

## Piezo Q-Switched Nd:YAG 레이저에 의한 초미니 전자빔 장치용 Micron-Size Aperture의 레이저 미세가공

안승준 · 김대욱 · 김호섭 · 최성수

선문대학교 자연과학대학 신소재과학과  
(1999년 6월 26일 접수)

### Laser micromachining of micron-size aperture for electron beam microcolumn application using the piezo Q-switched Nd:YAG laser

S. J. Ahn, D. W. Kim, H. S. Kim, and S. S. Choi

Department of Physics and Advanced Material Science, Sun Moon University  
(Received June 26, 1999)

**요 약** - Piezo 방법으로 Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용하여 Mo diaphragm을 미세가공하였다. 최근에 이르러 전자빔 리소그래피 분야와 portable 미니 scanning electron microscope (SEM) 분야에 소형화된 전자총 array의 적용이 폭넓게 조사되고 있다. 일반적으로 전자빔 장치제작 기술은 수차를 최소화하는데 있다. 본 연구에서는 piezo Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용하여 Mo diaphragm을 미세가공하여 20~30  $\mu\text{m}$ 의 aperture를 얻었다. Aperture의 정교함과 직경의 크기는 레이저 빔의 에너지, 펄스 폭, 빔의 spot 크기, 그리고 가공물질의 성질에 의존됨을 알았다.

**Abstract** - Experimental studies of laser micromachining on Mo diaphragm using piezo Q-switched Nd:YAG laser have been performed. Application of miniaturized microcolumn electron gun arrays as a potential electron beam lithography or portable mini-scanning electron microscope (SEM) application have recently extensively examined. The conventional microcolumn fabrication technique would give a limitation on the minimization of aberration. In this paper, we obtained 20~30  $\mu\text{m}$  aperture of laser micromachining on Mo diaphragm using piezo Q-switched Nd:YAG laser. The geometrical figures, such as the diameter and the preciseness of the drilled aperture are dependent upon the total energy of the laser pulse train, laser pulse width, and the diameter of laser spot in addition to the materials-dependent parameters.

## 1. 서 론

1968년 레이저를 이용하여 금속가공에 대한 연구가 시작된 이후 실리콘이나 세라믹에 대하여 미국, 일본, 독일 등을 중심으로 활발하게 연구가 진행되어 왔으며 특히 최근에는 많은 연구자들이 반도체 소자의 재료인 실리콘과 고온, 고강도용 재료 중의 하나인 세라믹 가공에 대하여 많은 관심을 가지고 있다. 그러나 이러한 특성에도 불구하고 가공이나 인성 등의 문제 때문에 현재 까지 실용화가 되지 못하고 있다. 기존의 기계적인 방법으로 실리콘이나 세라믹과 같은 물질을 가공하기 위해

서는 고가의 diamond tip과 고강도의 drill bit을 사용하여 하며 세라믹의 경우, 세라믹의 두께가 가공할 aperture의 직경보다 두껍게 되면 drill bit이 부러지기 쉬우며 stress로 인하여 세라믹의 가공부위에 금(crack)이 가거나 부서지는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 green state의 세라믹을 가공한 다음 세라믹을 소성 시키는데 이것 또한 가공부위가 변형되는 문제점이 있다 [1].

레이저를 이용하여 소재를 가공할 경우 기계적인 방법에 비해서 공정의 자동화가 용이하고, 공구의 소모가 없으며, 가공 외력이 전달되지 않기 때문에 단단하고 깨

지기 쉬운 물질을 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다. 특히 실리콘이나 세라믹과 같이 단단하고 견고한 물질을 가공할 때 금이 가는 문제가 발생하지 않으며, 가공물질과 직접 접촉하지 않으므로 가공과정에서 일어나는 오염문제를 피할 수 있다. 또 펄스형 레이저를 사용할 경우 열원(heat source)의 펄스 폭이 짧아서 열에 민감한 element를 보호할 수 있으며 가공할 때 에너지가 전달되는 부분이 매우 작기 때문에 가공물질의 distortion이나 shrink를 방지할 수 있는 등 많은 장점들을 가지고 있다 [2, 3]. 레이저 가공의 원리는 레이저 빔을 가공물질의 표면에 집속(focusing)시키면 레이저 빔의 일부가 가공물질에 흡수되어 여기상태의 전자들을 형성하고 여기된 전자들이  $10^{-11} \sim 10^{-13}$  sec의 짧은 시간동안 물질의 lattice phonon이나 다른 전자들과의 충돌에 의하여 열에너지로 변환된다 [4]. 이렇게 흡수된 열에너지가 물질의 용융점(melting point)이나 기화점(vaporization point)보다 클 때 상(phase)변화가 일어난다 [5].

일반적으로 레이저를 이용한 미세가공(micromachining)에는 파장이 10.6  $\mu\text{m}$ 인 CO<sub>2</sub> 레이저와 파장이 1.06  $\mu\text{m}$ 인 Nd:YAG (Nd<sup>+3</sup> doped yttrium aluminum garnet) 레이저가 많이 이용되는데, 세라믹은 ~10  $\mu\text{m}$ 의 파장영역에서 강한 흡수 분광선(spectrum)을 가지기 때문에 세라믹을 가공하기 위해서는 CO<sub>2</sub> 레이저가 Nd:YAG 레이저보다 더 적절하다. 반면 실리콘은 ~1  $\mu\text{m}$ 의 파장영역에서 강한 흡수 분광선을 가지므로 CO<sub>2</sub> 레이저보다 오히려 Nd:YAG 레이저가 더 유용하다(표 1참조). 그러나 aspect ratio(aperture를 가공할 경우 aperture의 깊이와 직경의 비)가 클 경우에는 세라믹이나 Mo과 같은 금속의 경우에도 radiation에 대한 흡수도는 떨어지지만 파장이 짧고 반복율 특성이 우수한 Nd:YAG 레이저가 더 유리하다.

따라서 본 연구에서는 TEM<sub>00</sub> 모드로 발진하는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 PZT(piezo electric transducer) 소

자를 이용하여 Q-switching한 다음, 초미니 전자빔 장치 개발에 필요한 전자렌즈를 제작하기 위한 micron-size의 aperture를 미세가공하였다.

## 2. 실험방법

레이저를 이용하여 실리콘이나 세라믹과 같은 비금속 물질을 가공할 때 가장 중요한 인자 중의 하나가 레이저의 펄스 폭과 에너지이다. 에너지가 크고 펄스 폭이 길게 되면 가공물질의 미세한 가공부위(spot)에 집속된 열이 가공될 부분의 인접된 영역까지 확산되어 가공부위의 인접영역에 thermal stress를 주게 된다. 확산된 열에 의한 thermal stress의 tangential 성분  $\sigma_\theta$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{r^2} \left( \int_a^r Tr \, dr - Tr^2 \right) \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 선형 열팽창계수,  $E$ 는 Young's modulus, 그리고  $a$ 는 레이저 spot의 반경이다 [6]. 따라서 짧은 펄스는 빛 에너지가 물체에 조사되는 시간이 짧기 때문에 긴 펄스보다 가공부위로 부터의 열확산 길이가 짧게되며 상대적으로 낮은 thermal stress를 주게 된다. Thermal stress의 크기는 온도 profile에 의존하므로 레이저를 이용한 실리콘이나 세라믹의 바람직한 가공조건은 주어진 가공물질의 덩어리를 제거할 수 있는 최소시간 동안 충분히 높은 레이저 빔 강도를 유지해야 한다. 그러므로 레이저 가공의 quality를 향상시키기 위해서는 펄스 폭이 짧은 고풍력 레이저가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 펄스 폭이 짧은 고풍력의 레이저 빔을 얻기 위하여 레이저 공진기의 전반사경을 PZT에 부착하여 수 Hz로 진동시켜서 최대 반복율이 25 Hz인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 Q-Switching하였다. Piezo Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스 폭은 ~150 ns이며 peak power는 ~67

표 1. List of the lasers used for material removal applications.

Lasers	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Typical applications
Nd:YAG (pulsed)	1.06 and 0.532	Hole drilling, marking
Nd:YAG (Q-switched)	1.06 and 0.532	Trimming, thin film removal
CO <sub>2</sub> (pulsed)	10.6	Cutting, hole drilling
CO <sub>2</sub> (TEA)	10.6	Balancing
Excimer	0.19-0.35	Marking, semiconductor processing
Ruby	0.6943	Drilling
Nd:glass	1.06	Drilling

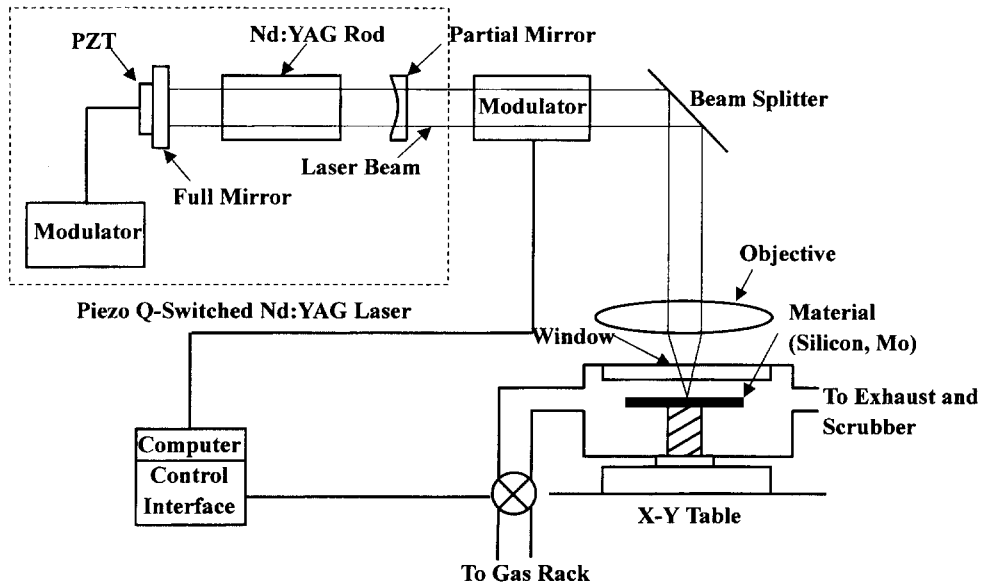


그림 1. Schematic diagram of the laser micromachining set-up.

kW 까지의 출력을 얻을 수 있었다. PZT를 동작시키지 않을 경우 레이저의 펄스 폭이 200  $\mu$ s로 펄스당 에너지가 같다면 레이저의 peak power는 50 W가 된다.

그림 1은 레이저 미세가공을 위한 실험장치도이다. Mo diaphragm에 대한 가공조건을 최적화하기 위하여 에너지를 5~10 mJ/pulse까지 변화시키며 modulator (빔 확대기, aperture, pinhole 등)를 사용하여 레이저 빔의 quality를 개선하였다. Piezo Q-switched Nd:YAG 레이저 펄스를 배율이 10 배인 빔 확대기를 사용하여 레이저 빔의 spot 크기를 확대하였다. 빔 단절기 (beam splitter)와 프리즘을 사용하여 x-y stage 위에 놓여있는 가공물질에 레이저 빔을 정렬한 다음 초점거리가 10 cm인 볼록렌즈로 집속시켰다. 집속된 레이저 빔의 spot 크기는 직경이 ~10  $\mu$ m, 펄스당 에너지는 ~10 mJ이다.

본 실험에서는 펄스 폭이 200  $\mu$ s (Q-switching을 하지 않은 경우), 150 ns (Q-switching을 한 경우)인 레이저를 이용하여 두께가 320  $\mu$ m인 Mo 강판에 micron-size의 aperture를 가공하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Micron-size의 미세한 aperture를 가공하기 위해서는 열전도도, 녹는점, 끓는점 등과 같은 가공물질의 물성과 레이저 펄스 폭, 빔 spot의 크기와 같은 레이저의 인자

들을 고려해야 한다. 강한 강도의 레이저 빔이 물질의 표면에서 서로 상호작용하여 플라즈마를 형성하기 위해서는  $\sim 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>의 강도가 필요하며 이를 위하여 레이저 빔의 spot 크기를 가능한 작게 집속해야 한다 [7,8]. 모드가 TEM<sub>00</sub>인 레이저 빔의 강도분포를 Gaussian으로 가정할 때, 집속된 레이저 빔의 spot 크기  $r_s$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_s = \frac{\lambda f}{\pi d} \tag{2}$$

여기서  $d$ 는 집속렌즈에 입사하는 레이저 빔의 직경,  $f$ 는 집속렌즈의 초점거리이고  $\lambda$ 는 레이저 빔의 파장으로 1.06  $\mu$ m이다. 그림 2는 가공물질의 표면에 집속된 레이저 빔의 직경과 집속렌즈에 입사한 레이저 빔의 직경사이

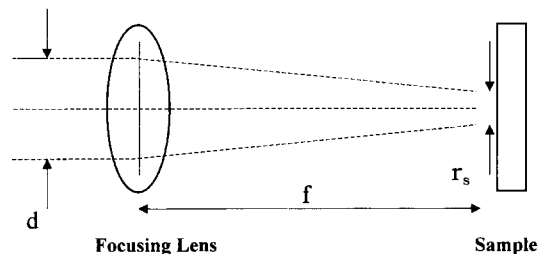


그림 2. The diameter of the focused laser beam at sample surface with relation to beam diameter at lens.

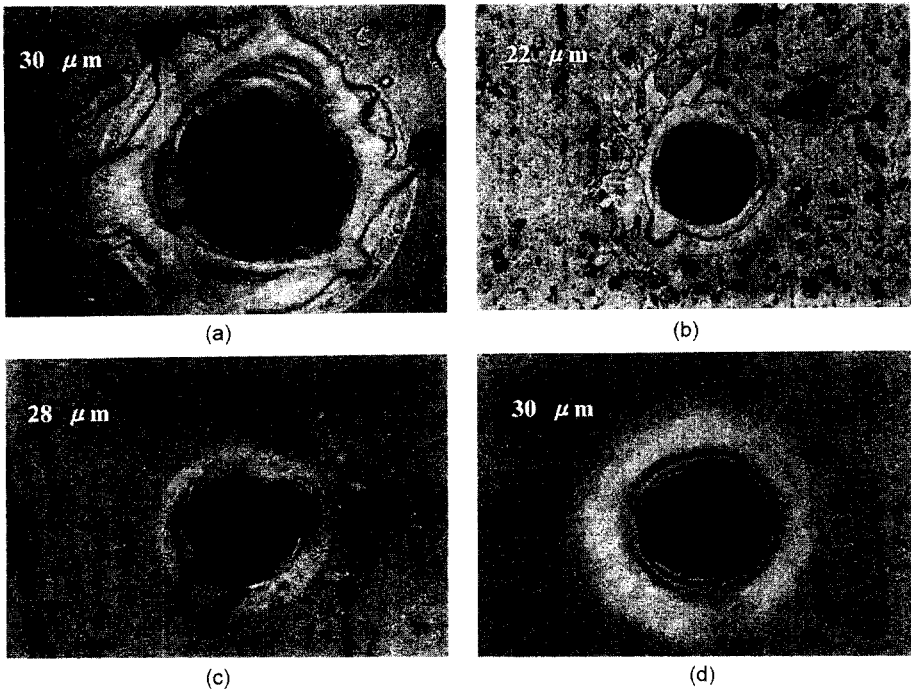


그림 3. Picture (a) and (b) are optical microscopic photographs of the apertures fabricated by the pulsed Nd:YAG laser with 200  $\mu$ s pulse width. Picture (c) and (d) are optical microscopic photographs of the apertures fabricated by the piezo Q-switched Nd:YAG laser with 150 ns pulse width.

의 상관관계를 보여준다. 따라서 집속된 레이저 빔의 spot 크기를 작게 하기 위해서는 집속렌즈에 입사하는 레이저 빔의 직경  $d$ 를 크게 해야한다.

본 실험에서는 10배의 빔 확대기와 초점거리가 10 cm인 집속렌즈를 사용하여 레이저 빔을 직경이  $\sim 10 \mu$ m spot으로 집속시켰다. 펄스당 에너지가  $\sim 10$  mJ일 때, Q-switching을 하지 않은 경우 (200  $\mu$ s) 레이저 빔의 강도는  $\sim 6.4 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>이고 PZT를 사용하여 Q-switching을 한 경우(150 ns)에는 레이저 빔의 강도가  $\sim 8.5 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>로서 Q-switching을 한 레이저 빔은 가공물질인 Mo을 녹이기보다 Mo diaphragm의 표면에 플라즈마를 형성하여 기화를 시키기 때문에 가공 부위가 Q-switching을 하지 않은 레이저를 이용하여 가공했을 때 보다 훨씬 정교하게 된다. 그림 3은 펄스형 Nd:YAG 레이저를 Q-switching을 하지 않은 경우와 PZT를 사용하여 Q-switching을 한 경우에 대하여 두께가 320  $\mu$ m인 Mo diaphragm을 미세가공한 다음 현미경으로 관찰한 것이다. 레이저의 에너지는 40 mJ/10 pulses과 60 mJ/10 pulses로 고정하였다. 그림 3(a), (b)는 Q-switching을 하

지 않고 가공한 것인데 펄스 열의 에너지가 60 mJ일 때 aperture의 크기가 30  $\mu$ m, 40 mJ일 때 22  $\mu$ m로 가공부위가 용융되어 제거된 것을 볼 수 있다. 이 경우에는 레이저의 펄스 폭이 길기 때문에 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용은 기화작용보다 용융작용이 우세하게 된다. 반면에 그림 3(c), (d)는 Q-switching을 한 레이저로 가공한 것인데 펄스 열의 에너지가 60 mJ일 때 aperture의 크기가 28  $\mu$ m, 40 mJ일 때 30  $\mu$ m로 가공부위가 (a), (b)의 경우보다 정교하고 용융된 흔적이 훨씬 적음을 알 수 있다. 이 경우에는 레이저의 펄스 폭이 짧기 때문에 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용은 용융작용보다 기화작용이 더 우세하게 된다. 펄스 에너지는 40 mJ일 경우가 60 mJ일 경우보다 가공부위가 더 깨끗하였다. 그러나 레이저 빔의 강도가 낮게되면 단위면적당 레이저 빔의 강도가 약해져 기화작용보다 용융작용이 더 우세해지며 가공속도도 현저히 저하되는 단점이 있다.

본 연구에서는 TEM<sub>00</sub> 모드로 발진하는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 piezo 방법으로 Q-switching한 다음, 초

미니 전자빔 장치개발에 필요한 전자렌즈를 [9] 제작하기 위하여 두께가 320  $\mu\text{m}$ 인 Mo diaphragm을 가공하여 20~30  $\mu\text{m}$ 의 aperture를 얻었다.

#### 4. 결 론

박막의 증착, PR(Photoresist), etching 등과 같은 반도체 공정을 사용하면 정교한 micron-size의 aperture를 얻을 수 있다. 그러나 반도체 장비가 고가이기 때문에 제조 단가가 비싸고 공정이 복잡한 단점이 있다. 반면에 레이저를 이용한 소재의 가공은 기계적인 가공방법에 비해서 공정의 자동화가 용이하고, 공구의 소모가 없으며, 가공 외력이 전달되지 않기 때문에 단단하고 깨지기 쉬운 물질을 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다. 특히 극초단 레이저에 의한 미세가공은 열원의 펄스 폭이 짧아서 열에 민감한 element를 보호할 수 있으며 가공할 때 에너지가 전달되는 부분이 매우 작기 때문에 가공물질의 distortion이나 shrink를 방지할 수 있는 등 많은 장점들을 가지고 있다.

본 실험에서는 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용으로 물질의 표면에 플라즈마를 형성하기 위하여 최대 반복율이 25 Hz, 펄스 폭이 200  $\mu\text{s}$ 인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 PZT를 사용하여 Q-switching하였다. Piezo Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스 폭은 150 ns이고 펄스당 에너지를  $\sim 10$  mJ로 레이저를 동작하였을 때  $\sim 8.5 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>의 레이저 빔 강도를 얻을 수 있었으며, 이와 같은 조건에서는 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용시 용융작용보다 기화작용이 더 우세하게 된다. 레이저를 40 mJ/10 pulses, 60 mJ/10 pulses로 동작시킨 다음 두께가 320  $\mu\text{m}$ 인 Mo diaphragm을 가공하여 20~30  $\mu\text{m}$ 의 aperture를 얻었다. 레이저를 Q-switching한 경우가 Q-switching을 하지 않고 가공한 경우보다 정교하고 용융된 흔적이 훨씬 적음을 알 수 있다.

따라서 레이저에 의한 미세가공은 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용이 용융작용보다 기화작용이 더 우세할 경우 가공부위가 더욱 정교하게 되므로 레이저의 펄스 폭이 짧은 mode-locked 레이저(펄스 폭이  $\sim 100$  ps)나

chirped-pulse amplification(CPA) 기술에 [10, 11] 의한 극초단 펄스(펄스 폭이 수 백 fs)를 레이저 미세가공의 광원으로 사용한다면 submicron-size의 미세한 aperture도 가공이 가능할 것으로 생각되며 박막가공에 극초단 펄스의 레이저를 이용한다면 반응시간이 짧기 때문에 substrate의 손상을 최소화시킬 수 있으므로 실리콘 웨이퍼 위에 식각되어 있는 다이오드, 트랜지스터, 축전기 등과 같은 개별소자들을 전기적으로 분리시키는데 유용한 tool로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부 반도체분야 학술연구조성비(ISRC 98-E-4309)와 한국과학재단(KOSEF 96-0702-06-01-3)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] J. F. Ready, Industrial Application of Lasers, Academic Press, p. 394 (1997).
- [2] H. Beyer, W. Ross, R. Rudolph, A. Michaelis, J. Uhlenbusch, and W. Viol, J. Appl. Phys. **70**, 75 (1991).
- [3] V. Oliveira and R. Vilar, J. Mater. Res. **12**, 3206 (1997).
- [4] Y. Arata and I. Miyamoto, Laser Focus **3**, (1977).
- [5] X. Liu, D. Du, and G. Mourou, IEEE. J. of Quantum Electronics **QE-33**, 1706 (1997).
- [6] S. S. Charschan, Laser in Industry, Van Nostrand Reinhold Company, p. 256 (1972).
- [7] U. C. Paek and F. P. Gagliano, IEEE. J. of Quantum Electronics **QE-8**, 112 (1972).
- [8] D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier, and G. Mourou, Appl. Phys. Lett. **64**, 3071 (1994).
- [9] J. Y. Park, J. D. Lera, M. A. Yakshin, S. S. Choi, Y. Lee, J. D. Lee, K. J. Chun, D. Jeon, and Y. Kuk, J. Vac. Sci. Technol., to be published.
- [10] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **56**, 219 (1985).
- [11] S. J. Ahn and H. W. Kwak, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L789 (1998).