

## 펄토초 레이저를 이용한 금속 나노패턴 형성 연구

최성철 · 이영락 · 노영철 · 이종민 · 고도경<sup>†</sup>

광주과학기술원 고등광기술연구소

☎ 500-721 광주광역시 북구 오룡동 1번지

이정훈 · 김강윤 · 김창중 · 이용상 · 허명구

(주)LG전자 RMC사업부

☎ 361-480 충청북도 청주시 흥덕구 향정동 50 번지

(2006년 1월 23일 받음, 2006년 4월 6일 수정본 받음)

펄토초 레이저 펄스를 이용하여 Slide glass 위에 코팅된 Al 박막표면에 나노패턴 구조를 생성하였다. 생성된 나노패턴 구조의 공간적 주기는 레이저 강도와 펄스 수에 의존함을 확인하였고, 레이저 강도와 펄스 수를 미세하게 조절함으로써 Al 샘플 표면에 균일한 나노패턴을 형성시킬 수 있다. 이와 같은 현상은 레이저 입사빔과 샘플 표면에서 산란되는 빛의 광학적 간섭에서 야기된다. 또한, Al 박막표면 위에 형성된 산화막이 짧은 주기의 나노패턴을 형성하는데 중요한 역할을 수행하는 것을 확인하였다.

주제어 : Femtosecond laser, nano-patterning, Al sample, Oxide layer

### I 서 론

레이저에서 유도된 주기적 표면 구조인 LIPSS(Laser-induced-periodic-surface-structures)는 1965년 Birnbaum에 의해 처음 관측되었다.<sup>[1]</sup> Birnbaum은 ruby 레이저를 몇 종류의 반도체에 조사하여 반도체 표면에서 나노패턴이 생성됨을 확인하였고, 그 이후 많은 연구자들에 의해 유전체, 금속과 같은 다양한 물질에서 LIPSS 형성이 관측되고 있다.<sup>[2-5]</sup> LIPSS에 의한 나노패턴은 마이크로머신과 같은 작은 부품 작동 시에 두 물체간의 표면장력으로 발생하는 응착력을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 마모를 줄여주고, 윤활제를 보관하는 작용 등, 부품의 수명을 증가시키는 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다.<sup>[6]</sup> 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 이용되고 있다.<sup>[7]</sup> 나노패턴 형성에 영향을 미치는 중요한 광학적 요소로는 레이저 파장, 편광도, 조사빔의 각도 등이 있다. 최근에는 파장보다 훨씬 작은 나노패턴의 공간적 주기를 갖는 결과들이 발표되고 있으며, 여러 물질들에 대한 조사가 병행되고 있다.<sup>[8]</sup>

본 논문에서는 알루미늄 박막 표면에 펄토초 레이저를 조사하여 생성되는 나노패턴을 실험적으로 관측하였고, 레이저 출력과 펄스 수를 미세하게 조절하여 생성된 나노패턴의 특성을 확인하였다.

### II. 나노패턴 생성 원리

일반적으로 샘플에 레이저 빔이 조사되어 발생한 공간적 주기는 조사빔 파장과 밀접한 관계가 있고, 그 주기 배향은 레이저 편광 방향과 수직이나 평행방향으로 배열된다. 이와 같은 주기는 조사된 빔과 시료표면에서 굴곡에 의해 발생하는 산란된 빛과의 간섭에 의해 생성된다. 결과적으로 레이저가 조사되었을 때 표면의 용해 문턱값(melting threshold value)은 주기적으로 초과하게 되고 재빨리 녹은 물질은 얇은 층으로 고체화 되면서 물결 구조를 야기하게 된다. 이를 보다 상세히 설명하면, 레이저가 조사될 때 첫 번째 펄스는 Target 표면의 거칠기(roughness)에서 발생하는 반면 그 다음 pulse는 S<sub>+</sub>, S<sub>-</sub>, C fringe라 분류되는 주기적인 나노패턴이 형성된다.<sup>[9]</sup> 이러한 공간적 주기를 형성하기 위한 중요한 파라미터로는 레이저 파장, 편광도, 조사빔의 각도 등에 의존하게 된다. S<sub>+</sub>, S<sub>-</sub> 타입의 fringe는 편광방향에 수직하게 발생하는 데 대개 S<sub>+</sub> 타입의 fringe가 우세하게 작용한다. 이때 나노패턴의 주기는 아래 식과 같다.

$$\Lambda_{\pm} = \frac{\lambda}{1 \pm \sin\theta_i} \quad (1)$$

여기서  $\Lambda$ 는 나노패턴의 공간적 주기,  $\lambda$ 는 레이저 파장,  $\theta_i$ 는 조사되는 빔의 각도를 나타낸다. C 타입의 fringe는 거의 편광방향에 평행하게 형성되는 데 그 주기는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\Lambda_c = \frac{\lambda}{\cos\theta_i} \quad (2)$$

<sup>†</sup> E-mail: dkko@gist.ac.kr

이와 같이 나노패턴의 공간적 주기는 광학적 특성과 물질의 특성 등에 밀접한 관련이 있다

### III. 실험 장치

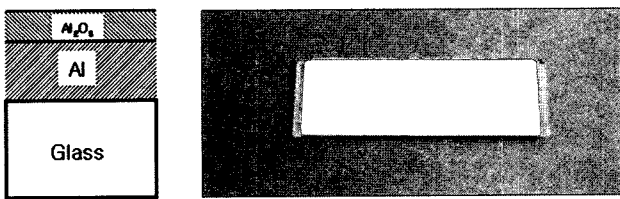
#### 3.1 샘플 제작

본 연구에서 사용된 샘플의 구조는 slide glass 위에 Al을 50 nm 두께로 코팅된 샘플과 Al 위에 균일한 알루미늄 산화막( $Al_2O_3$ )이 형성된 샘플로써 사용된 샘플의 구조는 그림 1에 나타내었다.

샘플은 일본 ULVAC 사의 DC Magnetron Sputter를 사용하여 제작하였고, 작동 압력(operating pressure)은  $1.7 \times 10^{-1}$  Pa, target과 샘플의 거리는 14 cm, target size는 8", DC power는 100 W였다. 균일한 산화막을 형성시키기 위해 Ar과  $O_2$ 의 비를 9:1로 혼합하여 10시간 정도 산화시켰다

#### 3.2 펄스 레이저 시스템

사용된 펄스 레이저는 Chirped pulsed amplification 기술을 이용한 regenerative amplifier 시스템(IFRIT, Cyber Laser Inc)으로써 전체적인 사양은 표 1과 같다. 레이저 빔의 펄스폭은 781 nm 파장에서 130 fs였다. 펄스 반복률은 1 kHz이고 regeneration amplifier에서 방출된 레이저 빔 profile은 거의 Gaussian 형태를 가진다. 평균 출력 에너지는 500 mW 정도이고, 선형 편광된 레이저 빔은 초점거리 100 mm인 cylindrical lens를 통해 샘플에 조사 되었다. 샘플 표면에서의 레이저 강도를 조절하기 위해 Neutral Density filter를 사용하였으며, 샘플에 조사되는 레이저 펄스 수는 X-Y Linear stage 속도를 변화시키면서 조절하였다. 빔 크기는  $21 \mu m \times 4.7$  mm였고, 최대 레



(a) (b)

그림 1. Al 박막 샘플. (a) Al 박막 두께  $\approx 50$  nm,  $Al_2O_3$  두께  $\approx 5$  nm, (b) 샘플 사진.

표 1. 펄스 레이저 시스템 사양

Parameter	
Wavelength (nm)	781
Pulse width (fs)	130
Average power (mW)	500
Repetition rate (Hz)	1000
Beam diameter (mm)	4.7
Focal length of lens (mm)	100

이저 출력에서 peak power는 3.8 GW, peak intensity는 7.7 TW였다. 레이저 조사 후 샘플 표면의 결정성을 확인하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope)을 사용하여 분석하였다. 전체 가공시스템의 개략도는 그림 2에 나타내었다.

### IV. 실험결과 및 토의

#### 4.1 레이저 강도에 따른 나노패턴 형성 특성

입사광의 강도는 형성되는 나노패턴의 특성을 결정하는 주요한 요소로 알려져 있다. 본 연구에서도 Al 박막에 형성되는 나노패턴의 공간적 주기의 강도 의존성을 확인하기 위해 여러 레이저 강도에서 Al 박막을 노출 시켜 형성되는 주기 특성을 관측하였다. 그림 3은 레이저 펄스 수를 200으로 고정하고 레이저 강도(100, 110, 120, 130  $\mu J$ )를 조절하여 Al 박막 표면에 형성된 나노패턴 구조의 AFM 이미지를 나타내고 있다. 레이저 강도가 용해 문턱값보다 약하면 샘플 표면에 아무런 물리적 현상이 발행하지 않고, 그보다 더 높으면 Al 박막이 완전히 사라진다. 따라서 용해 문턱값 근처에서 적당한 강도를 찾기 위해 펄스 수를 고정하고 강도를 조절하면서 실험을 수행하였다.

AFM 결과로부터 레이저 강도에 따른 나노패턴의 주기와 생성 깊이에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그림 4는 레이저 강도에 따른 나노패턴의 공간적 주기와 생성 깊이에 대한 의존성을 보여주고 있다. 그림 3(d)와 같이 일반적인 나노패턴의 공간적 주기는 사용된 레이저 파장과 밀접한 관계를 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>[9]</sup> 그러나 그림 3(a)-(d)에서 보는 바와 같이 낮은 레이저 강도에서 나노패턴의 주기는 사용된 레이저 파장보다 훨씬 작다.

그림 4에서 보는 바와 레이저 강도가 증가함에 따라 나노패턴의 공간적 주기가 증가함을 볼 수 있다. 100  $\mu J$ 의 레이저 강도에서 생성된 나노패턴의 공간적 주기는 250 nm 정도 관측되었지만, 그 이후의 강도에서는 그 주기가 증가하여 130  $\mu J$ 에서는 사용된 레이저 파장인 780 nm의 공간적 주기가 관측되었다. 이는 Al 산화막이 완전히 제거되어 Al 박막만 있을 때의 공간적 주기를 나타내는 것으로 여겨진다.

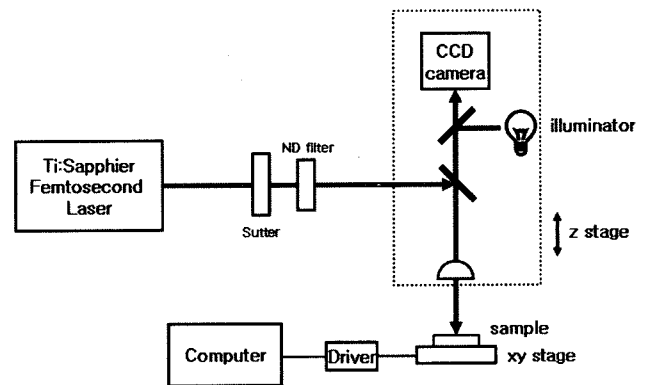


그림 2. 펄스 레이저를 이용한 실험 개략도

레이저 펄스 수가 나노패턴 형성에 미치는 영향을 확인하기 위해 펄스 수를 변화 시키면서 실험을 수행하였다. 그림 5는 Al 박막에 조사되는 레이저 강도를 100  $\mu\text{J}$ 로 고정하고 레이저 펄스 수를 조절하면서 관측한 결과이다. 레이저 펄스 수가 감소할수록 나노패턴의 공간적 주기가 불명확함을 볼 수 있다. 이때 관측된 이미지의 나노패턴 특성은 그림 6에 나타내었다.

실험을 통하여 30 nm 의 생성깊이를 갖는 주기 격자를 얻기 위해서는 최소 200개 이상의 펄스가 필요함을 알 수 있었다.

본 연구에서 250 nm 주기의 짧은 나노패턴 주기가 형성되었다(그림 3, (a)-(c) 참조). 이는 Al 박막위에 균일한 산화막이 짧은 주기의 나노패턴을 형성하는데 중요한 역할을 수행하는 것으로 예측된다. 이를 확인하기 위해 Al 산화막 샘플과 같은 레이저 상태에서 산화막이 없는 순수한 Al 박막 위에 직접 레이저를 조사하였다. 그 결과 단지 700 nm 대의 나

노패턴만이 생성되었고 낮은 레이저 강도에서는 어떠한 나노패턴도 형성되지 않았다. 이와 같은 결과는 Al 박막 위에 산화막이 있는 경우와 없는 경우 표면 플라즈몬(Surface Plasmon)의 공명 주파수가 달라지기 때문에 발생한다. 즉, Al 산화막이 있는 경우 표면 플라즈몬 파장이 훨씬 짧아지게 된다.<sup>[9]</sup> 이때 식 (1)은  $\Lambda_{\pm} = \lambda / (n + \sin\theta_i)$ 와 같이 된다. 여기서 n은 표면 플라즈몬의 유효 굴절률(effective index)을 나타낸다. 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 이론값 보다 작았다. 이와 같이 측정값이 이론값 보다 작은 이유는 이론값에 사용되는 유효 굴절률이 단순히 Al 산화막의 굴절률이 아니라 산화막과 Al과의 유전율에 의해 결정되는 상대적인 값이기 때문이다. 그러므로, 짧은 주기의 나노패턴이 형성되는 보다 명확한 메커니즘을 규명하기 위해서는 상세한 이론적 분석과 실험적 연구가 수행되어야 하고 또한, 넓은 영역의 레이저 파라미터와 다른 물질들에 대한 체계적인 조사가 수행되어야 할 것으로 여겨진다.

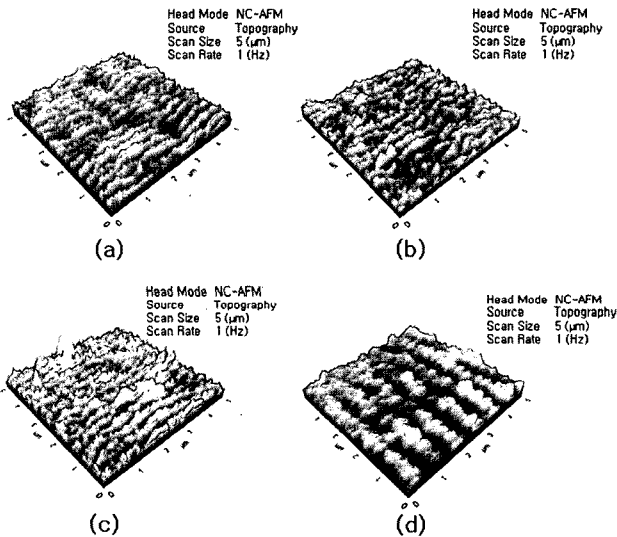


그림 3. 레이저 강도에 따른 Al 산화막 샘플 표면에 생성된 나노패턴 구조(레이저 펄스 수 : 200 ). (a) 100  $\mu\text{J}$ , (b) 110  $\mu\text{J}$ , (c) 120  $\mu\text{J}$ , (d) 130  $\mu\text{J}$ .

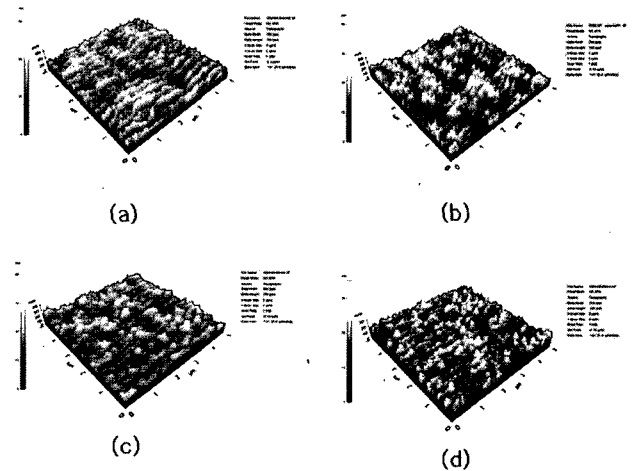


그림 5. 펄스 수에 따른 Al 산화막 샘플 표면에 생성된 나노패턴 (100 $\mu\text{J}$ ) (a) 200 펄스, (b) 100 펄스, (c) 50 펄스, (d) 40 펄스.

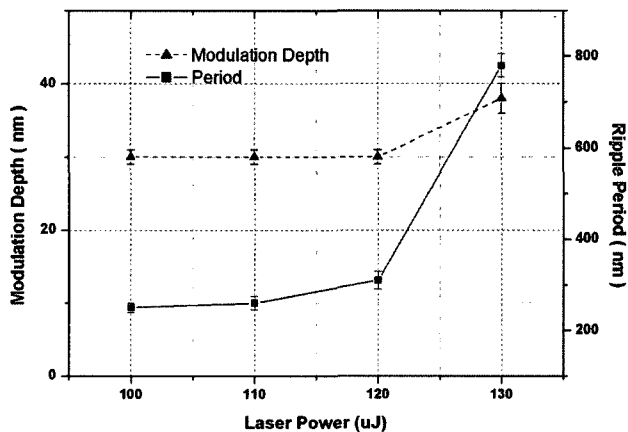


그림 4. Al 산화막 샘플에서 출력에 따른 나노패턴 특성 그래프 (200 펄스).

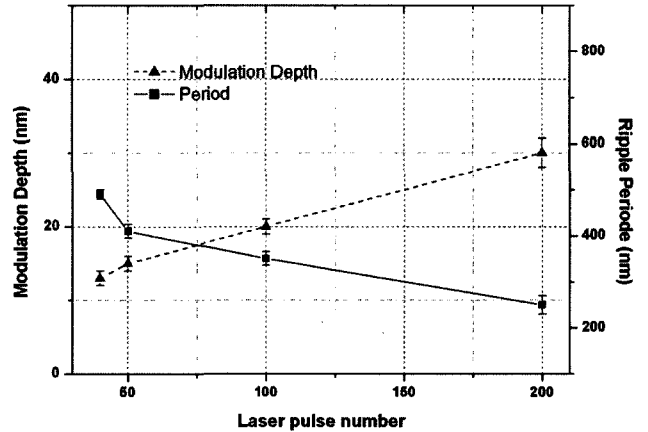


그림 6. Al 산화막 샘플에서 펄스 수에 따른 나노패턴 특성 그래프 (100  $\mu\text{J}$ ).

V. 결 론

펄스 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.

참고문헌

[1] M. Birnbaum, J. Appl. Phys. 36, 3688-3689, 1965.  
 [2] M. Bolle and S. Lazare, J. Appl. Phys. 73, 3516-3524, 1993.  
 [3] N. Yasumaru, K. Miyazaki, J. Kiuchi, Appl. Phys. A 79, 425-427, 2004.  
 [4] N. Yasumaru, K. Miyazaki, J. Kiuchi, Appl. Phys. A 76, 983-985, 2003.  
 [5] F. Costache, M. Henyk, J. Reif, Appl. Surf. Sci. 208-209, 486-491, 2003.  
 [6] A. Semerok and P. Mauchien, Rev. Las. Eng. 33, 530-536, 2005.  
 [7] D. V. Tran, H. Y. Zheng, Y. C. Lam, V. M. Murukeshan, J. C. Chai, D. E. Hardt, Optics & Laser Eng. 43, 977-986, 2005.  
 [8] R. L. Harzic, H. Schuck, D. Sauer, T. Anhut, I. Riemann, K. Konig, Optics Express, 13, 6651-6656, 2005.  
 [9] D. Bauerle, Laser Processing and Chemistry, 3rd ed. Springer, Berlin, p. 574, 2000.

**Formation of nano-pattern on metal using femtosecond laser pulses**

Sung-Chul Choi, Yeung Lak Lee, Young-Chul Noh, Jongmin Lee, and Do-Kyeong Ko<sup>†</sup>

*Femto Science Laboratory, Advanced Photonics Research Institute, Gwangju Institute of Science and Technology, 1 Oryong-dong, Buk-gu, Gwangju, 500-712, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: dkko@gist.ac.kr*

Jung-Hoon Lee, Kang-Yoon Kim, Chang-Jong Kim, Ung-Sang Lee, and Myeong-Koo Heo

*LG Electronics Inc. RMC Division, 50 Hyangjeong-dong, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 361-480, KOREA*

(Received January 23, 2006, Revised manuscript April 6, 2006)

Femtosecond laser-induced nano-patterning of an Al surface coated on a slide glass is reported in this paper. It was found that the period of the laser-induced nano-patterning was much dependent on the incident laser power and pulse number. Through finely adjusting the laser power and pulse number, uniform nano-patterns could be formed on the Al surface. It is based on the interference of the incident laser beam with some form of a surface scatted electromagnetic wave. It was also found that an Al oxide layer played an important role in forming the nano-patterning on the Al surface.

OCIS Codes : 220.4000. 320.7160.