

펄토초 레이저를 이용한 세라믹과 실리카 패터닝

Patterning of ceramic and silica using femtosecond laser pulses

한국정보통신대학교 손익부, 이만섭
(주)포코 이상만, 우정식, 정정용

1. 서론

레이저 미세 가공기술은 가공 도구인 레이저빔의 고집속 및 시/공간적 정밀제어가 가능하여 반도체, 전자, 자동차, 메카트로닉스 등의 첨단산업 분야에서 고품질의 부품을 가공하는데 필수적인 기술로 널리 활용되어 왔다 또한 환경 친화적이며, 비접촉 공정으로서, 수십 마이크로미터의 형상을 갖는 부품 가공영역에서 기존의 공정을 대체하는 신 공정 개발에 기여하여 왔었다 그러나 최근 레이저 가공 공정은 열적 가공현상 및 분해능의 한계로 인하여 경량, 박판, 고밀도, 및 고집적화 되어가고 있는 산업의 추세를 따르기 힘들어졌다 이에 따라 기존의 레이저 가공방식보다 더욱 정밀한 새로운 개념의 첨단 레이저 가공기술의 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다 이와 같은 첨단 레이저는 수 마이크로미터 급의 형상 가공뿐만 아니라 열적영향이 없으며 3차원 가공이 가능한 펄토초 레이저가 대표적이다[1]

기존의 펄스 레이저는 긴 펄스시간을 가지는 램프 여기방식과 Q-스위칭방식 이었다 이에 반해 펄토초 레이저는 모드 잠금(Mode-locking) 기술을 사용하여 펄스폭이 짧으면서 큰 첨두출력(Peak power)의 펄스를 생산하는 방식이다 이와 같이 펄토초 레이저 가공은 극도의 높은 첨두출력(>10GW)에 의한 비선형 현상인 다광자 흡수(Multi-photon absorption) 프로세스에 의해 열을 통하지 않고 정밀한 가공을 실현하는 전혀 새로운 레이저 가공이며, 21세기 다양한 산업의 발전에 큰 영향을 주는 첨단 미세 가공이다 광통신산업, 바이오·의료산업, 나노·신소재산업, 환경·원자력산업, 반도체·컴퓨터산업 등의 다양한 응용분야와 큰 시장을 형성하고 있다

2. 실험 및 결과

2-1 펄토초 레이저 표면 가공 (Surface femtosecond laser processing)

펄토초 레이저를 이용한 레이저 가공에서 가장 큰 특징은 레이저와 재료의 상호반응시 발생하는 열이 전과되는 시간을 갖지 못하기 때문에 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는 장점이 있다 다시 말하면, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적인 레이저 가공에서 나타나는 열확산 현상은 발생되지 않으며 기존 레이저의 열적 가공보다 정밀한 가공이 가능하다 또한, 펄토초 레이저는 가공물의 주변에 형성되던 용융물 및 잔유물(Debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고 발생된다 하더라도 매우 미세한 파우더 형태이며 이는 쉽게 세척이 가능하다는 장점이 있어 현재 전 세계적으로 각광을 받고 있다

세라믹 알루미늄이나 뛰어난 열적 안정성과 높은 열전도성을 가지는 중요한 소재이다 그림 1(a)에서 보는 것처럼 펄토초 레이저를 이용하여 알루미늄(Al_2O_3) 표면에 주기적인 마스크 패턴(Mask patterns)을 제작하였다 실험에 사용된 T1 sapphire 펄토초 레이저는 800 nm의 파장, 100 fs의 펄스폭(Pulse width)과 1kHz의 펄스 반복률(Repetition rate)을 가진다 제작된 마스크 패턴의 폭과 간격은 각각 25 μm 와 100 μm 이며, 그림 1(b)는 수백 마이크로미터 이상 크기(230×1500 μm)의 알루미늄 절단(Cutting)에 대한 실험 결과이다 알루미늄 기판의 마스크 패턴 제작과 절단에 사용된 펄토초 레이저의 펄스세기와 이송속도(Transfer speed)는 각각 500 μJ 과 1 mm/s 이다 알루미늄과 같은 세라믹은 높은 경도를 갖고 있으며 기존의 펀칭(Punching)이나 스탬핑(Stamping)으로 수백 마이크로미터 이상은 한계가 있으며, 펄토초 레이저 가공은 공작 도구의 마모(Tool wear)가 없고 패턴 형상에 대한 정밀도와 대응력이 뛰어나다는 강점을 가지고 있다

펄토초 레이저를 이용한 정밀 미세 패턴 가공은 최근에 각광받고 있는 LCD와 PDP의 디스플레이 패널 등에 활용가능하다 국내 LCD 업체들이 LCD TV 시대를 앞당기고 타 디스플레이와의 경쟁 우위를 위해

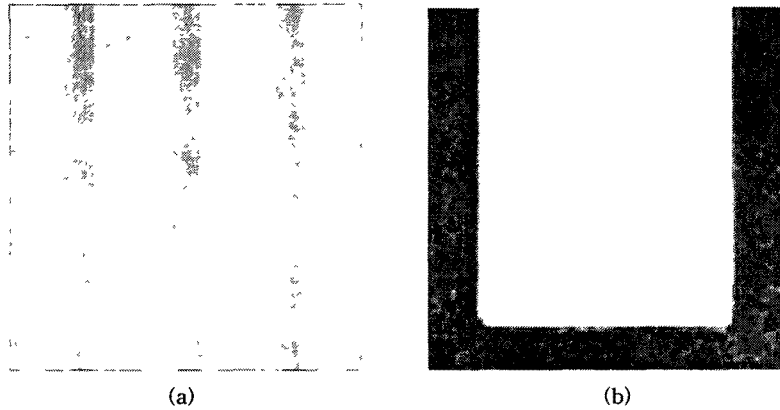


Fig 1 Microscope image of alumina (a) mask patterning and (b) cutting using femtosecond laser pulses with pulse energy of $500 \mu\text{J}$ and scan speed of 1 mm/s

최근 혁신적인 새로운 공정기술 개발에 착수하면서 장비 재료 분야의 일대 혁명적인 변화가 초래될 전망이다. 이르면 3년 이내에 가시화될 LCD 장비 재료 분야의 혁명적인 변화는 새로운 공정 개발로 비용을 최소화하는 것이 핵심이다. LCD 업체가 재료비를 낮출 수 있는 근본책으로 내놓는 것이 포토 공정을 없애는 기술이다. 포토장비는 대당 1000만달러를 상회하는 데다 포토마스크(Photo mask), 포토레지스터(Photo register), 펠리클(Pellicle) 등의 다양한 재료를 필요로 하고 공정 처리시간도 길다. 세계적으로 큰 시장을 형성하고 있는 디스플레이 분야에서 기존의 포토 공정 없이 패턴을 제작하는 방법으로 잉크젯 프린팅 공정과 나노 임프린트 기술과 더불어 펨토초 레이저 패턴 가공 기술이 앞으로 주목을 받으리라 예상된다. 그림 2에서는 펨토초 레이저를 이용하여 구리(Cu) 기판 위에 $20 \mu\text{m}$ 두께로 코팅된 포토레지스터에 대한 패턴 가공 실험 결과이다. 사용된 펨토초 레이저의 펄스세기와 이송속도는 각각 400 nJ 과 $100 \mu\text{m/s}$ 이다. 제작된 패턴의 선폭은 각각 $15 \mu\text{m}$ 와 $45 \mu\text{m}$ 이며, 패턴의 선폭과 깊이 변화는 쉽게 조절이 가능하다. 또한, 지금까지 디스플레이 패널의 back light용 nb barrier 패턴 제작에는 반도체 공정이 주로 사용되었다. 본 실험에서는 이와 같은 디스플레이 패널에 들어가는 패턴 제작이 펨토초 레이저로 가능함을 보였다. 그림 3은 펨토초 레이저를 이용하여 유리와 폴리머에 제작된 가로×세로×깊이가 $450 \times 170 \times 200 \mu\text{m}$ 인 패턴 형상이다. 실험에 사용된 펨토초 레이저 펄스 세기는 $200 \mu\text{J}$ 이고 가공속도는 4 mm/s 이다. 유리와 폴리머에서의 가공 형상은 거의 같으며, 유리에 비해서 낮은 경도를 가지는 폴리머에 대한 가공속도가 3-5배 정도 빠르다.

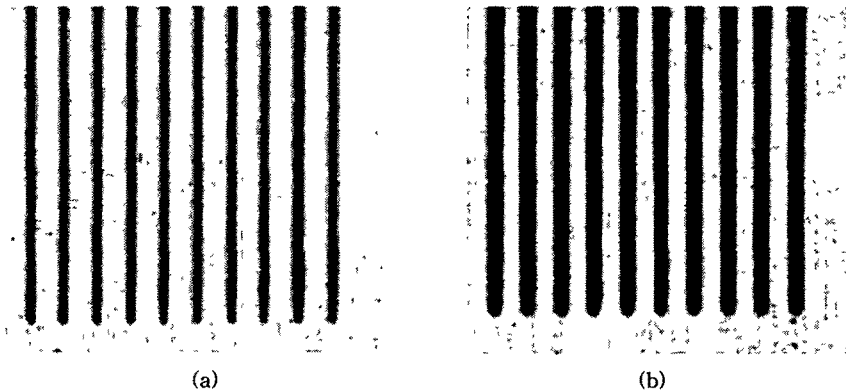


Fig 2 Patterning of photo register using femtosecond laser pulses, (a) width ($15 \mu\text{m}$) and space ($100 \mu\text{m}$), (b) width ($45 \mu\text{m}$) and space ($100 \mu\text{m}$)

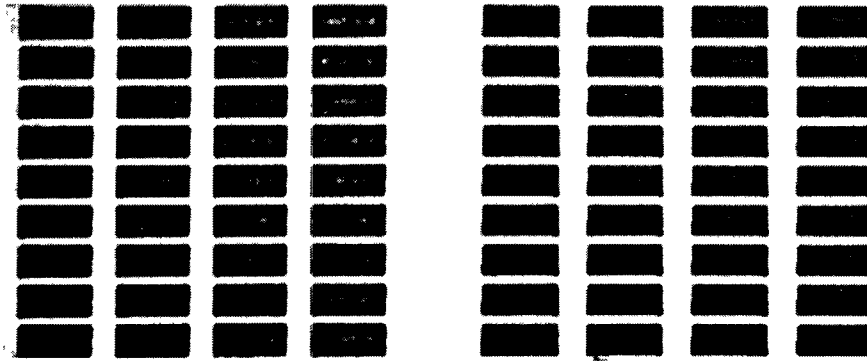


Fig 3 Microscope image of periodic patterns fabricated in (a) glass and (b) polymer by using a femtosecond laser, which can be applicable to display panel

차이점이 있다 하지만 펨토초 레이저를 이용하여 산업체에 응용하기까지는 해결해야 할 문제가 적지 않다 펨토초 레이저의 장기 안정성(Stability), 1kHz의 낮은 펄스 반복률에 기인한 가공속도 및 가공비용 등이 그것이다

초고속 광통신망의 구축을 위해 광부품의 저가격화가 요구되며 광부품의 생산에서 패키징(Packaging) 비용이 약 60 %로 패키징 기술개발이 필요한 실정이다 펨토초 레이저를 이용하여 평면형 광도파로 소자 내에 U-groove를 가공하여 효율적인 수동정렬(Passive alignment)이 가능함을 보였다 그림 4는 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 제작된 U-groove의 광학 현미경 형상이다 가장 일반적인 8 채널로 제작되었으며, 각 채널의 크기는 길이 2 mm, 폭 126 μm 와 깊이 87 μm 이며 3차원 측정기로 $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 가공 정밀도와 최대 $\pm 4 \mu\text{m}$ 의 바닥 거칠기가 얻어졌다 이와 같이, 본 연구에서는 펨토초 레이저 가공은 평면 광도파로 내에 광섬유가 안착될 U-groove를 형성함으로써 광섬유-광도파로간에 쉽게 정렬되도록 하는 수동 정렬 패키징에도 응용될 수 있음을 보였다

2-2 펨토초 레이저 내부 가공 (Internal femtosecond laser processing)

펨토초 레이저를 이용한 가공은 투명물질(Transparent material) 내부에서도 가능하며 미소공간에서 굴절률 변화를 유기하거나 발광성 결함을 생성하여 고밀도 광메모리(Optical memory), 광도파로(Optical

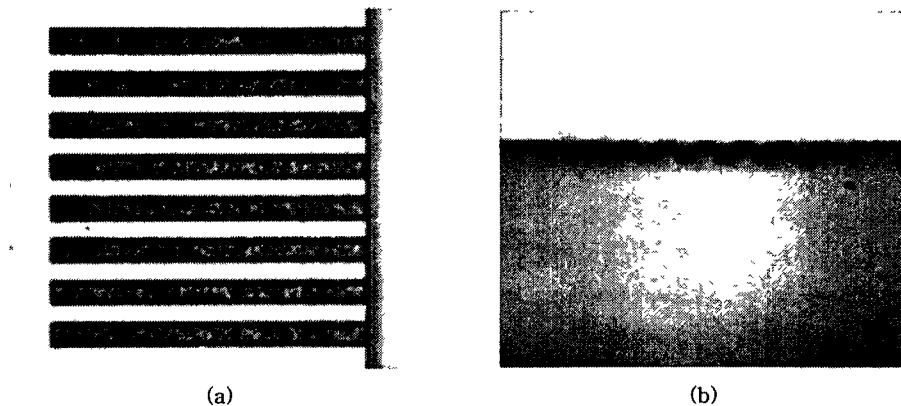


Fig 4 Microscope image of U-grooves directly micromachined by a femtosecond laser at the surface of fused silica with 30 μJ pulse energy

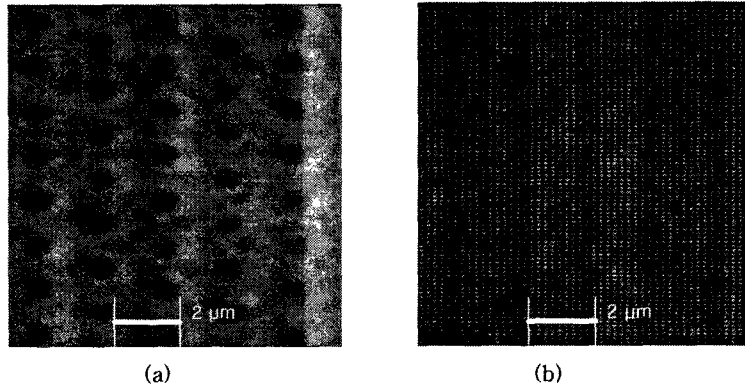


Fig 5 Microscope image of a 2- μm period (a) dot and (b) line patterns directly written inside fused silica with 320 nJ pulse energy Dot diameter and line width are 500 nm

waveguide) 및 광자결정(Photonic crystal)과 같은 광통신 소자 제작에 폭넓게 응용되고 있다[2-8] 높은 첨두 출력(Peak power)을 가지는 펨토초 레이저 펄스를 투명물질의 내부에 집광하게 되면 다광자 흡수(Multi-photon absorption) 및 이온화 등의 비선형 현상에 의해서 굴절률 변화를 유기하게 된다 또한, 자기집속(Self-focusing) 현상에 의해서 가공 선폭은 더욱 작아지게 된다

본 실험에서는 파장이 800 nm, 펄스폭이 100 fs인 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 내부에 서브미크론(Submicron) 크기의 점(Dot) 및 직선(Line) 패턴을 제작하였다 그림 5는 50배율의 objective lens (NA=0.42)를 사용하여 펨토초 레이저 펄스를 실리카 내부에 집광시킴으로써 선폭과 패턴 간격이 각각 500 nm와 2 μm 인 점과 직선 패턴을 제작 하였다 그림 5(a)와 같은 점 패턴은 약 1 Tbit/cm³의 기록밀도를 가지는 고밀도 3차원 광메모리(Optical memory)에 응용할 수 있다 그림 6는 펨토초 레이저를 이용하여 제작한 3차원 광메모리 적용 예이다 실험조건은 그림 5(a)와 같으며 세 개의 층으로 이루어져 있다 점 패턴과 층의 간격은 각각 2 μm 와 7 μm 이다 이번 실험에서 제작된 점 패턴의 기록밀도는 36 Gbit/cm³이며, 이것은 앞으로 높은 개구수(NA)를 가지는 고배율의 objective lens를 사용하게 되면 충분히 개선이 가능하다. 이와 같이 펨토초 레이저를 이용한 서브미크론 크기의 점과 직선 패턴 가공은 주기적인 포토닉 밴드 갭(Photonic band gap) 구조를 갖는 광자결정(Photonic crystal)이나 브래그 격자(Bragg grating) 제작이 가능하며, 그 외에도 다양한 응용 가능성을 보여준다

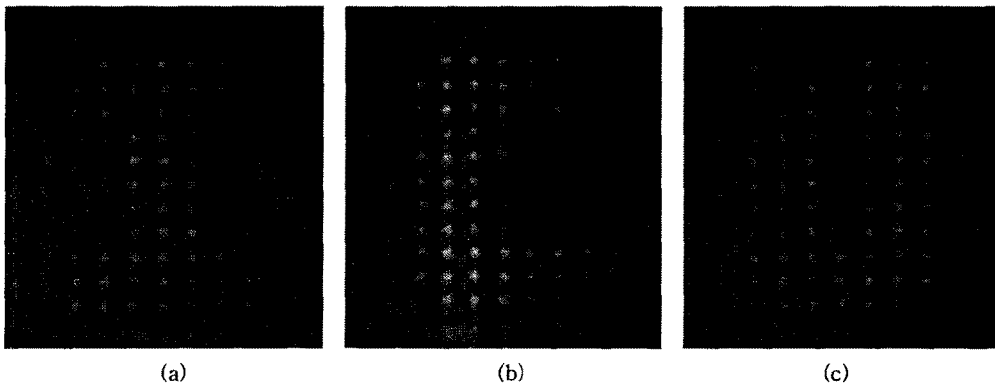


Fig 6 Microscope image of 3D dot patterns consisted of three layers, which is applicable to optical memory (a) First layer displays the letter of I, (b) second layer displays the letter of C, and (c) third layer displays the letter of U

III. 결론

나노 테크놀로지가 진보해감에 따라 나노, 서브미크론 수준의 2차원·3차원 영역에서 물질 조작이나 가공이 필요하게 되었고, 펄스 레이저 미세가공과 같은 새로운 가공기술의 개발 및 장치화가 나노 테크놀로지 분야의 연구개발을 촉진할 것으로 기대하고 있다. 펄스 레이저는 재료의 열반응 속도보다 빠른 시간 내에 빔을 조사하기 때문에 얻어지는 비열적(Non-thermal) 성질을 이용하여 정밀 미세가공 및 기존의 레이저 가공법으로서는 시도할 수조차 없었던 투과물질 재료의 내부에 서브미크론 크기의 패턴을 3차원으로 가공하여 광통신 분야, 나노 및 바이오 관련 산업의 광범위한 분야에 활발한 응용이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 펄스 레이저를 이용하여 세라믹 가공 및 광통신용 수동정렬 패키징 분야에 응용할 수 있음을 보였다. 또한, 디스플레이 분야에 응용할 수 있는 포토레지스터 패턴링 및 유리 및 폴리머 표면의 주기적인 패턴 가공에 대한 본 연구 결과는 기존의 반도체 공정을 대신할 차세대 핵심 기술로 개발이 가능성을 보여준다. 끝으로, 펄스 레이저를 이용하여 광통신 소자에 유용한 실리카 내부에 서브미크론 미세 패턴 제작 및 36 Gbit/cm^3 의 기록밀도를 가지는 3차원 고집적 광메모리에 대한 실험 결과를 얻었다. 그러나 현재 펄스 레이저가 생산성을 향상시키기 위해서는 높은 출력과 펄스 반복률(Repetition rate)을 가지며 동시에 장기 안정성을 갖는 펄스 레이저의 개발이 이루어져야 한다. 이외에도 가공 속도를 높일 수 있는 레이저 시스템과 가공 기술도 해결해야 될 과제로서 남아있다.

IV. 참고문헌

- 1 이제훈, 서정, 신동식, "극초단 펄스 레이저를 이용한 미세 패턴링기술", 한국레이저가공학회지 vol 7, pp 1-10, 2004
- 2 Miura, J, Qiu, H, Inouye, T, Mitsuyu, and K Hirao, "Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser," Appl Phys Lett, vol 71, pp 3329-3331, 1997
- 3 M Li, M Ishizuka, X Liu, Y Sugimoto, N Ikeda, and K Asakawa, "Nanostructuring in submicron-level waveguides with femtosecond laser pulses," Opt Commun, vol 212, pp 159-163, 2002
- 4 A M Streltsov and N F Borrelli, "Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses," Opt Lett, vol 26, pp 42-43, 2001
- 5 L Gui, B Xu, and T C Chong, "Microstructure in Lithium Niobate by use of focused femtosecond laser pulses," IEEE Photon Technol Lett, vol 16, pp 1337-1339, 2004
- 6 C Florea, "Fabrication and characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses," J Lightwave Technol, vol 21, pp 246-253, 2003
- 7 S H Cho, H Kumagai, K Midorikawa, "Fabrication of multi-core structures in an optical fiber using plasma self-channeling," Optics Express, vol 11, pp 1780-1786, 2003
- 8 Ik-Bu Sohn, Man-Seop Lee, Jung-Yong Chung, Sung-Hak Cho, "Nano structuring of transparent materials by femtosecond laser pulses", Journal of Optical Society of Korea, vol 9, pp 1-5, 2005