

# 레이저를 이용한 미세가공

김 호 성\*

(\*중앙대학교 공대 전기공학과 조교수)

## 1. 머리말

초소형기기의 제작에 사용되는 미세가공 기술의 대부분이 반도체 직접회로의 제작에 사용되는 기술이라는 것은 잘 알려져 있다. 그러나 초소형기기에서는 수십 micrometer의 가공이 필요하므로 기계적 가공으로는 그 정밀도를 맞추기 힘들며 micrometer이하의 가공을 주로하는 반도체 공정기술로는 가공속도와 가공의 균일성을 기대하기 어렵다. 또한 최근 3차원 가공의 필요성이 증대되고 있으며 최종 조립 및 packaging 단계에 사용되는 미세조정(final trimming)의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 요구는 기존의 방전가공기술(Electric Discharge Machining, EDM), 다이아몬드를 이용한 가공기술, X-Ray 기술에 의해서도 어느정도 충족 될 수 있지만 가공속도, 재료, 형상에 따라 그 응용이 크게 제약받고 있다. 이들과 비교할 때 레이저에 의한 미세가공 기술은 가공속도가 더 빠르고 다양한 재료를 가공할 수 있고 또 다양한 기하학적 형태를 가공할 수 있다는 장점으로 인하여 흥미를 끌고 있다.

이 논문에서는 레이저를 사용하여 미세가공을 할 때 고려해야할 사항들에 대하여 간략히 서술한 후 미세가공 방법을 레이저를 이용한 식각과 증착으로 나누어 소개하겠다.

## 2. 레이저 미세가공시의 고려사항

레이저에 의해 발생된 빛은 단색성(monochromacity), 직진성(directionality), 가간섭성(coherence) 등의 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인하여 렌즈를 사용하여 레이저빔을 집중시키면 작은 면적에 많은 에너지를 전달할 수 있다. 레이저빔의 단면에서 볼 때 파워가 빛의 중심으로부터의 거리에 대해 가우스분포를 가지고 있으며 렌즈에 입사되는 레이저빔의 직경이 렌즈의 직경과 같다고 하면 초점에서 빔의 반지름은 다음 식으로 표현된다.

$$r = 2f\lambda / \pi D = 2\lambda F / \pi.$$

여기서  $\lambda$ 는 레이저빔의 파장,  $f$ ,  $D$ ,  $F$ 는 각각 렌즈의 초점거리, 직경, F number이다.  $r$ 은 레이저빔의 중심으로부터의 거리이며 이 거리에서 빛의 파워가 빔의 중심에서의 파워의  $1/e^2$ 이 된다. 일반적으로 고출력 레이저의 빔모양은 가우스분포보다 더 넓게 분포하며 F number가 1 이하인 렌즈는 거의 사용되지 않으므로 구현가능한 최소의 레이저빔의 반지름은 그 빛의 파장과 같다고 할 수 있다. 미세가공에 많이 사용되는 아르곤 레이저와 Nd:YAG 레이저의 예를 들면 그 파장이 각각 488nm, 1.06  $\mu$ m 이므로 최소 직경이 각각 1  $\mu$ m, 2  $\mu$ m 정도이다.

한편, 렌즈를 통과한 레이저빔의 반지름은 초점에서 최소가 되므로 높은 aspect ratio를 요구하는 공정에서는 초점 근처에서의 빔 크기의 변화를 고려해야 한다. 레이저빔의 반지름이 초점에서의 반

지름에 비해 5% 커지는 거리의 두배(초점 전, 후)를 초점깊이라 부르며 그 식은 다음과 같다.

$$z = r^2 / \lambda$$

여기서  $z$ 는 초점깊이,  $r$ 은 초점에서 레이저빔의 반지름이다. 출력이 10W인 Nd:YAG 레이저( $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ )의 경우 반지름에 대한 초점깊이와 초점에서의 출력 밀도의 예를 들면 다음과 같다.

$r(\mu\text{m})$	$z(\mu\text{m})$	$I(x10^6\text{W}/\text{cm}^2)$
1	.95	320
20	380	0.8
50	2370	0.13

위의 예에서 알 수 있듯이 초점 크기가 작아지면 초점 깊이가 제곱에 반비례하여 짧아져 높은 aspect ratio를 얻을 수 없고 출력밀도는 제곱에 비례하여 커지므로 가공의 목적에 따라 레이저와 렌즈의 선택에 신중을 기해야 한다.

레이저 가공기술은 물질이 빛에너지를 흡수하면 그 물질의 물리 또는 화학적 성질이 변화되는 현상을 이용하는 기술이므로 광원인 레이저와 광학시스템의 특성뿐만 아니라 가공물질의 성질도 고려해야 한다. 일반적으로 금속은 가시광선 및 적외선에 대해 반사율이 1에 가까우므로 고출력 레이저(kW급)가 가공에 사용되지만 가공의 정도가 균일하지 못하고 가공면이 고르지 못하므로 정밀도를 요하는 초소형기기의 가공에서는 금속가공은 사용되지 않고 있다. 초소형기기에 주로 사용되는 재료는 반도체 또는 폴리머와 폴리이미드이며 이들의 레이저빔

의 흡수율이 높으므로 수 W급 또는 mW급 저출력 레이저가 미세가공에 주로 사용된다.

위에서 언급한 기술적인 타당성 외에도 경제적 타당성도 함께 고려되어야 한다. 기존의 가공방법과 비해 제품의 질과 가격면에서 경쟁력이 있는가. 즉 양산성의 문제가 그 예이다. 운송과 관리에 전문적이고 숙달된 기술을 요하는 광학기기를 다룰 수 있는 기술자의 확보문제 또한 고려되어야 할 사항이다.

### 3. 식각에 의한 레이저 미세가공.

레이저를 이용하여 재료를 식각하는 방법에는 광자에너지만을 이용하여 재료의 화학적결합을 파괴하여 식각하는 Laser Ablation 방법과 레이저빔이 공급하는 열로써 기체상태의 화학물질과 가공재료의 화학적 반응을 야기시켜 식각하는 Laser Assisted Chemical Etching방법이 있다.

우선 Laser Ablation 방법은 엑시머레이저로부터 방출된 자외선을 금속 마스크에 투사시키고 통과된 빛만을 렌즈로 가공재료에 집속시켜 식각하는 방법이다. 그림 1의 (c)는 파장이 248nm인 엑시머레이저를 이용한 75 $\mu\text{m}$ 두께의 폴리이미드 가공예를 보여주며 그림 2는 각 파장에 대한 레이저 펄스의 에너지 밀도와 식각 깊이의 상관관계를 보여준다. 빛이 흡수된 부분에서만 화학적 결합이 파괴되어 식각되므로 가공면적 주위에 열에 의한 변형이 일어나지 않고 재용고된 부산물(그림 1-b, c)이 남지 않는다는 장점이 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 식

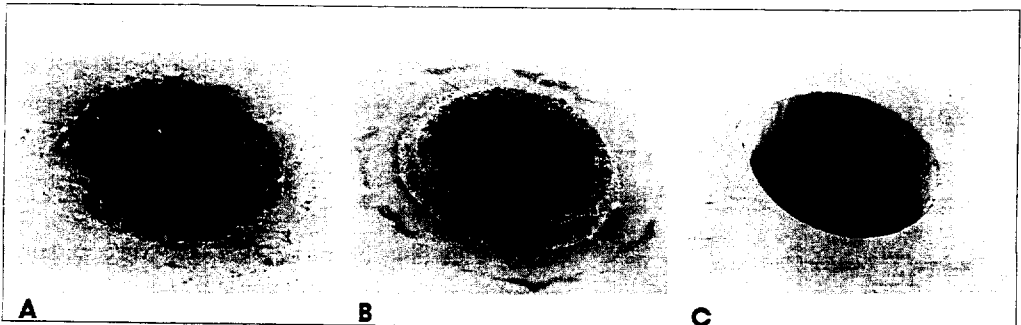


그림 1. 레이저를 이용한 75 $\mu\text{m}$ 두께의 폴리이미드에 직경 300 $\mu\text{m}$ 의 구멍을 가공한 예. (a) 파장이 1.06 $\mu\text{m}$ 인 Nd:YAG 펄스 레이저 사용, (b) 파장이 10.6 $\mu\text{m}$ 인 CO<sub>2</sub> 펄스 레이저 사용, (c) 파장이 248nm인 엑시머 레이저 사용.

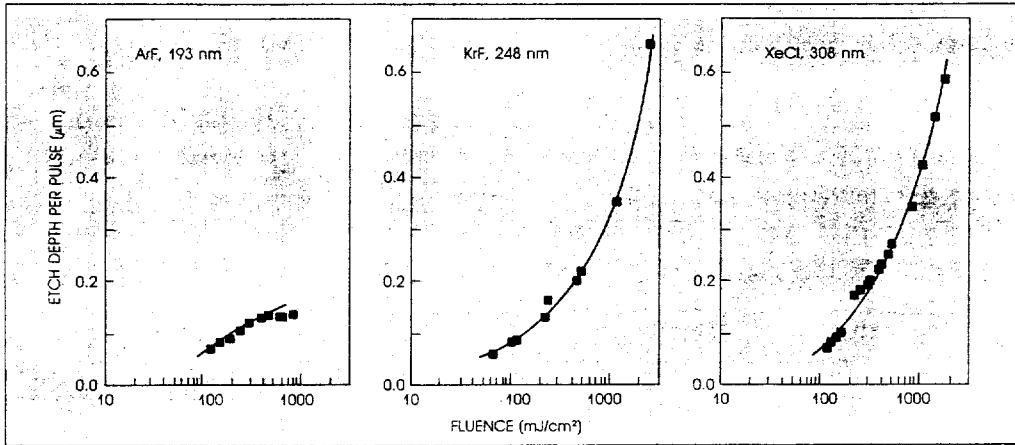


그림 2. 여러가지 파장의 엑시머 레이저에 의한 폴리이미드 식각의 식각깊이와 에너지밀도와  
의 상관관계.

각의 깊이는 하나의 레이저펄스에 하여 약 0.3 $\mu$ m 정도이므로 투사된 펄스의 숫자로 식각 깊이를 정확히 조절할 수 있다. 재사용이 가능한 금속 마스크를 사용한 투사방식이므로 양산성이 크다는 것도 장점이지만 엑시머 레이저의 가격이 다른 레이저에 비해 비싸고 고가의 유독 화학가스를 사용하기때문에 초기투자 비용및 운전 비용이 크다는 단점이 있다.

Laser Assisted Chemical Etching(LACE, LAE)방법은 레이저빔에 의한 가공재료의 발열을 이용하는 방법이다. 그러나 열에 의한 용융을 이용하면 가공면이 고르지 못하고 가공면적 주위에 재용고된 부산물이 남는 단점이 있으므로 용융점 이하의 온도에서 기체상태의 주변 화학물과의 반응을

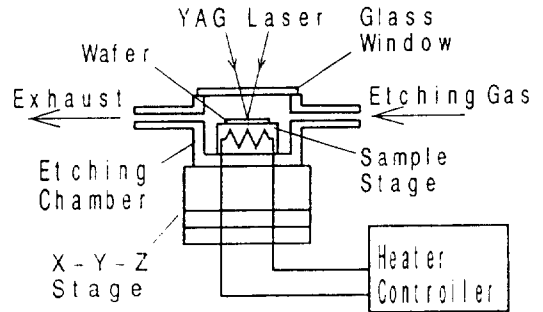


그림 4. LAE etching chamber의 구조.

통하여 식각한다. 그림 3의 장치 개념도에서 알 수 있듯이 가공재료를 넣은 etching chamber에 반응가스를 주입하면서 chamber 윗부분에 위치한 창을 통하여 레이저빔을 주사하면 레이저빔이 주사된 부분만 식각시킬 수 있다. Etching chamber를 X-Y stage 위에 올려 놓고 TV 모니터로 보면서 수작업을 할 수도 있으며 stepper motor와 CAD 시스템을 이용하여 작업할 수도 있다. 그림 4의 etching chamber구조와 같이 별도의 히터를 부착하면 식각된 잔여물질이 식각부분 주위에 재용고되는 것을 방지할 수 있고 지나친 온도차이에 의한 응력때문에 가공재료가 손상되는 것을 막을 수 있다. 주로 사용되는 반응가스에는 HCl, SF<sub>6</sub>, Cl 등이 있고 대기압 또는 그 이하에서 가공하며 압력을

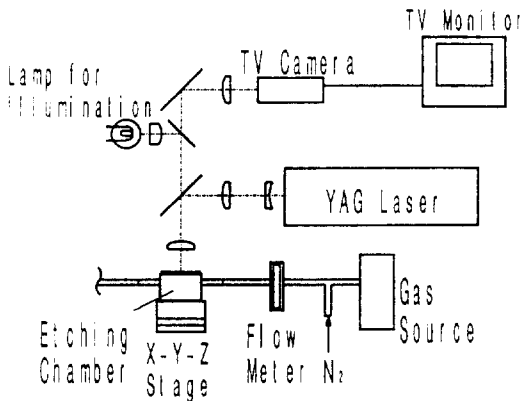


그림 3. LAE 시스템의 구성도.

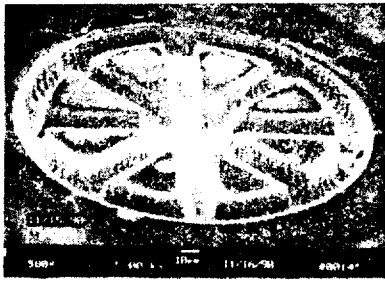
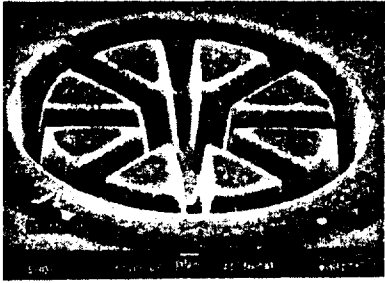
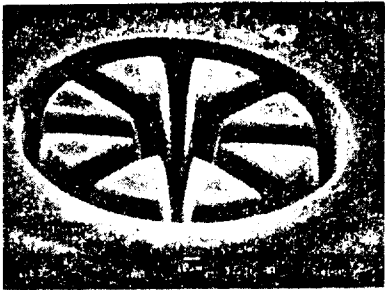
10  $\mu\text{m}$   
DEPTH30  $\mu\text{m}$ 50  $\mu\text{m}$ 

그림 5. LAE를 사용하여 Ge 기판에 제작된 구조물

조절하기 위해 안정된  $\text{N}_2$  가스를 반응가스와 함께 주입한다. 그림 5는 300mW 아르곤 레이저를 이용한 LAE 가공예를 보여준다. 넓은 면적을 가진 cantilever와 같은 3차원구조물을 wet etching으로 가공할 경우 공정이 끝난 후 응력으로 인해 변형이나 파괴가 일어나는 심각한 문제가 발생할 수 있다. 보조구조물을 부착하여 공정을 마친 후 이러한 LAE방법으로 보조구조물과 주구조물을 분리하면 변형이나 파괴를 피할 수도 있다. Cl과 Si의 반응속도가  $\text{SiO}_2$ 와의 반응 속도보다 1000배정도 빠르다는 것을 이용하면 Laser Assisted Selective Etching(LASE)을 할 수 있어 3차 구조물 특히 터널을 쉽게 가공할 수 있다. 그림 6의 가공예에서 왼쪽의 밝은 부분은 다결정 실리콘이며 오른쪽의 어두운 부분은 그위에 0.5 $\mu\text{m}$  두께의 산화막이 증착된 부분

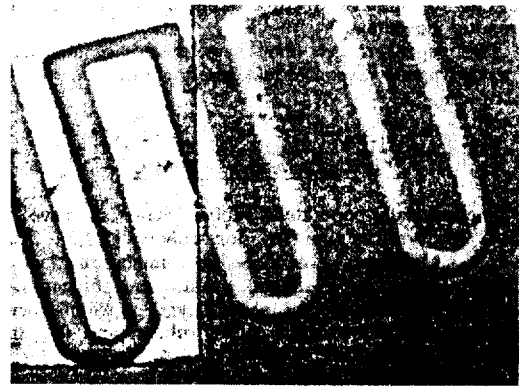


그림 6. LASE를 사용하여 제작된 도랑 및 터널, 그림의 왼쪽은 다결정 실리콘에 식각된 도랑을 보여주며 왼쪽은 산화막 밑의 다결정 실리콘만 식각된 터널을 보여준다.

이다. 왼쪽 부분에서는 레이저빔이 주사된 다결정 실리콘이 식각되어 도랑을 이루고 있으며 오른쪽 부분에서는 산화막은 식각되지 않고 그 아래층인 다결정 실리콘만 식각되어 터널구조를 이루고 있다. 기체의 확산속도가 액체의 확산속도보다 크므로 복잡한 3차원 구조물을 가공할 수 있다.

#### 4. 증착에 의한 레이저 미세가공

잘 알려진 Laser Chemical Vapour Deposition (LCVD) 기술을 이용하면 기판으로부터 공간으로 기둥 또는 나선형과 같은 3차원 구조물을 제작할 수 있다. CVD는 가열된 기판위에 가스를 접촉시켜 고체를 증착하는 기술이며 LCVD는 기판의 특정부분만을 집속된 레이저빔으로 가열시켜 그 부분에서만 증착을 개시시키고 유지시키는 기술이다. 실리콘을 증착할 때에는  $\text{SiH}_4$ 가스를 주로사용하며 텅스텐을 증착할 때에는  $\text{WF}_6$ 가스를 사용한다. 그림 7은 LCVD방법으로 실리콘 나선형 구조물을 제작하는 과정을 장치의 개념도이다.  $\text{SiH}_4$ 가스 분위기속에서 X-Y stage위에 설치된 기판과 또 다른 가변 stage 위에 설치된 렌즈를 움직여서 레이저빔의 집속점을 3차원으로 움직이면 집속점의 온도가 올라가  $\text{SiH}_4$ 가스가 분해되어 고체상태의 실리콘만 증착 또는 성장된다. 연속성장이 되도록 또 정확한 밀도를 유지하도록 레이저빔의 에너지와 속도를 정

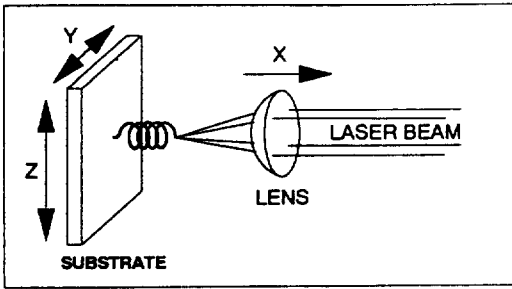


그림 7. LCVD를 이용한 3차원 구조물 제작의 개념도.

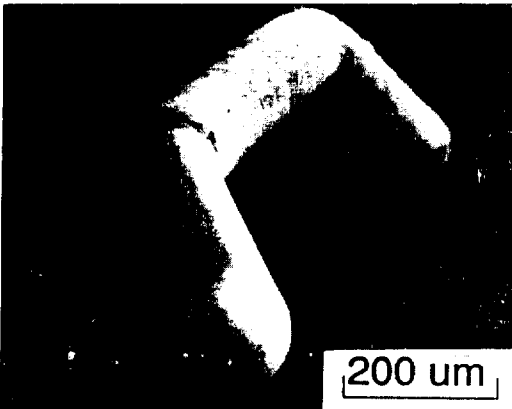


그림 8. LCVD로 제작된 3차원 실리콘 구조물.

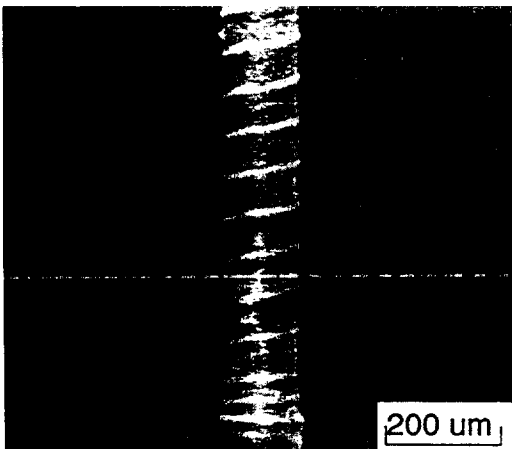


그림 9. 실리콘 막대위에 LCVD로 제작된 텅스텐 마이크로슬레노이드

확히 조절해야함은 물론이다. 그림 8과 그림 9는 이 방법으로 제작된 실리콘 나선구조물과 실리콘 막대 위에 제작된 텅스텐 마이크로 슬레노이드를 각각 보여준다.

## 5. 맺는말

레이저를 이용하여 미세 정밀 가공을 하려면 위에서 언급한 바와 같이 레이저를 포함한 광학기기의 특성을 잘 알고 있어야하며 가공재료에 대한 물리화학적 특성에 대한 지식이 필수적이다. 이러한 기술적 문제 외에도 초기투자 비용 및 운전비용, 그리고 양산성까지 포함된 경제적 문제를 고려해야 한다. 그러나 이미 설치된 레이저의 활용도를 높여 시작품의 제작과 양산에 사용한다거나 기존의 방법에 비해 제품의 질과 가격이 우수한 경우 그리고 레이저이외의 방법으로는 제작이 불가능한 경우 레이저에 의한 가공이 가능하다. 본 특집의 경우와 같이 가공의 제규격이 반도체공정으로는 너무 크고 기계적가공으로는 너무 작은 초소형기기의 가공에는 많은 응용이 가능하리라 믿어진다.



### 김호성(金鎬成)

1957년 10월 11일생, 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년~86년 금성전기기술연구소 연구원. 1992년 미국 뉴욕주립대(버팔로) 전기및 전자공학과 졸업(공학). 현재 중앙대 공대 전기공학과 조교수.