = 0.367 + 4.29 \times 10^{-5} T \quad (8)$$

가 된다. 실온(T=300 K)에서 R 값은 0.35 정도이며, Si의 용융점(1690 K) 근처에서는 0.439의 값을 갖는다. 따라서 레이저 빔이 정지 상태일때의 Si 온도상승은 다음식과 같이 표현된다[5].

$$T(\theta) = T_k + (T_0 - T_k) \exp\left(\frac{P[1-R(T)]\theta}{2\pi^{1/2}k}\right) \quad (9)$$

여기서, T<sub>k</sub>=99 [K], k=299 [W/cm] 이다.

그림 1은 실온 300 K에서 편심률( $\beta$ ; 빔의 일그러짐 정도) 등 기하학적인 요소와 빔의 주사속도 등을 고려하여 직경 1.2  $\mu$ m 로 집속된 레이저 빔에 의하여 (1 0 0) 방향의 실리콘 기판 표면의 온도 상승 특성을 시뮬레이션하여 실제 온도를 찾기 위한 수학적 알고리즘을 보여준 것이다. 여기서 얻은 값은 레이저 빔에 의해서 상승하는 시료 온도의 참값이 아니고, T<sub>1</sub>(계산된 이전의 온도), T<sub>2</sub>(계산된 현재의 온도)의 오차를 계산해서, 그 오차를 줄이는 반복법(iteration)으로 참값을 얻어낼 수 있다.

표 2. 알고리즘 흐름도의 변수(parameters)  
Table 2. Parameters of flow chart

변수	설명	값
$\beta$	$r_y / r_x$	1
x, y, z	x, y, z 방향의 거리를 특성반경 r 로 나눈 값	x=y=z=0
r	특성반경 $r = (r_x r_y)^{1/2}$	r=1
V	v/r	v=0(정지상태), V=0
p	레이저 출력	p=5 [mW]부터 시작
T <sub>0</sub>	레이저 빔이 조사되는 기판의 온도	T <sub>0</sub> =300 K
Q	오차율(수렴하기 위한 조건)	10 <sup>-3</sup>
n	반복횟수	n=1부터 시작

표 2는 시뮬레이션에 필요한 변수들을 설명한 것이다. 그림 2는 실리콘의 온도상승특성을 시뮬레이션 한 결과이다. 용점이상에서는 실리콘이 액상으로 변하여 광흡수율, 열전도도 등이 바뀌어 그 값을 신뢰할 수 없으므로, 용점 이후의 온도상승 곡선은 점선으로 나타내었다.

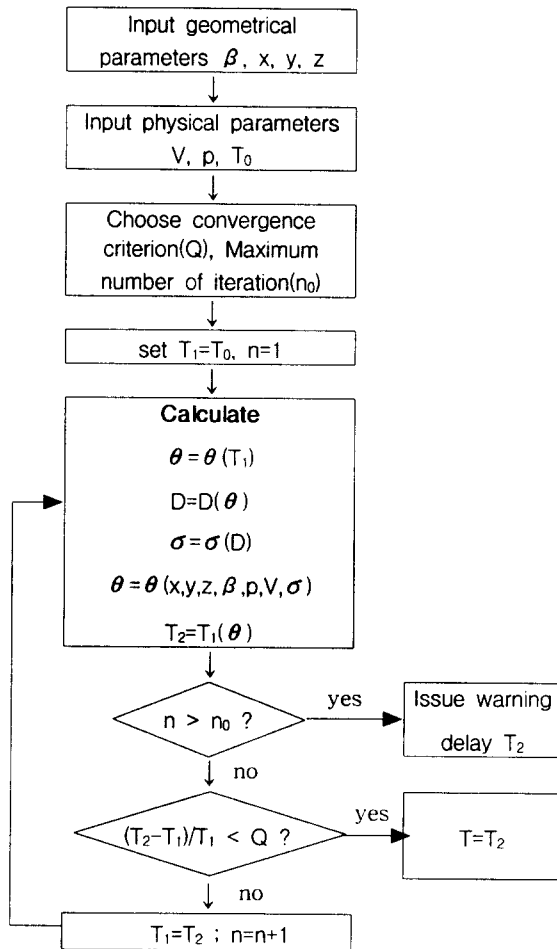


그림 1. 레이저 빔 조사시 시료의 국소부분에서의 실제 온도를 찾기 위한 수학적 알고리즘의 흐름도.  
Fig. 1. Numerical algorithm used to find real temperature in the local area then laser beam expose.

### 3. 실험장치 및 방법

실리콘 기판의 가공에 사용된 실험 장치는 최대출력 6 W, 사용파장 514.5 nm의 연속파 아르곤 이온 레이저와 빔 확장기, 빔의 무손실 유도를 위한 반사경, 그리고 0.5의 NA(Numerical Aperture)와 10.6 mm의 긴 WD(Working Distance)를 갖는 광학현미경의 대물렌즈(objective)와 진공 시스템으로 구성된다. 반응가스나 강산·염기등과의 반응을 억제하기 위해 스테인레스 스틸(SUS304)로 제작된 반응 용기(chamber)에 레이저 빔의 유도를 위해 석영 유리(quartz)로 창을 내었다. 반사경을 조정하여 빔을 주사하는 방법은 매우 어렵고, 고가의 장비를 필요로 하므로, 본 실험에서는

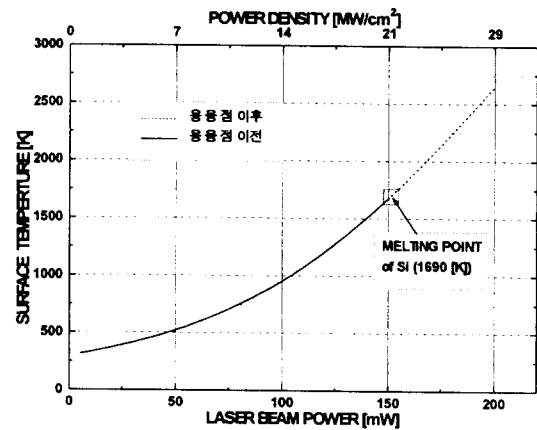


그림 2. 레이저 빔 출력에 대한 실리콘 기판 표면의 온도 상승 곡선  
Fig. 2. Temperature rising curve of silicon surface by laser beam irradiation

직렬 서보 모터(DC servo-motor)를 장착하여 x-y-z 축으로 0.1 μm의 높은 정밀도(resolution)를 가지며 이동이 가능한 스테이지 위에 반응 용기를 고정하고, 스테이지를 움직임으로써 레이저 빔을 주사하였다. 스테이지의 속도는 0.5 μm/sec 에서 최대 200 μm/sec 까지 조정 가능하며, 퍼스널 컴퓨터를 사용하여 빔 셔터, 스테이지 상호간의 동조(synchronization)를 이룰 수 있도록 하였다. 광학현미경의 z 축을 고정하고 대물렌즈를 장착하였고, 초점의 집속(focus)은 스테이지의 z 축을 움직임으로써 가능하도록 고안하였다. 1 μm³의 체적을 하나의 제거셀로 보는 층별 제거 조건을 확립할 경우 3 차원적인 가공이 가능하도록 스테이지 제어기 조정 뿐 아니라 빔의 자동 차단을 위하여 컴퓨터로써 조정이 가능한 전자 셔터를 레이저 시스템과 반응용기 사이에 위치시켰다.

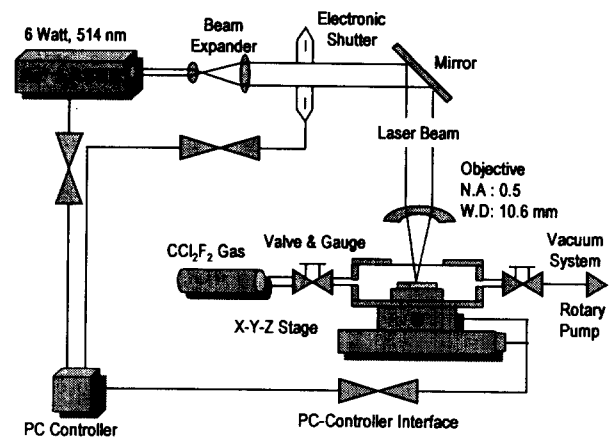


그림 3. 실리콘 미세 가공을 위한 레이저 시스템 개략도  
Fig. 3. Schematic of laser direct write system for Si micromachining

반응 가스인 CCl₂F₂(difluorodichlorocarbon)가스의 주입은 gas flow meter와 valve/gauge 시스템을 이용하여 약

200 Torr에서 대기압(760 Torr)까지 미세하게 조절하고,  $10^{-3}$  Torr까지의 진공도를 얻을 수 있는 로터리 펌프(rotary pump)로 실험 전후의 미세 입자와 반응 생성물들을 제거하였다.  $CCl_2F_2$  가스 분위기에서 아르곤 이온 레이저 빔을 광학현미경의 대물렌즈로  $1.2 \mu m$ 의 크기로 집속시켜 출력(출력밀도)을 100 mW(약  $3.18 MW/cm^2$ )에서 수 W(수십  $MW/cm^2$ )로, 빔 주사속도(beam scan speed)를  $10 \mu m/sec$ 에서 최대 주사속도인  $200 \mu m/sec$ 까지 변화시키면서 실험하였다. 가공 형상의 관찰 및 촬영을 위해 광학 현미경에 폴라로이드 카메라를 장착하였다.

레이저 유도 직접 식각을 위한 실험 장치의 개략도는 그림 3과 같다. 식각된 기판의 단면은 전자 주사 현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)으로 관찰하였다.

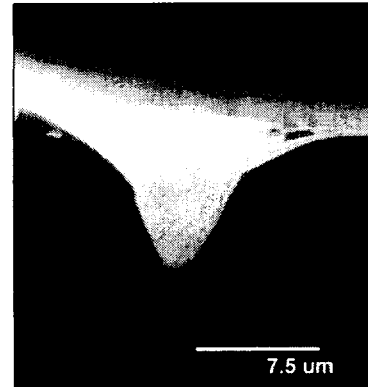
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4-1. 레이저 유도 습식 식각

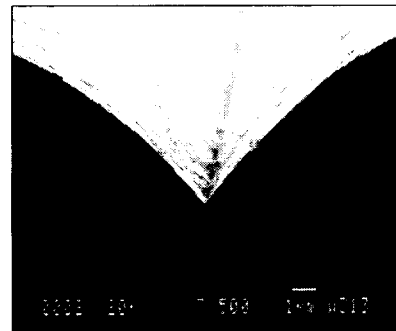
KOH 용액 중에서의 레이저 유도 습식 식각은 다음과 같은 메카니즘을 갖는다. 수십  $MW/cm^2$ 의 에너지를 받은 실리콘 기판이 국부적으로 온도가 상승하고 이로 인하여 OH-기와 물( $H_2O$ ), 그리고 실리콘이 반응하여  $K_2SiO_3$ 이라는 물에 잘 녹는 물질(soluble species)을 생성하고, 수소 가스( $H_2$ )를 배출하면서,  $K_2SiO_3$ 은 용액 중에 녹아 들어가게 된다. 실리콘은 상온에서도 KOH 용액과 반응하여 식각 반응이 일어나게 되는데, 이를 'Dark etching'이라고 한다. 본 연구에 사용된 KOH 용액은 이러한 Dark etching 현상을 줄이기 위하여 기존의 습식 식각에 사용되는 KOH 용액(e.g. 23.4 wt% KOH, 13.3 wt% isopropyl alcohol, and 63 wt%  $H_2O$ )에 비하여 더욱 희석된 용액(e.g. 2 N(Normal) = 5.6 wt%)을 사용하였다.

KOH 용액은 실리콘 기판의 방향에 따라 크게 다른 이방성을 갖는다. (1 0 0) 방향과 (1 1 1) 방향에 대한 식각율비(etch rate ratio)가 최대 400 : 1까지 나타나므로, EDP(Ethylene Diamine Pyrocatechol)보다도 훨씬 높은 이방성 식각이 가능함을 알 수 있다. KOH 용액의 이러한 특징과 집속된 레이저 빔의 입사에 의해 국소 부분으로의 높은 에너지 집중이 가능함에 따라 (1 0 0) 방향의 실리콘 기판에 부드러운 V-groove를 매우 빠르게 형성시킬 수 있다 [6]. 또한, 레이저 빔이 주사되는 방향으로 반응 후 생성된 수소 가스에 의해 기포(bubble)가 생겨 오히려 빔의 집속도를 향상시키는 효과도 있다. 그리고 국부적인 시료 표면의 가열에 의한 강한 대류 현상은 신선한 반응 용액의 빠른 순환을 일으킨다. 이와 같은 이유로 용액 안에서의 습식 식각에서는 건식 식각과는 달리 매우 깨끗한 홈을 형성할 수가 있는 것이다. 그림 4는 레이저 유도 습식 식각에 의해 생성된 홈의 단면을 주사 전자 현미경으로 관찰한 사진이다. 이때의 레이저 빔 출력은 150 mW 이고, KOH 용액의 농도는 5.6 wt%, 그리고 빔의 주사속도는  $10 \mu m/sec$ 로 하였다. 그림 4와 같이 레이저 습식 식각에 의한 홈은 매우 매끄러운 면을 가지며, 반응 생성물의 퇴적도 없으므로, 마이크로머신 부품(특히 마이크로 유체 소자) 가공에 유용하리라고 기대

된다. 또한 그림 4(b)로부터 레이저 유도 식각시 저농도의 KOH 용액안에서도 비등방성 V groove를 쉽게 얻을 수 있다는 것이 확인되었다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 레이저 빔 출력 150 mW, KOH 용액농도 5.6 wt%, 빔 주사속도  $10 \mu m/sec$ , (b) 레이저 빔 출력 300 mW, KOH 용액농도 2 N, 빔 주사속도  $10 \mu m/sec$

Fig. 4. (a) 150 mW laser beam power, 5.6 wt% KOH,  $10 \mu m/sec$  beam scan speed, (b) 300 mW laser beam power, 5.6 wt% KOH,  $10 \mu m/sec$  beam scan speed

##### 4-2. 레이저 유도 건식 식각

실리콘 기판을 레이저 유도 건식 식각하는데 사용된  $CCl_2F_2$  가스는  $CCl_4$ 와 함께 AlGaAs/GaAs multi-layer와 세라믹 등 다양한 재료의 식각에 사용되는 가스로서 식각 특성이 비교적 우수한 것으로 판명되었다[8]. 실리콘 기판 식각시  $CCl_2F_2$  가스가 시료 표면에 흡착되고 조사된 레이저 빔에 의해 국부적으로 가열이 되면 흡착된 가스들이 전리된다. 여기서 전리된  $Cl^+$  라디칼은 식각에 직접 관여하고,  $F^+$  라디칼은 용점까지 가열시에 생성된 정공을 더욱 활성화

켜 원활한 식각에 기여하는 반응기구(mechanism)를 가진다. 본 연구에서 아르곤 이온 레이저의 파장 514.5 nm 에서는 광화학적 반응(photo-chemical reaction)은 일어나지 않고, 재료의 용융과 열화학적 반응에 의해서만 식각이 이루어진다[11]. 즉, Cl(염소)은 국부적으로 가열된 실리콘 기판 표면의 결점(defect)에 실리콘(Si)원자 대신에 대치되거나 부가원자(adatom)을 형성시켜서, 적은 에너지로도 반응 생성물이 떨어져 나갈 수 있게 하고, F(불소)는 정공을 활성화시켜주는 역할을 한다. 반응 가스가 실리콘 기판의 표면에 흡착되고, 약 20~30 MW/cm<sup>2</sup> 의 높은 빔 출력 밀도에 의해 실리콘 표면은 용점까지 쉽게 상승할 수 있고, 이로 인하여 액체 상태가 된 실리콘이 약 1000 °C 정도에서 반응가스와 매우 급격한 반응을 일으켜 휘발성 반응 생성물(volatile by-product)을 생성하여 원하는 홈(groove)을 얻을 수 있다[11]. 결정 상태(crystal phase)의 실리콘은 용점 이하에서 반응가스와 거의 반응하지 않고 빔에 의해 가열되어 액체 상태(liquid phase)가 된 부분만이 반응하게 되므로, 가우시안 빔의 중심부에서만 식각이 일어나므로, 빔 크기보다 좁은 홈을 형성시킬 수 있다[4]. 레이저 유도 건식 식각은 다음과 같은 화학식에 의한 반응을 따른다.

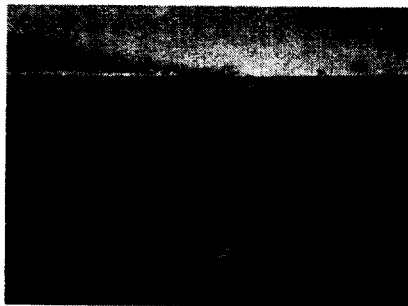


그림 5. 레이저 유도 건식 식각에 의해 형성된 홈의 단면의 전자현미경 사진

Fig. 5. SEM image of groove by laser-induced dry etching

그림 5는 레이저 유도 건식 식각에 의해 얻어진 홈의 단면에 대한 SEM 사진이다. 대기압보다 낮은 385 Torr 의 CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 가스 분위기 하에서 레이저 빔 출력 900 mW로 식각한 것이다. 식각된 홈의 깊이는 약 10 μm 이고, 선폭은 3 μm 로 3.3의 종횡비(aspect ratio)를 보여주고 있다. 비교적 깨끗한 홈을 형성하고는 있지만, 내부에 물결무늬(ripple)가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 완전소자 제작시 기계적·전기적으로 문제를 일으킬 가능성이 있어 물결무늬의 제거가 필수적이다.

그림 4와 그림 5를 비교하면 습식 식각의 경우가 건식 식각에 비하여 홈의 선폭은 매우 넓어진 것을 볼 수 있으나, 홈 벽면과 외부 표면은 매우 매끄러운 것을 볼 수 있다. 이는 건식 식각의 경우 급격한 화학 반응에 의해 반응 생성물

이 홈의 언저리(edge)와 내부에 남아 있을 가능성이 있지만, 습식 식각의 경우, 반응 용액이 레이저 빔에 의하여 국부적으로 가열된 기판과 일정하게 반응하여 생성된 반응 물질이 용액 중에 잘 녹아 들어가기 때문이다. 위와 같이 습식 식각과 건식 식각의 반응 메카니즘(반응기구)차에 의해, 습식 식각은 마이크로 단위의 유체소자 등의 특수한 분야에 응용될 수 있고, 건식 식각은 비교적 가로/세로 종횡비가 크고, 선폭이 가는 홈을 형성시키는데 유리하다. 그러나 레이저 유도 습식 식각은 기존의 식각공정과 연계하기 어렵고, 가공정밀도도 떨어지므로, 레이저 유도 건식 식각 특성에 대하여 주로 고찰하였다.

레이저 빔을 주사속도 10 μm/sec 로 주사시키면서 실험한 결과, 실리콘 기판을 용융(melting)하기 위한 가시적인 문턱값(threshold value)은 3×10<sup>-1</sup> Torr 의 진공에서는 400 mW, 그리고 대기압의 CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 가스 분위기(760 Torr)에서는 300 mW 인 것으로 나타났다. 공기 중이나 진공에서보다 반응 가스 분위기에서 저온(저출력) 가공이 가능함을 알 수 있다.

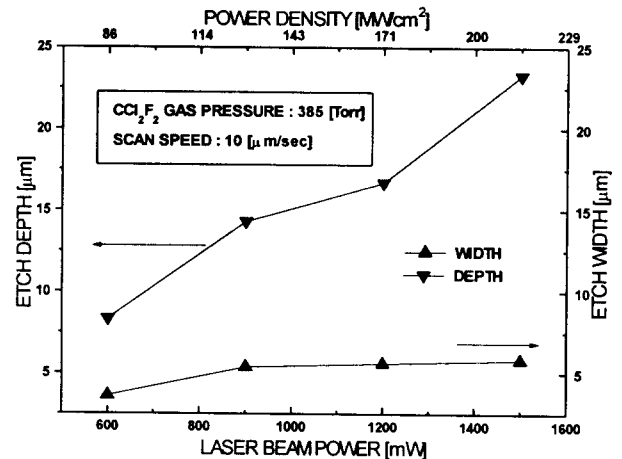


그림 6. 홈의 선폭과 깊이의 레이저 빔 출력 의존성  
Fig. 6. Relation between etch profile and power

그림 6은 레이저 건식 식각에 의한 식각된 홈의 선폭과 깊이의 출력 의존성을 나타내 주고 있다. 레이저 빔 출력이 증가함에 따라 식각된 홈의 깊이는 계속 증가하나 식각 넓이는 900 mW 부근에서 포화하고 있다.

그림 7은 식각율(etch rate)과 종횡비(aspect ratio)의 레이저 빔 출력 의존성을 나타내고 있다. 레이저 출력이 증가할수록 식각율과 종횡비가 매우 크게 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 이는 레이저 빔이 홈의 측면에서 전파사하여 홈의 밑면에 조사되는 효과(light guide or wave guide effect)에 의한 것이다. 그러나, 레이저 빔이 조사되는 시료 표면이 고체 상태에서 액체 상태로 상변이(phase transition)함에 따른 물결무늬(ripple)가 형성되는 것을 볼 수 있었다.

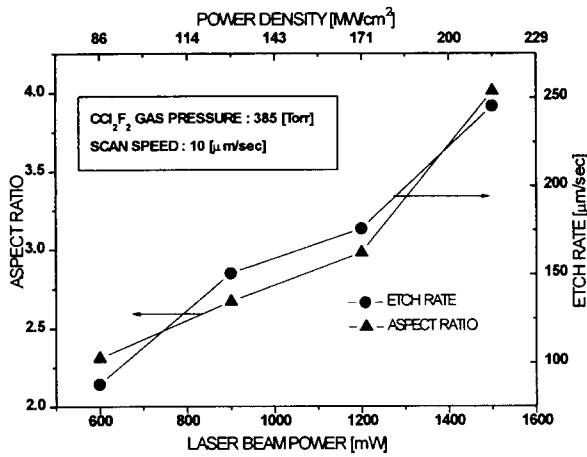


그림 7. 레이저빔 출력에 따른 식각율과 종횡비  
Fig. 7. Power dependence for aspect ratio and etch rate



그림 8. 주사전자현미경 사진(단면 사진) - 레이저 빔 출력 1000 mW, 반응가스압 760 Torr, 빔 주사속도 100 µm/sec  
Fig. 8. SEM image(Cross-sectional view) - 1000 mW laser beam power, 760 Torr gas pressure, 100 µm/sec beam scan speed

그림 8은 레이저 빔 출력 1000 mW, 반응 가스압 760 Torr, 빔 주사속도 100 µm/sec일 때, 식각된 홈 내부에 물결무늬가 나타나는 것을 보여주는 전자현미경 사진이다. 물결무늬가 생기는 이유는 레이저 빔이 주사하면서 실리콘 표면이 액체 상태가 되었을 때, 고체 상태일 때보다 반사율이 매우 커지게 되어 충분한 에너지를 받지 못하므로, 고체상태의 시료표면이 나타나서 다시 높은 광흡수를 일으키기 때문이다. 이와 같은 현상이 빔이 주사하면서 반복되는데, 이것이 홈 내부에 물결무늬(ripple)를 나타내는 원인이다. 그리고, 이러한 현상은 반응 물질의 밀도, 즉 반응 가스압이 높은 경우에 더욱 심화되는 것을 알 수 있다.

그림 9는 그림 8에서의 조건에서 반응 가스압만을 달리하여 실험한 것이다. 가스압을 절반 정도로 줄여준 결과, 그림 8에서 나타났던 물결무늬가 거의 나타나지 않을 것을 볼 수 있었다. 이는 물결무늬가 반응 가스압, 즉 반응 물질의 밀도에 크게 의존하고 있음을 보여주는 결과이다.

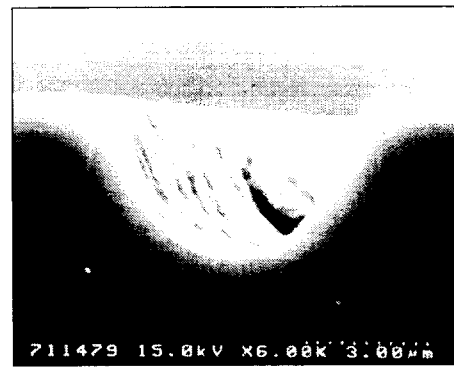


그림 9. 주사전자현미경 사진(단면 사진) - 레이저 빔 출력 1000 mW, 반응가스압 385 Torr, 빔 주사속도 100 µm/sec  
Fig. 9. SEM image(Cross-sectional view) - 1000 mW laser beam power, 760 Torr gas pressure, 100 µm/sec beam scan speed

CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 가스압 385 Torr, 레이저 빔 출력 600 mW, 빔 주사속도 8 µm/sec 에서 1.5 µm, 최대 홈깊이는 동일 가스압에서, 출력 1.2 W, 빔 주사속도 10 µm/sec 일 때, 41.3 µm 를 얻을 수 있었다.

최대 종횡비(maximum aspect ratio)는 가스압 385 Torr, 레이저 빔 출력 1.2 W, 빔 주사속도 10 µm/sec 에서 5.95, 최대 식각율(maximum etch rate)은 가스압 385 Torr, 레이저 빔 출력 2.4 W, 빔 주사속도 10 µm/sec 에서 434.7 µm/sec 를 얻을 수 있었다. 그림 10은 최대 종횡비를 얻은 홈의 전자현미경 단면사진이다.

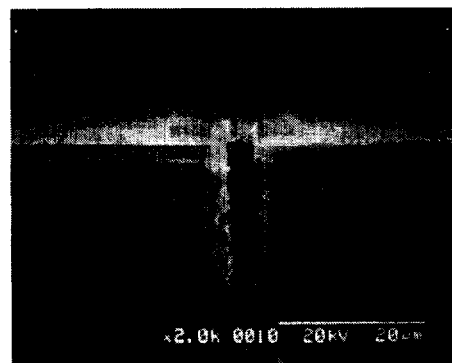


그림 10. 주사전자현미경 사진(단면 사진) - 레이저 빔 출력 1200 mW, 반응가스압 385 Torr, 빔 주사속도 10 µm/sec  
Fig. 10. SEM image(Cross-sectional view) 1200 mW laser beam power, 385 Torr gas pressure, 10 µm/sec beam scan speed

그림 11은 동일한 레이저 빔 출력(1000 mW)과 반응 가

스압(386 Torr)으로 빔을 주사하였을 때, 빔 주사속도에 대한 가공된 홈의 선폭과 깊이의 변화를 보여준다. 빔 주사속도가 빠를수록 식각된 홈의 선폭과 깊이가 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 빔 주사속도가 빠를 수록 국부적인 부분에 빔이 머무르는 시간, 즉 beam dwell time 이 작아지므로 식각 반응이 일어나는 시간이 짧아진다. 이로 인하여 식각된 홈의 깊이가 작아지며, 가우시안 분포를 갖는 빔의 가장자리 부분에 의한 식각이 일어날 확률이 작아므로, 식각된 홈의 폭도 작아진다.

표 3은 레이저 유도 건식 식각과 습식 식각의 결과를 서로 비교한 것으로 반응가스를 사용한 레이저 유도 건식 식각의 경우가 KOH 용액을 사용한 습식 식각보다 식각된 홈의 최대 깊이가 최소 선폭에 있어서 훨씬 유리함을 보여준다. 최대 식각율에 있어서 건식 식각이 습식 식각의 경우의 약 14배, 그리고 최대 종횡비는 약 6 배 더 크다.

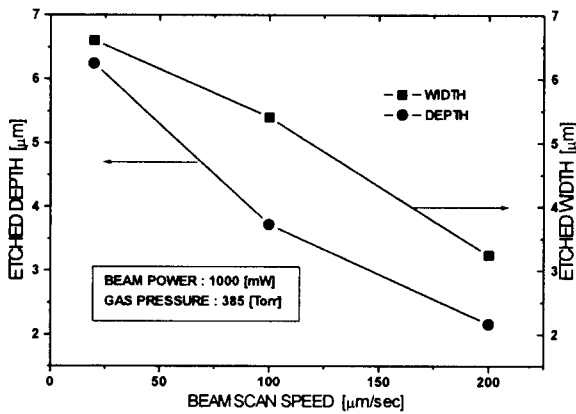


그림 11. 동일 레이저 출력과 가스압(1000 mW, 385 Torr)에서의 레이저 빔 주사속도의 변화에 따른 etch profile의 변화.

Fig. 11. Dependence of etch profile on beam scan speed at same beam power and pressure

표 3. 레이저 유도 건식 식각과 습식 식각의 비교  
Table 3. Comparison with laser-induced dry etching and wet etching

	Dry etching	Wet etching
Etchant	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> gas	KOH solution
Max. depth	41.3 μm	7 μm
Min. width	1.5 μm	7 μm
Max. etch rate	434.7 μm/sec	31 μm/sec
Max. aspect ratio	5.95	1
Shape	Deep trench	V-groove

### 5. 결론

본 연구에서는 집속된 아르곤 이온 레이저를 이용하여 (1 0 0) 방향의 n형 실리콘을 미세 가공한 것으로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 3차원 열확산 방정식을 이용하여 연속파 아르곤 이온 레이저 빔 조사에 의한 실리콘 표면의 열상승 특성을 시뮬레이션 하였다.
2. 실리콘 건식 식각에서 레이저 빔 출력 1.2 W, 반응 가스압 385 Torr, 빔 주사속도 10 μm/sec 로 1회 주사하였을 때, 최대 식각율 434.7 μm/sec와 종횡비 5.95 를 얻었다.
3. 레이저 유도 식각에 의해 생성된 홈의 깊이는 반응 물질의 농도에 거의 비례적으로 증가하는 경향을 보이는데, 오히려 용액 안에서의 습식 식각에 비하여 건식 식각의 경우가 홈의 선폭, 깊이 그리고 종횡비(aspect ratio)와 식각율(etch rate)면에서 훨씬 우수함을 보였다.
4. 반응 물질(CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)의 농도에 비례하여 심화되는 상변이에 의한 물결무늬의 발생을 확인하였고, 농도를 낮추므로써 이를 해결하였다.
5. 식각된 홈의 깊이 및 너비의 레이저 출력, 빔 주사속도, 반응 물질에의 의존성을 밝힘으로써 마이크로 단위의 구조체 가공을 위하여 깨끗한 홈을 형성하기 위한 조건을 확립하였다. - 저밀도의 반응가스와 고속의 주사속도에서 비교적 깨끗하고 정밀한 홈을 형성할 수 있었다.

이와 같이 레이저 빔을 집속하여 직접 재료를 가공하는 기술은 마스크를 사용한 기존의 식각 기술로는 구현하기 어려운 다양한 구조체를 형성하는 데 매우 유용하게 사용될 수 있다. 컴퓨터 디자인 프로그램을 사용하여 실제 3차원 구조의 실현을 위한 층별 제거(layer-by-layer removal)가 가능하며, 이를 이용하여 마이크로 펌프의 노즐/확산기, 마이크로 렌즈 배열(micro-lens array), 그리고 마이크로 미러의 틀 가공 등 기존의 식각 기술로는 구현하기 힘든 3차원적인 구조체들을 위한 빠른 prototyping 이 가능하게 되었다. 레이저 유도 식각은 이와 같이 매우 큰 종횡비와 식각율을 얻을 수 있으며, 가공시 손실과 손상이 매우 작아 고도의 정밀도를 요하는 마이크로머신의 부품을 가공하는 새로운 도구로써 응용이 가능하다.

### 감사의 글

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단의 학술연구비 지원에 의하여 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

### 참고 문헌

[1] D.J. Ehrlich an J.Y. Tsao, Eds., Laser Micro fabrication(Academic Press, San Diego, CA, 1989)  
[2] M. Müllenborn, H. Dirac, J. W. Retersen, S. Bouwstra, "Fast three-dimensional laser

micromachining of silicon for microsystems", sensors and actuators, A 52, pp 121-125, 1996

[3] Otfried Madelung(Ed.) "Semiconductors-Basic Data", pp 11~27, 1996

[4] M. Müllenborn, H. Dirac, J. W. Retersen, "Three-dimensional nanostructures by direct laser etching of Si", Applied surface science, 86, pp. 568-576, 1995

[5] J. E. Moody and R. H. Hendel, "Temperature profiles induced by a scanning cw laser beam", J. Appl. Phys. 53(6), pp 4364-4371, June 1982

[6] R.J. von Gutfeld and R.T. Hodgson, "Laser enhanced etching in KOH", Appl. Phys. Lett. 40(4), 15, p. 352, February 1982

[7] S. Wolf and R. N. Tauber, "Silicon Processing for the VLSI Era", vol 1, p 531, 1990

[8] S. K. Park, C. Lee, B. D. Min, S. I. Kim, E. K. Kim, S. K. Min, and B. S. Ahn, Ungyong Mulli(The Korean Physical Society) Vol. 10, No. 3, pp. 266-271, May 1997

[9] M. Müllenborn, H. Dirac, J. W. Retersen, S. Bouwstra, "Fast three-dimensional laser micromachining of silicon for microsystems", sensors and actuators, A 52, pp 121-125, 1996

[10] S. I. Bozhevolnyi, I. V. Potemkin, and V. B. Svetovoy, "Direct writing in polymethyl methacrylate films using near-ultraviolet light of Ar+ laser", J. Appl. Phys. 71 (4), 15 February. 1992

[11] KURT E. RETERSEN, "Silicon As a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, Vol 70, No 5, p427, May 1982

[12] D. J. Ehrlich and J. Y. Tsao, "Laser Microfabrication: Thin Film Processes and Lithography", Academic, Boston, 1989

[13] Russell et al, "Excimer Laser-Assisted Etching of Si using Chloropentafluoroethane", Mat. Res. Soc. Proc., vol. 158, pp. 325-330, 1990

[14] Houle, Basic Mechanisms in Laser Etching and Deposition", Appl. Phys. A, vol. 41, 315, 1986

저 자 소 개



**정재훈(鄭在訓)**  
 1973년 11월 25일 생. 1996년 인하대 전기공학과 졸업. 1996년~현재 동 대학교 전기공학과 석사과정



**이 천(李天)**  
 1960년 6월 11일 생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 일본 오사카대 전기공학과 졸업(공학박). 1992년~1993년 일본 이화학연구소 연구원. 1993년~1994년 한국과학기술연구원 Brain Pool 연구원. 1994년~ 현재 인하대학교 전기공학과 부교수.  
 주관심분야 : 레이저미세가공, MEMS, 반도체  
 Tel : 02-860-7400  
 E-mail : chnlee@dragon.inha.ac.kr



**박정호(朴政浩)**  
 1960년 2월 5일 생. 1985년 미국 Purdue Univ. 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1983년 5월~1983년 8월 IBM 학생 연구원. 1984년 1월~1984년 8월 IBM 학생 연구원. 1985년 5월~1985년 8월 GM Delco Electroincs 연구원. 1986년 1월~1992년 5월 Purdue Univ. Research Assistant. 1988년 1월~1988년 5월 Purdue Univ. Teaching Assistant. 1992년 8월~1995년 2월 Intel Corp. 책임 연구원. 1995년 3월~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수