

연구논문

펨토초 레이저에 의한 크롬박막 미세 회절패턴 제작

Diffractive patterning on Cr thin film using femtosecond laser pulses

김재구*, 조성학*, 장원석*, 나석주**, 황경현*

*한국기계연구원, **한국과학기술원 기계공학과

Jaegu Kim*, Sunghak Cho*, Wonseok Chang*, Suck-Joo Na**, Kyunghyun Whang*

*Korea Institute of Machinery and Materials, **Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, we suggested the femtosecond laser processing using the mask which makes Gaussian spatial beam distribution to a normalized distribution by Fresnel diffraction. Holography pattern of the size of $320 \times 320 \mu\text{m}^2$ on the Cr thin film on glass substrate with a pixel size of $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ was fabricated according to the pattern generated by the iterative Fourier transform algorithm (IFTA) algorithm. We analysed the damage threshold with an assumption the power distribution as Gaussian profile as 45 mJ/cm^2 . The regenerated image of letters through the diffractive pattern was well recognized at the screen.

Key word : Femtosecond Laser, Holography pattern, Thin film ablation

1. 서론

펨토초 레이저에 의한 재료가공은 최근 들어 상대적으로 긴 펄스레이저에 비해 가공측면에서 우수한 장점이 있어 마이크로머시닝 가공기술 및 더 나아가 나노머시닝 가공기술에 대한 연구가 빡특성과 가공현상을 고려하여 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾. 일반적으로 레이저에 의한 금속의 재료 가공의 원리는 광 에너지가 재료에 흡수되어 열적인 반응에 의해 용융, 증발이 일어나 재료의 제거가 일어난다. 펨토초 레이저의 경우 펄스폭이 매우 짧음으로 인해 전자의 여기에만 레이저 에너지가 전달되기 때문에 용융과정에도 계속 레이저 에너지가 입사되는 나노초 펄스폭을 갖는 레이저에 비해 열적 영향이 매우 적어 홀로그래피제작^{4,6)}을 비롯해 미세 가공을 요하는 산업적 응용에 적합한 도구로 많이 사용된다.

본 가공실험은 열영향을 최소화 할 수 있는 펨토초 레이저와 마스크를 사용하고, 액정 공간빔조정기(Liquid Crystal Spatial Light Modulator) 등⁴⁾ 다른 부가적인 장치 없이 이미지 가공방식을 통해 금속박막 기판상에 미세 홀로그래피 패터닝을 수행하여 가공 특성 및 회절 특성을 관찰하였다.

2. 실험방법

본 패터닝가공 실험에 사용된 레이저는 Fig. 1(a)와 같이 중심파장 800 nm, 펄스폭 230 fs, 반복주기 100 kHz인 Chirped-Pulse-Amplification (CPA) Ti:sapphire 레이저를 사용하였고, 선형적으로 편광 되어 있으며 TEM₀₀ 출력밀도 분포를 갖고 있다. 집광에 사용된 대물렌즈는 x 20 (NA 0.4)를 사용하였고 빔 경로중간에 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 의

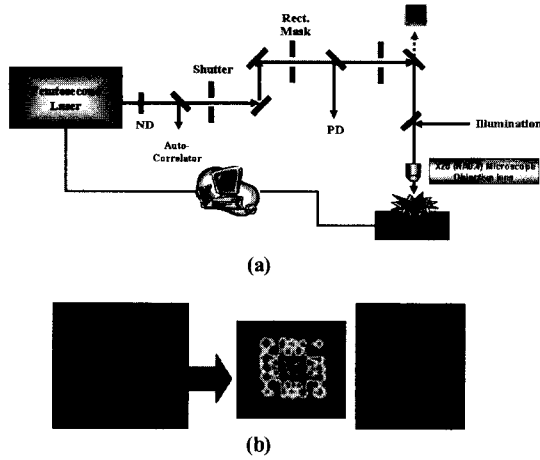


Fig. 1 Experimental setup (a) and modification of Gaussian beam profile (b).

사각형 마스크를 설치하여 프레넬 회절에 의해 가우시안의 빔 집중도를 완화시켰으며 변화된 모습을 빔모드 측정기로 측정한 형상을 Fig. 1 (b)에 나타내었다. 펄스 수의 조절은 1 ms 응답을 갖는 빔 셔터를 이용하여 구동부와 동기화 하였다.

홀로그래프의 제작 방식은 컴퓨터 출현과 더불어 1960년대 중반에 제시된 고속 유리에 변환을 이용한 컴퓨터 생성 홀로그래프 (CGH: Computer Generated Hologram) 이란 이름으로 발전하였다. 이를 이용한 회절패턴 생성은 64 x 64 픽셀크기의 내부에 KIMM과 NANO란 글자를 중간 위 부분에 생성하고 IFTA를 이용하였다. 원하는 영상 정보를 복원하기 위해서는 상의 세기정보로부터 직접 결정되는 진폭 이외에도 적절한 위상 값을 찾는 것이 필요한데 IFTA는 이를 위해 반복 과정을 통해 각 위치의 최적 위상 값을 결정하도록 하는 방법이다⁷⁾. 이를 반복적으로 수행하면서 재생영상과 원래 영상 간의 복원효율이 허용치 보다 낮게 되면 이 때 결정된 위상값을 이진화 하고, 이를 레이저와 동기된 구동프로그램으로 변환하여 용융실리카 기판 위에 200 nm 두께로 크롬 박막이 형성되어 있는 시편에 패턴닝 하였다. 원래의 형상, IFTA를 통해 얻어진 형상, 원래의 영상과 복원 영상과의 오차 그리고 컴퓨터로 복원된 영상을 Fig. 2에 나타내었다. 또한 Fig. 2 (d)에서 보는 바와 같이 최적 위상값을 얻기 위해 반복하는 과정은

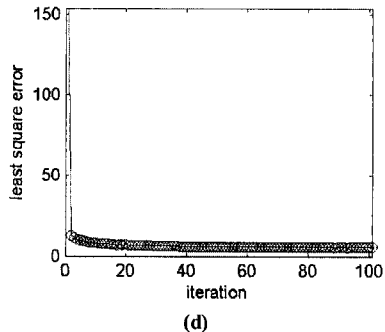
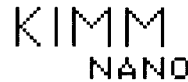
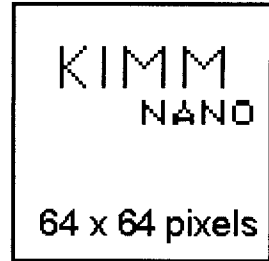


Fig. 2 (a) Raw image of 64 × 64 pixels, (b) diffracted pattern generated by IFTA, (c) reconstruction, and (d) least square error between (a) and (c).

초기 수회정도만 반복하여도 오차가 상당히 감소되는 양상을 보였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험은 사각형 마스크를 이용하여 그 형상을 패터닝 하는 것이므로 사각형 형상의 이미지 위치를 찾는 것이 중요하다. 이미지 위치는 Fig. 3 (a)와 같이 마스크와 렌즈의 주요면 사이의 거리를 o , 렌즈의 주요면에서 마스크의 상이 형성되는 곳까지의 거리를 i , 렌즈의 초점거리를 f 라 하면 이들 사이의 관계는 $1/o+1/i=1/f$ 를 갖는다. NA 0.4 의 경우 DOF(Depth of Focus)를 에너지 밀도의 90 %라 정의하면 약 $3.74 \mu\text{m}$ 라 할 수 있다. 따라서 시편의 위치를 $1 \mu\text{m}$ 씩 상하로 움직이며 사각형 패턴이 잘 형성되는 부근을 정하였는데 그 위치는 초점위치에서 약 $15 \mu\text{m}$ 정도 대물렌즈에서 멀어지는 곳으로 하였다. 빔이 집속된 초점위치라 보여지는 곳에서의 가공된 주사전자현미경 사진과 이미지 위치에서 가공된 사진의 예를 Fig. 3 (b)에 나타내었다.

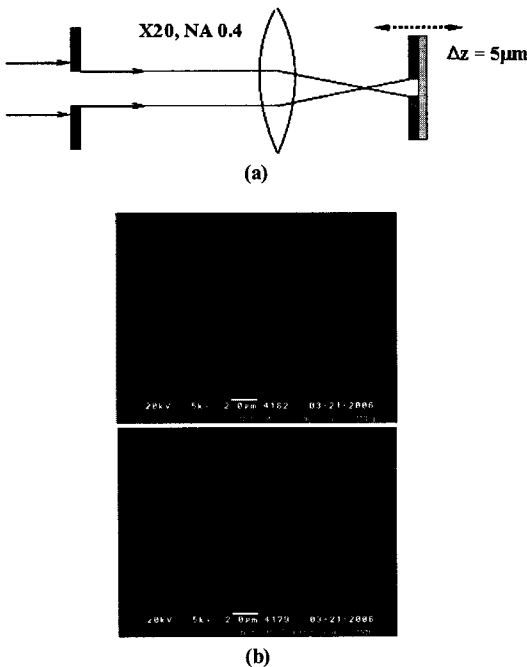


Fig. 3 Schematic diagram for machining at image position (a) and comparison of ablated area at focal position and image position (b).

임계에너지 밀도를 구하기 위해서는 빔의 면적을 정하는 것이 중요하므로 빔의 크기 변화가 가우

시안 변화를 따른다고 가정하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

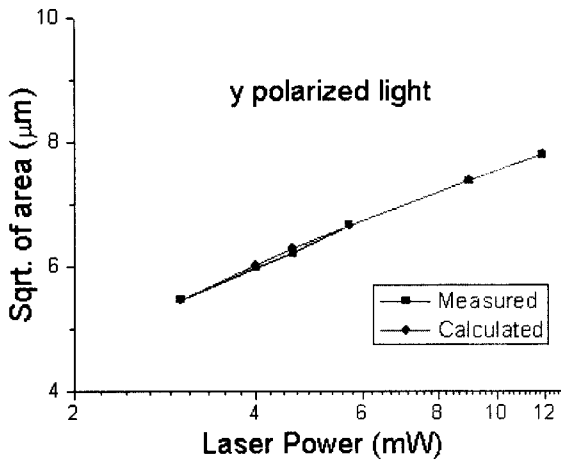
$$P_c = \exp \left(\frac{\ln P_2 - \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \ln P_1}{1 - \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2} \right),$$

$$w = \frac{r_1}{\sqrt{2 \ln \frac{P_1}{P_c}}} \tag{1}$$

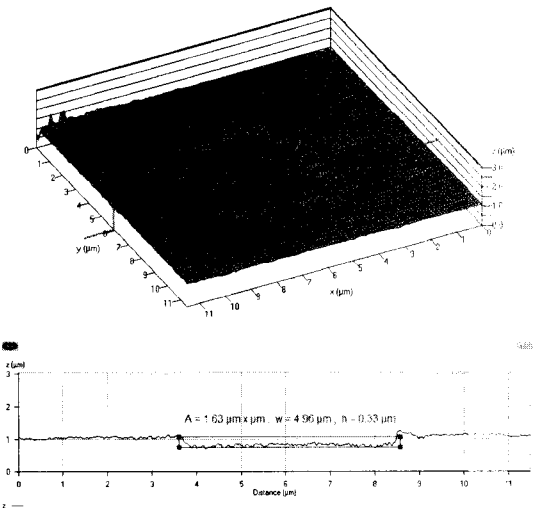
여기서 P_c 는 재료 가공의 임계 출력, w 은 입사빔 제공근길이, r 는 손상면적의 제공근 길이이고 하첨자 1, 2, ..는 레이저 조건에 따른 식별자이다. 입사빔 제공근 길이는 가공된 형상이 사각형이므로 원형의 빔에서 사용하는 직경대신 실험에서 구해진 사각형 면적을 제공근하여 입사빔 크기로 정하였다. 위 식은 P_1 출력의 조건에서 가공된 면적을 측정하여 유도된 제공근 길이 r_1 와 P_2 출력의 조건에서 구해진 r_2 에 의해 임계 출력 P_c 를 구할 수 있고, 구해진 P_c 를 이용해 입사빔 제공근 길이 w 를 구할 수 있음을 나타내는 식이다.

실험에서 얻어진 제공근 길이와 입사된 출력값을 이용해 P_c 와 w 를 구하고 이를 다시 가우시안이라 가정하여 계산한 제공근길이 값과 비교하면 Fig. 4 (a)와 같이 거의 유사함을 알 수 있다. 이때의 입사면적 제공근 길이는 $6.69 \mu\text{m}$, 손상 임계에너지 밀도는 45 mJ/cm^2 으로 계산되었으며, 이 값들은 펄스수 10,000를 입사했을 경우이다.

CGH에 의해 생성된 패턴은 약 107 mJ/cm^2 의 에너지 밀도로 셔터의 on 시간을 10 ms (한 픽셀에 레이저 펄스수 1,000개 입사)로 하여 가공하였으며 패턴 하나당 크기가 Fig. 4 (b)에서 보는 바와 같이 한 변의 길이가 대략 $5 \mu\text{m}$ 이며, 전체크기는 픽셀수가 64개이므로 약 $320 \times 320 \mu\text{m}^2$ 크기가 된다. 가공된 패턴의 정면반사에 의한 광학현미경 사진은 Fig. 5 (a), 후면 투과에 의한 사진은 Fig. 5 (b)에 나타내었다. Fig. 5 (a)에서 보는 바와 같이 주변에 미세한 파티클이 분포됨을 보였으나 Fig. 5 (c)에서 보는 바와 같이 회절 패턴을 관찰하기에는 큰 무리가 없었다.



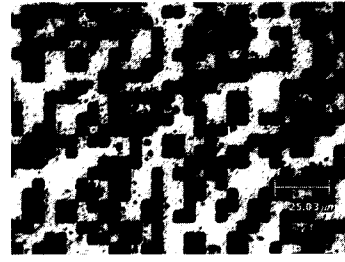
(a)



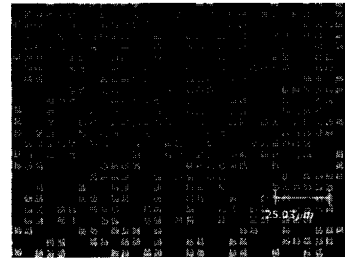
(b)

Fig. 4 Comparison of sqrt. of area obtained experimental data and calculated data to draw a damage threshold and beam area (a) and confocal image of ablated area (b).

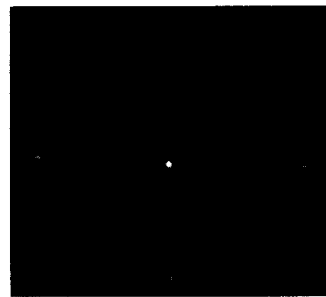
제작된 패턴에 He-Ne 레이저($\lambda : 632.8 \text{ nm}$)를 조사하여 관찰 한 결과 한 픽셀의 크기(d)가 $5 \mu\text{m}$ 인 각각의 패턴을 통하여 원래의 영상이 Fig. 5 (c)에서 보는 바와 같이 재생됨을 관찰 하였다. 패턴 위치와 스크린과의 거리(L)가 약 420 mm 인 경우 1 차 회절 상과의 거리(D)가 약 55 mm 정도로 관찰되었으며 이는 회절 관계식인 $D = \lambda L/d$ 와 거의 일치하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Optical microscope of patterns by reflected light (a) and transmittance (b), and regenerated image at the screen.

4. 결론

가공부에 열영향이 적은 펄스 레이저를 이용하고 다중펄스를 크롬 박막에 조사하여 회절패턴을 제작하였다. 패턴은 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 크기의 사각형 마스크를 이용하여 회절에 의해 빔 분포를 균일하게 함과 동시에 사각형의 형상이 샘플에 전사되도록 이미징 가공방식을 적용 하였다. 가우시안의 면적변화를 가정하고 유추한 가공임계밀도는 10,000개의 펄스를 입력시 45 mJ/cm^2 정도로 계산되었다.

64 x 64 픽셀 크기를 갖는 이미지에 대해서 IFTA를 사용하여 회절 패턴을 생성하고 크롬 박막

에 픽셀 크기 약 $5\ \mu\text{m}$ 로 전체 약 $320 \times 320\ \mu\text{m}^2$ 크기의 회절패턴을 제작하였다. 이를 재생하여 원래의 형상과 비교하였으며, 마이크로 2D 바코드 제작 등 이와 유사한 응용에 활용 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Nolte S., Chichkov B. N., Welling H., Shani Y., Lieberman K. and Terkel H., "Nanostructuring with spatially localized femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.*, Vol. 24, No. 13, pp. 914-916, 1999.
- 2) Venkatakrishnan K., Tan B. and Sivakumar N. R., "Sub-micron ablation of metallic thin film by femtosecond pulse laser," *Optics & Laser Tech.*, Vol. 24, pp. 575-578, 2002.
- 3) Bekei J., Klein-Wiele J. H. and Simon P., "Efficient submicron processing of metals with femtosecond UV pulses," *Appl. Phys. A*, Vol. 76, pp. 355-357, 2003.
- 4) Hayasaki Y., Sugimoto T., Takita A. and Nishida N., "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, pp. 031101, 2005.
- 5) Coyne E., Magee J. P., Mannion P., O'Connorb G. M. and Glynn T. J., "Characterisation of laser ablation of silicon using a Gaussian wavefront and computer generated wavefront reconstruction," *Appl. Surf. Sci.* Vol. 229, pp. 148-160, 2004.
- 6) Lee G. J., Lee Y. P., Cheong H., Yoon C. S., Oh C. H., Kim E. K., Son Y. D. and Jang J., "Femtosecond-laser surface structuring of amorphous and crystalline silicon," *J. of Korean Phys. Soc.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1268-1272, 2006.
- 7) Wyrowski F. and Bryngdahl O., "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 5, No. 7, pp. 1058-1065, 1988.