

# 펄토초 레이저를 이용한 알루미늄 표면의 미세 나노패턴 형성

## Formation of nano-patterning on Al surface by using femtosecond laser pulses

광주과학기술원 고등광기술연구소 최성철, 이영락, 손익부, 노영철, 고도경, 이종민

### 1. 서론

레이저에서 유도된 주기적 표면 구조인 LIPSS (Laser-induced-periodic-surface-structures)는 1965년 Birnbaum 에 의해 처음 관측되었다[1]. Birnbaum은 ruby-laser를 몇 종류의 반도체에 조사하여 반도체 표면에서 ripple 이 생성됨을 확인하였고, 그 이후 유전체, 금속과 같은 다양한 물질에서 LIPSS 형성이 관측되어왔다[2-5]. LIPSS에 의한 ripple은 마이크로머신과 같은 작은 부품의 동작 시에 두 물체간의 표면장력에 기인하는 응착력을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 마모를 줄여주고, 윤활제를 보관하는 작용 등, 부품의 수명을 증가시키는 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다. 이러한 요인으로 현재 재료 표면에 나노 스케일의 미세 구조를 형성시키는 레이저 가공법에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 특히, 펄토초 레이저는 열적 효과가 전달되기 전에 나노패턴을 생성함으로써 다양한 물질에서 미세한 나노 패턴을 생성하는데 많이 응용되고 있다. 예를 들어, 유리와 같은 투명 재료에 펄토초 레이저를 조사하여 나노 주기 구조의 주기 간격을 생성하였고, 그 주기는 레이저 펄스 수에 반비례하고 ( $\Lambda \propto \ln(N_{\text{pulse}})$ ) 또한 펄스 수를 일정하게 하였을 때 펄스 에너지를 변화시키므로 주기 간격을 제어할 수 있다.

본 연구에서는 펄토초 레이저를 이용하여 금속 나노패턴 편광자를 제작하기 위한 최적화 조건을 도출하는데 그 목적이 있다.

### 2. 나노패턴 생성 원리

일반적으로 샘플에 레이저 빔이 조사되어 발생한 ripple은 조사빔 파장과 밀접한 관계가 있고, Ripple은 레이저편광 방향과 수직이나 평행방향으로 배열된다. 이와 같은 주기는 조사된 빔과 시료표면의 굴곡에 의해 발생하는 산란된 빛과의 간섭에 의해 발생하는 standing wave 에 기인한다. 결과적으로 레이저가 조사되었을 때 표면의 melting threshold는 주기적으로 초과하게 되고 재빨리 녹은 물질은 얇은 층으로 고체화 되면서 물결 구조를 야기하게 된다.

산란(1차 회절)파는 그림 1에 파수 벡터 diagram에 의해 식 (1)과 같이 기술될 수 있다.

$$k_{\parallel}^{s,a} = k_{\parallel} \mp q \tag{1}$$

이때, 파수벡터의 z 성분은 Helmholtz equations,  $k_{\parallel}^2 + k_z^2 = \epsilon k_i^2$ 에 의해 식 (2)와 같이 유도 될 수 있다.

$$k_z^{s,a} = (k_i^2 - k_{\parallel}^{s,a2})^{1/2} \tag{2a}$$

$$k_z^{s,a} = (\epsilon k_i^2 - k_{\parallel}^{s,a2})^{1/2} \tag{2b}$$

여기서  $k_z^{s,a}$ ,  $k_z^{t,a}$  는 각각 반사된 파수벡터와 투과된 파수벡터의 z성분이다.

Ripple이 형성되기 위한 가장 좋은 조건은  $k_z^{s,a}$ 이나  $k_z^{t,a}$ 가 표면에 평행할 때이므로, 식 (1)과 (2)로부터 반사파와 투과파는 식 (3)과 같이 기술 될 수 있다.

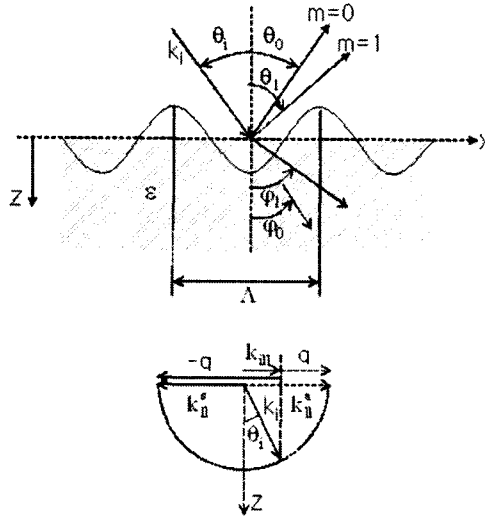


그림 1. 표면에서의 반사와 굴절. 아래 쪽의 그림은 표면을 따라 움직이는 회절된 반사파의 파수벡터 diagram을 이다. 여기서  $k_i$ 는 입사광의 파수벡터이고,  $q$ 는 grating 벡터이다.

$$k_i = k_{ii}^{s,a} = |k_{ii} \mp q| \tag{3a}$$

$$e^{1/2} k_i = k_{ii}^{s,a} = |k_{ii} \mp q| \tag{3b}$$

반사파의 경우, 간섭 무늬의 주기는 p-, s-polarization 에 대하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{1 \pm \sin \theta_i} \quad \text{for } q \parallel x \text{ (p-polarization)} \tag{4a}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\cos \theta_i} \quad \text{for } q \parallel y \text{ (s-polarization)} \tag{4b}$$

투과파의 경우, 간섭 무늬의 주기는 식 (5)와 같이 표현 될 수 있다.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n \pm \sin \theta_i} \quad \text{for } q \parallel x \text{ (p-polarization)} \tag{5a}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{(n^2 \pm \sin^2 \theta_i)^{1/2}} \quad \text{for } q \parallel y \text{ (s-polarization)} \tag{5b}$$

레이저가 조사될 때 첫 번째 pulse 는 Target 표면의 거침에서 발생하는 반면 그 다음 pulse는 S-, S-, C fringe 라 분류되는 주기적인 ripple 이 형성한다[6]. 이러한 공간적 ripple을 형성하기 위한 중요한 파라미터로는 레이저 파장, 편광도, 조사빔의 각도 등에 의존하게 된다. S-, S- 타입의 fringe는 편광방향에 수직하게 발생하는 데, 이때 ripple의 주기는 식 (4a), (5a)와 같다. 대개 S- 타입의 fringe가 우세하게 작용하며, C 타입의 fringe는 거의 편광방향에 평행하게 형성되는 데 그 주기는 식 (4b), (5b)와 같이 주어진다. 그러므로 ripple 의 공간적 주기는 레이저 파장과 조사빔의 각도에 밀접한 관계되어 있다.

### 3. 실험 장치

#### 3-1 샘플 생성

본 연구에서 사용된 샘플의 구조는 slide glass 위에 Al 을 50 nm 두께로 코팅된 샘플, 그 위에 균일한 산화막이 형성된 샘플, glass 위에 먼저 얇은 산화막을 형성한 후 Al 을 50 nm 두께로 코팅하여 다시 균일한 산화막을 형성한 샘플, 그리고 50 nm Al 박막위에 균일한 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 산화막을 수 nm 형성한 샘플을 사용하였다. 샘플은 일본 ULVAC 사의 DC Magnetron Sputter를 사용하여 제작하였고, 작동 압력(operating pressure)는 1.7 x 10<sup>-1</sup> Pa, target과 샘플의 거리는 14 cm, target size는 8", DC power는 100 W 였다. 균일한 산화막을 형성시키기 위해 Ar과 O<sub>2</sub>의 비를 9 : 1 로 혼합하여 10 시간 정도 산화

시켰다.

### 3-2 펨토초 레이저 시스템

펨토초 레이저는 Chirped pulsed amplification 기술을 이용한 regenerative amplifier 시스템(IFRIT, Cyber Laser Inc)을 사용하였다. 레이저 빔의 펄스폭은 781 nm (390.5 nm) 파장에서 130 fs (200 fs)였다. 펄스 반복률은 1 kHz 이고 regeneration amplifier에서 방출된 레이저 빔 profile은 거의 Gaussian 형태를 가진다. 평균 출력 에너지는 500 mW 정도이고, 선형 편광된 레이저 빔은 초점거리 100 mm 인 cylindrical lens를 통해 샘플에 조사 되었다. 샘플 표면에서의 레이저 강도를 조절하기 위해 Neutral Density filter를 사용하였으며, 샘플에 조사되는 레이저 pulse 수는 X-Y Linear stage 속도를 변화시키면서 조절하였다. 빔 크기는 21  $\mu\text{m}$  x 4.7 mm였고, 최대 레이저 출력에서 peak power는 3.8 GW, peak intensity는 7.7 TW 였다. 레이저 조사 후 샘플 표면의 결정성을 확인하기 위해 AFM (Atomic Force Microscope)을 사용하여 분석하였다.

사용된 시스템 장치도는 그림 3에 나타내었다.

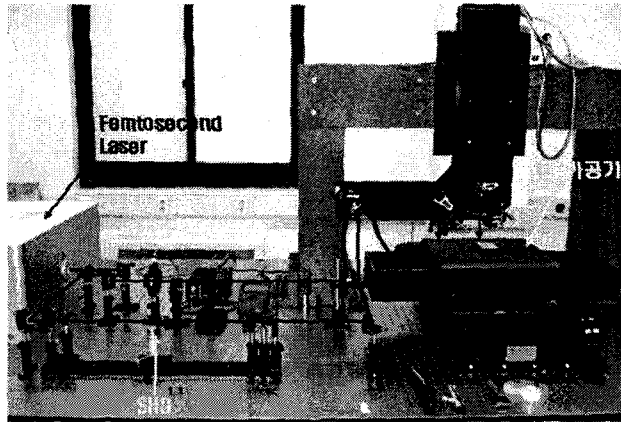
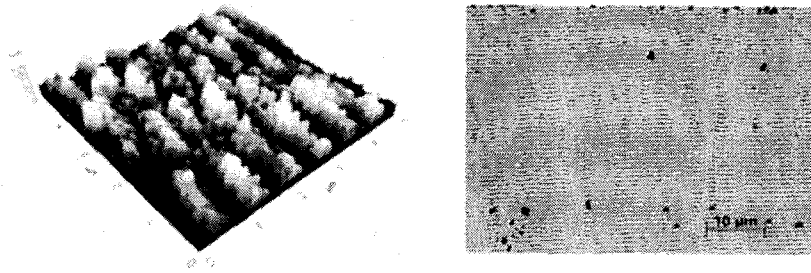


그림 3. 펨토초 레이저를 이용한 실험 장치도

### 3. 실험 결과

펨토초 레이저의 기본파를 이용한 실험결과는 그림 4, 5와 같다. 그림 4는 Al 박막에 형성된 700 nm 나노패턴을 보여주고 있고, 그림 5는 300 nm 대의 금속 나노패턴을 보여준다. 펨토초 레이저의 2차 조화파 (390.5 nm)을 이용한 실험에서는 금속 나노패턴 형성에 실패하였다. 이는 금속 나노패턴이 단순히 사용된 레이저의 펄스폭에 의존하여 생성되는 것이 아니라, 사용된 샘플과 레이저의 파장에 의존하게 된다. 즉, 샘플의 파장에 대한 분산 특성 또한 나노패턴 형성에 영향을 미친다. 또한, Al 박막 위에 산화막이 있는 경우와 없는 경우 표면 플라즈몬(Surface Plasmon)의 공명 주파수가 달라지기 때문에 Al 산화막이 있는 경우 표면 플라즈몬 파장이 훨씬 짧아지게 된다[9]. 식 (5a)에서 Al 산화막이 없는 경우  $n \approx 1.01$  정도 이고, Al 산화막이 있는 경우  $n \approx 1.76$  로 근접하게 된다. 하지만 실제 측정된 값은 이론 값 보다 작았다. 이와 같이 측정값이 이론 값 보다 작은 이유는 이론값에 사용되는 유효 굴절률이 단순히 Al 산화막의 굴절률이 아니라 산화막과 Al 과의 유전율에 의해 결정되는 상대적인 값이기 때문이다.



(a) AFM 이미지 (b) 광학현미경 이미지  
 그림 4. 펨토초 레이저를 이용한 Al 박막 가공 실험 결과 (700 nm 주기)

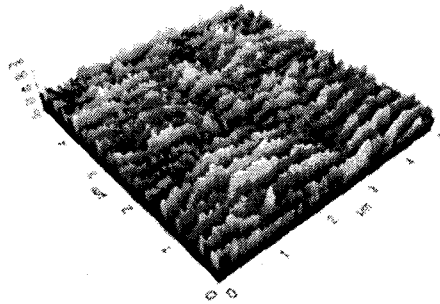


그림 5. 펨토초 레이저를 이용한 Al 박막 가공 실험 결과 (300 nm 주기)

### 3. 결론

펨토초 레이저를 조사하여 Al 박막 표면 나노패턴의 공간적 구조를 분석하였다. 나노패턴의 공간적 주기는 입사빔의 강도와 펄스 수에 의존함을 확인하였고, 이를 조절함으로써 보다 짧은 주기의 나노패턴을 생성할 수 있다. 또한, 생성 깊이는 레이저 펄스 수가 증가 할수록 증가함을 확인하였다. Al 박막 위에 균일한 산화막이 형성된 샘플은 짧은 주기의 나노패턴을 형성하는데 중요한 역할을 수행하는 것을 확인하였다.

### IV. 참고문헌

- [1] M. Birnbaum, "Semiconductor Surface Damage Produced by Ruby Lasers" J. Appl. Phys. 36, 3688-3689, 1965
- [2] M. Bolle and S. Lazare, "Characterization of submicrometer periodic structures produced on polymer surfaces with low-fluence ultraviolet laser radiation" J. Appl. Phys. 73, 3516-3524, 1993
- [3] N. Yasumaru, K. Miyazaki, J. Kiuchi, "Glassy carbon layer formed in diamond-like carbon films with femtosecond laser pulses" Appl. Phys. A 79, 425-427, 2004
- [4] N. Yasumaru, K. Miyazaki, J. Kiuchi, "Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on hard thin films of TiN and DLC" Appl. Phys. A 76, 983-985, 2003
- [5] F. Costache, M. Henyk, J. Reif, "Surface patterning on insulators upon femtosecond laser ablation" Appl. Surf. Sci. 208-209, 486-491, 2003
- [6] D. Bauerle, Laser Processing and Chemistry, 3<sup>rd</sup> ed., Springer, Berlin, p574, 2000