

극초단펄스 레이저에 의한 크롬박막 미세가공

김재구, 신보성, 장원석, 최지연, 장정원(한국기계연구원)

Ablation of Cr Thin Film on Glass Using Ultrashort Pulse Laser

J. G. Kim, B. S. Shin, W. S. Chang, J. Y. Choi, J. W. Chang(Korea Institute of Machinery & Materials)

ABSTRACT

The material processing by using ultrashort pulse laser, in recently, is actively applying into the micro machining and nano-machining technology since ultrashort pulse has so faster than the time which the electrons energy absorbing photon energy is transmitted to surrounding lattice-phonon that it has many advantages in point of machining. The micro machining of metallic thin film on the plain glass is widely used in the fields such as mask repairing for semiconductor, fabrication of photonic crystal, MEMS devices and data storage devices. Therefore, it is important to secure the machining technology of the sub-micron size. In this research, we set up the machining system by using ultrashort pulse laser and conduct on the Cr 200nm thin film ablation experiments of spot and line with the variables such as energy, pulse number, speed, and so on. And we observed the characteristics of surrounding heat-affected zone and by-products appeared in critical energy density and higher energy density through SEM, and also examined the machining features between in He gas atmosphere which make pulse change minimized by nonlinear effect and in the air. Finally, the pit size of 0.8 μ m diameter and the line width of 1 μ m could be obtained.

Key Words : Ultrashort laser(극초단펄스 레이저), Cr thin film(크롬 박막), Ablation(어블레이션), Micromachining(미세가공)

1. 서론

극초단펄스 레이저에 의한 재료가공은 최근 들어 상대적으로 긴 펄스레이저에 비해 가공측면에서 우수한 장점이 있어 마이크로머시닝 가공기술 및 더 나아가 나노머시닝 가공기술에 대한 연구가 빽 특성과 가공현상을 고려하여 활발히 진행되고 있다.^[1-4] 일반적으로 레이저에 의한 재료 가공의 원리는 광 에너지가 전자에 의해 흡수되고, 이 에너지는 주변의 레티스, 포논에 전달하게 되어 열에너지로 변환되어 용융, 증발이 일어나 재료가 가공된다. 이 때 열에너지는 주변으로 열확산시간(수 피코초(10^{-12} sec)대)동안 전달된다. 때문에 가공주위의 경계면은 열에 의한 용융부가 형성되고, 재결정층도 발생하며 가공재료내부로도 전달이 되어 광 에너지의 효율이 떨어진다. 반면 극초단펄스(수백 펨토초(10^{-15} sec) 이하) 레이저에 의한 가공은 열 확산시간보다도 짧은 시간 동안 레이저가 재료에 조사되기 때문

에 열전도는 무시할 수 있고, 재료 제거율은 자외선레이저에 의한 폴리머 가공과 같은 형태로 기술될 수 있다. 주변의 열 영향영역에 대해서는 S. valette^[5]등이 ns 와 fs 의 영역에서 금속재료에 대해 해석한 결과 fs 의 가공이 약 6-23 배정도의 감소를 가져왔다고 하였다. 이처럼 열 영향이 최소화되기 때문에 가공품질이 우수하고, 첩두 출력이 매우 크므로 광학적 회절한계 이하의 크기를 가공할 수 있는 장점이 있다.

금속 박막의 극미세 가공은 반도체용 마스크의 리페어링, 포토닉 크리스탈 및 마이크로옵티컬 디바이스 및 데이터 저장장치 등 많은 분야에서 폭넓게 사용되므로 서브미크론 이하의 가공기술 확보가 중요하다.

본 가공실험은 금속박막에 점, 선의 형상을 극초단펄스 레이저를 이용하여 가공하고 그 특징을 전자주사현미경(SEM)을 통하여 검토 분석하는데 주요점을 두었다.

2. 가공 실험 장치 및 방법

본 미세 가공에 사용된 레이저는 약 220fs의 펄스폭을 갖는 레이저로 출력은 500mW(100KHz), 파장 800nm 이다. 시편에 입사되는 출력을 변화하기 위해 ND 필터를 사용하였고, 시편을 이송하기 위한 이송계로는 위치정밀도 $\pm 1\mu\text{m}/25\text{mm}$, 반복도 $0.25\mu\text{m}$ 를 가진 DC 리니어 X, Y 이송 축과 포커싱을 맞추기 위한 Z 축으로는 펄스당 $0.1\mu\text{m}$ 를 움직일 수 있는 Stepping 모터를 사용하였다. 시편의 움직일 때 위치 오차가 $1\mu\text{m}$ 이내로 들도록 PID 게인을 적절히 조정하였다. 시편은 진공에 의해 압착되어 이송시 및 보조가스 사용시에도 흔들리지 않도록 하였고, 정확한 펄스 수와 반복율은 펄스발생기에 의해 외부에서 입력 가능하도록 하였으며 이러한 동작은 PC 에서 모션과 더불어 동기화 할 수 있도록 프로그래밍하였다.

시편에 빔의 반경방향으로 균일한 출력분포가 이루어지도록 조리개를 사용하면서 빔 프로파일러에 의해 관찰하였으며, 대물렌즈를 통과한 빔의 출력이 최대가 되도록 빔을 정렬 하였다. 시편에 입사된 빔의 형상과 구성된 시스템의 레이아웃은 Fig. 1 과 같고 사용된 대물렌즈는 IR 용 x100(NA 0.8) 이었다.

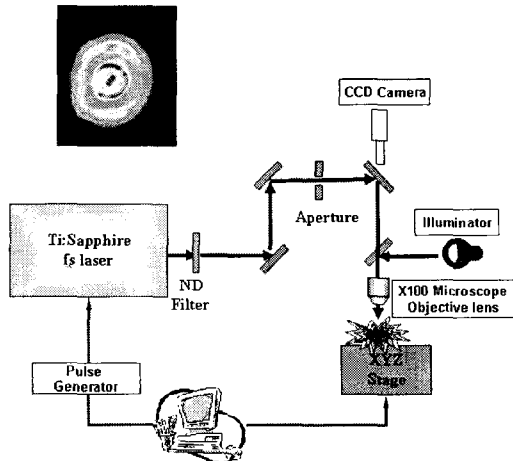


Fig. 1 System layout of the ultrashort pulse laser micromachining

실험에 사용된 크롬 박막은 스퍼터링에 의해 유리기판 위에 약 200nm 두께로 크롬박막을 증착한 것이며 크롬의 주요 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Properties of Cr material

Structure	Body-centered Cubic
Lattice Constant	0.29nm
Atomic Radius	0.166nm
Electron Configuration	[Ar]3d ⁵ 4s ¹
Melting/Boiling Temp.	1857°C / 2672°C
Latent Heat of Fusion/Evaporation	260J/g / 6580J/g
Thermal Conductivity	94W/m · K
Specific Heat at 25°C	518J/kg · K

3. 실험 내용 및 고찰

점 가공은 레이저빔의 출력이 재료 어블레이션 임계값보다 높으면 일어나며 출력을 조절함에 가공 크기를 어느 정도 조절할 수 있다.

실험은 출력, 펄스 수를 변수로 하여 Z 축 위치를 달리하면서 CCD 에 결상 되는 이미지와 레이저의 초점간의 위치를 실험적으로 파악하였다.

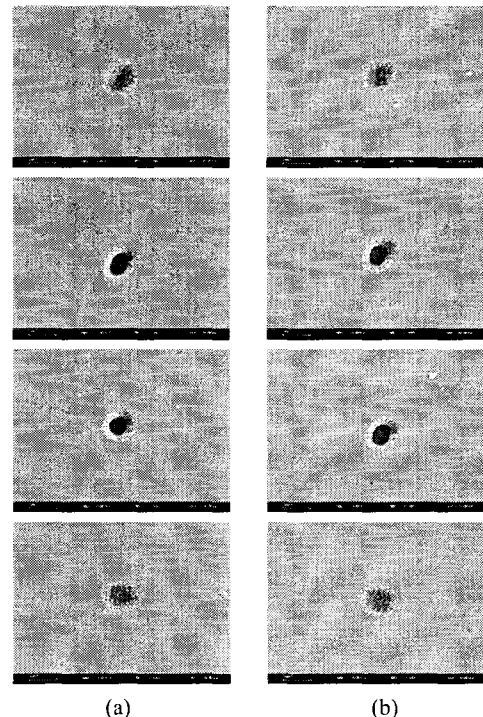


Fig. 2 SEM image of different focal position varying $1\mu\text{m}$ from top to bottom and assist gas with 3.2nJ and 5 pulses at 100kHz (a) He (b) No gases

그 결과로 Fig. 2 와 같이 1 μ m 정도의 DOF (Depth of Focus)를 가져 이론적인 값 $\pm 0.46\mu$ m 과 큰 차이가 없었으며 레이저의 정확한 초점위치에 시편을 놓는 것이 중요함을 말해준다. 보조가스로서의 역할이 He 이나 압축 공기 또 보조가스가 없는 것과의 차이가 없는 걸로 보였다. 하지만 렌즈의 보화를 위해 실험 중에는 항상 압축공기를 보조가스로서 사용하였다.

가공 치수를 좀 더 작고 열 영향에 의한 용착 영역을 최소화하여 깨끗하게 가공하기 위한 조건 검토는 Fig. 3 으로 설명 할 수 있다.

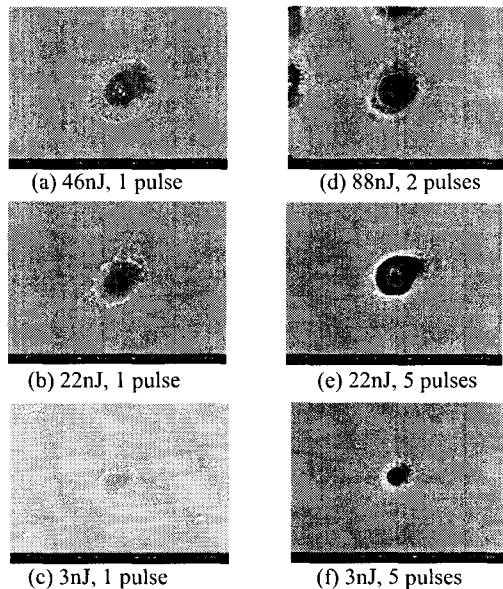


Fig. 3 SEM image of pits of the indicated condition

Fig. 3 을 보면 펄스당 에너지가 작아짐에 따라 가공되어지는 크기가 작아짐을 확인 할 수 있으며, 가공 형태에 따라 3 영역(어블레이션 영역, 용착 영역, 전체크기)으로 나누어 정량화한 측정 수치는 Table 2 와 같다. 입사 빔이 가우시안의 펄스 형태를 갖는다면 빔의 출력에 따른 직경 변화는 다음 식으로 표현된다.

$$d = d_0 \left(\ln \frac{E}{E_{th}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

어블레이션 되는 직경이 3 가지의 형태를 보이는 것은 빔의 공간적 출력 형상이 달라 재료의 변형 임계값에 따른 현상이며, 그 영향은 출력이 클수록 커져 최종적인 어블레이션 크기에 영향을 미친다.

Table 2 Comparison of measured data (μ m)

	1 pulse			5pulses		
	O _d	M _w	A _d	O _d	M _w	A _d
46nJ	2.5	0.5	1.25	3.4*	0.8*	1.75*
22nJ	2.1	0.42	0.83	2.54	0.45	1.5
3nJ	1.0	-	-	1.2	-	0.8

T_d : Overall diameter, M_w : Melted width A_d : Ablated diameter, * : 82nJ 2Pulses

또한 Fig. 2(b)에서와 같이 1 펄스에 의해 가공이 되지 않았다 하더라도 펄스의 중첩에 따라 기판으로 사용된 유리의 용융온도까지 올라가 가공이 되어짐을 알 수 있다. 전체적으로 보면 출력이 클수록 어블레이션 되는 영역이 커지고, 또한 용융 후 다시 고화되는 영역 및 스패터(spatter) 되는 영역도 커짐을 알 수 있다. 하지만 펄스 수를 증가함에 따라 펄스 중첩에 의한 효과로 고출력에서는 스패터 없이 전체 직경이 커지고 용융 후 고화되는 영역도 커짐을 알 수 있고 어느 출력 값 정도에서는 용융 후 고화되는 영역 없이 가공이 되었으며 그 값은 약 3nJ 정도 이었다. 또한 5 펄스 후의 어블레이션 크기는 1 펄스에 비해 약 1.2 배 커짐을 확인 하였다. 따라서 고품질의 서브마이크로 형상의 크롬박막을 어블레이션 하기 위해서는 3nJ 에 의한 다중 펄스가 효과적이다.

점 가공한 실험에 의한 결과를 토대로 하여 직선 가공을 속도에 따라, 출력에 따라 시도한 결과 다음 Fig. 4 와 같은 특징을 보였다. 일반적인 가공 양상과는 달리 속도가 빠른 조건에서 어블레이션이 깨끗하게 일어남을 확인하였다. 0.1mm/sec 의 경우는 빔 직경을 1 μ m 로 할 경우 1000 개의 펄스가 1mm/sec 의 경우 100 개, 10mm/sec 의 경우 10 개의 펄스가 중첩되는 효과이다. 듀티비가 약 22×10^{-9} 정도 이지만 속도가 느린 0.1mm/sec 의 경우에는 입사 출력 3nJ 일 때의 용융영역이 거의 없다고는 하지만 1mm 간격으로 펄스가 입사되는 것이 incubation 에 의해 용융이 생성되고 이 용융물들 간의 인력에 의해 고화된 것으로 보이거나 좀 더 자세한 메커니즘에 대해서는 계속 연구 중에 있다. 실험적인 결과로 보면 고정상태에서 3nJ 의 5 펄스에 비해 이송중의 10 개 펄스 중첩의 가공이 제대로 일어나지 않고 잔유물들이 남아 있음을 확인 하였으며, 펄스 중첩이 증가할수록 그 현상은 더욱 두드러졌다. 펄스 에너지가 낮고, 속도가 10mm/sec 로 빠른 경우는 열의 영향을 전혀 보이지 않고 박막의 표면만 살짝 그루빙(grooving) 하는 현상을 보였다.

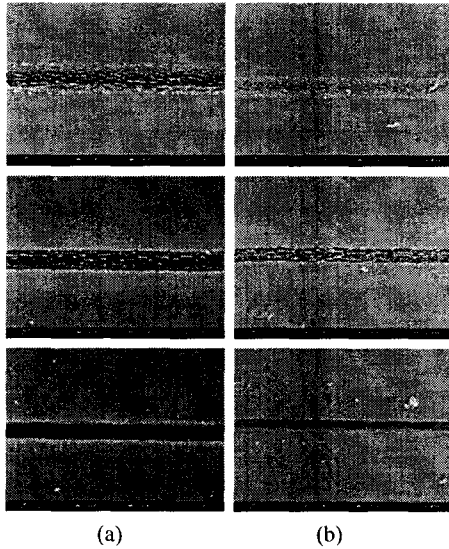


Fig. 4 SEM image of line ablation during moving sample with the speed of 0.1mm/sec, 1mm/sec and 10mm/sec from the top at the energy of (a) 4.7nJ (b) 1.6nJ Width : (a) 1.37 μ m, 1.2 μ m, 1.0 μ m (b) 1.0 μ m, 0.75 μ m, 0.62 μ m

또한 출력을 더욱 증가시키고 속도를 빠르게 하는 것도 직선 가공의 방법일 수 있지만 이 경우는 이송의 가속 및 감속의 영향에 따라 위치오차가 커지며 결과적으로 불균일한 어블레이션을 가져와 바람직하지 못하다. 결국, 직선의 깨끗한 어블레이션 조건은 정지상태의 가공과는 달라 높은 출력이 요구되며 많은 증첩의 효과가 어블레이션에 오히려 좋지 않음을 보였다.

한편, 일반적으로 열 확산에 의한 열 영향의 효과는 적절한 가공 조건을 선정하면 점 및 직선의 어블레이션시 ns 펄스 폭을 갖는 레이저에 비해 현저히 감소되어 무시할 수 있음을 보였다.

4. 결론

극초단펄스 레이저에 의한 200nm 두께의 크롬 박막에 대해 가공실험을 한 결과 기판이 손상되지 않는 서브마이크로 형상의 점 가공을 위해서는 정확한 초점 위치와 3nJ 이상의 에너지가 필요하다. 용융영역을 최소화하기 위해서는 높은 에너지보다 임계에너지보다 조금 높은 에너지에서 펄스 수를 증가시키면 유리함을 알 수 있었고 0.8 μ m 직경의 점 가공 결과를 얻었다. 또한 직선 가공에 있어서는 정지상태의 점 가공과는 양상이 달라 점 가공보다 높은 에너지에서 펄스 증첩을 적게 하는 것이

고품질의 어블레이션을 할 수 있으며 1 μ m의 선폭을 갖는 직선을 가공할 수 있었다. 또한 보조가스를 사용하는 것이 렌즈의 수명이나 일정한 파워를 유지하기 위해서는 필요하지만 가공후의 주변이 debris에 의해 깨끗하지 못한 표면 상태를 보여 이의 해결이 중요하다.

참고문헌

1. S. Ameer-Beg, et al, "Femtosecond Laser Microstructuring of Materials," Applied Surface Science 127-129, pp. 875 - 880, 1998.
2. B. N. Chichkov, et al, "Femtosecond Laser Ablation and Nanostructuring," High Power Laser Ablation IV, pp. 19-24, 2002.
3. A. Rosenfeld, et al, "Ultrashort-laser-pulse Damage Threshold of Transparent Materials and the Role of Incubation," Appl. Phys. A, Vol. 69, pp. s373 - s376, 1999.
4. S. Nolte, et al, "Polarization effects in Ultrashort-pulse Laser Drilling," Appl. Phys. A, Vol. 68, pp. 563 - 567, 1998.
5. S. Valette, et al, "Modeling Thermal Effects Produced by Nanosecond and Femtosecond Laser Pulses Applied to Metals," ICALAO 2002