

극초단 펄스 레이저 직접 묘화법을 이용한 광소자 제작기술

Photonic Device Fabrication Using Ultrashort Pulse Laser Direct Writing

*.# 최지연, 서경, 이재훈

*.# J. Choi(jchoi@kimm.re.kr), J. Suh, J. H. Lee

한국기계연구원 나노융합시스템생산본부 광응용생산기계연구실

Key words : ultrashort pulse laser direct writing, photonic device fabrication, multiphoton absorption

1. 서론

펄스 레이저를 포함한 극초단 펄스 레이저 기반 가공법이 최근 3차원 마이크로/나노소자 제작을 위한 차세대 제조공정으로 각광을 받고 있다. 본 기술의 장점은 극히 짧은 펄스폭이 제공하는 시간적, 공간적 분해능의 향상을 통해 기존의 광열 현상 기반의 레이저가공이 이룰 수 없었던 회절 한계에 근접하는 가공 정밀도와 품질을 제공하는 것이다. 첫째, 전자-격자간 열전달 시간보다 짧은 펄스폭을 이용하므로 광자-전자 사이의 에너지 흡수과정(빠른 작용)과 열전달(느린 작용)이 분리되어 고려된다. 따라서 조사되는 영역 주변부의 온도가 녹는점 위로 상승하기 전에 가공이 종료되므로 레이저조사로 야기되는 가공부 주변의 열적 변형과 미세 균열을 배제할 수 있다. 둘째, 극초단 펄스 레이저는 강한 집속을 통해 쉽게 $1\text{TW}/\text{cm}^2$ 이상의 높은 레이저 강도를 생성하므로 투명 재질 내부에서 집속된 초점부근에서만 충분한 비선형 광학 흡수를 유도한다. 이를 통해 광자에너지의 흡수를 공간적으로 작은 초점 부피로 한정시킴으로써 공간 분해능을 향상시킨다. 따라서 기존의 리소그래피와 UV 레이저 직접 묘화법이 단일 공정으로 구현할 수 없는 임의의 3차원 구조를 투명 재질 안에 제작할 수 있게 함으로써 소자의 집적화율을 높일 수 있는 방법을 제시하였다. 1996년 Davis et al. 이 실리카 유리 안에 3차원 광도파로를 제작하였으며, 같은 해 Glezer et al. 이 실리카 유리 안에 새긴 3차원 voxel을 기반으로 한 광메모리 소자를 구현할 수 있음을 보임으로써, 본 기술은 유망한 3차원 광소자 제조 기술 중의 하나로 떠오르게 되었다^{1,3}. 본 논문에서는 펄스 레이저를 이용한 3차원 광소자 제작기술에 대해 살펴보고, 본 기술의 유망성과 향후 발전 방향을 가능해보고자 한다.

2. 극초단 펄스 레이저 직접 묘화법

3차원 광소자 제작을 위해서는 (i)가공대상이 되는 광학 소재의 직접 묘화 레이저 파장에 대한 우수한 투과도, (ii)비선형광학흡수를 유도하기 위한 높은 침투출력, (iii)레이저로 개질되는 부위를 좁은 부피 안에 구속하여 3차원 구조물을 구현하기 위한 집속광학계 등의 요소가 충족되어야 한다. 집속된 극초단 펄스 레이저로 유도된 비선형광학 흡수는 물질 내부에 영구적인 물질 변화를 일으키는데, 이러한 변화는 선형흡수가 완전히 배제된 경우 비선형 흡수를 일으키는 레이저 강도의 역치값을 만족하는 초점 부근에서만 일어난다. 따라서 재질 내부에서 마치 “광학펜”과 같이 자유롭게 초점의 위치를 움직여 임의의 3차원 구조를 생성할 수 있다. 그러므로 에너지 밴드갭, 비선형 광학계수 등의 광학적 특성은 소재 선택에서 중요한 요소가 된다. 본 연구에서 광학 소자 제작을 위해 사용된 광학 유리는 fused silica, borosilicate, phosphate, Chalcogenides, 등이 있으며, 각각의 광학적, 열적 특성에 따라 Ti:Sapphire 기반 펄스 증폭기와 Yb 이 도핑된 펄스 광섬유 레이저 시스템이 선택적으로 사용되었다. 표 1은 본 연구를 위해 사용된 레이저들의 사양을 보여준다. 레이저는 objective lens (NA=0.1~0.4)를 이용해서 가공물 내부에 집속되었고, 가공형상은 CCD를 통해 실시간으로 관찰되었다.

3. 광소자 제작

레이저로 유도된 물질의 변화는 광학성질의 변화와 관련된다. 따라서 직접 묘화법으로 생성된 3차원 구조를 통해 전송되는 빛의 경로나 편광방향을 바꾸는 등의 제어가 가능해진다.

Table 1 Specification of femtosecond lasers

laser	Spitfire	μ -Jewel	Custom-built
Laser type	Ti:Sapphire	Yb-doped fiber	Ti:Sapphire
Center wavelength	800 nm	1043 nm	800 nm
Pulse width	~ 120 fs	~ 450 fs	~ 41 fs
Max. pulse energy	~ 1 mJ	~ 3 μ J	~ 20 nJ
Repetition rate	1 kHz	0.1-5 MHz	26 MHz

일반적으로, 조사되는 레이저 강도에 따라 세가지 유형의 구조 변화를 일으키는데 (i) 등방성 굴절을 변화, (ii)비등방성 굴절을 변화, (iii) void 생성으로 분류할 수 있다. 이러한 영구적인 광학특성의 변화를 기반으로 투명 재질 내부에 다양한 광소자를 제작할 수 있는데 예를 들어 유형 1의 변화를 이용해 3차원 광도파로, 광분배기, 회절광학소자들을 제작할 수 있으며 유형 2의 변화를 통해 빛의 편광에 따라 광전송 특성이 달라지는 편광소자를 제작할 수 있다. 유형 3은 광메모리, 광유체채널등을 제작하는데 유리하다. 그림 1은 본 기술에 의해 제작된 회절광학소자의 한 예로써 프레넬 렌즈의 광학 현미경 사진을 보여준다. 마이크로 소자를 제작함에 있어 부피가 크고 두꺼운 굴절렌즈를 얇은 판형의 프레넬 렌즈로 대체하게 되면 소자의 크기와 부피를 줄일 수 있어 제품의 경량화와 집적화를 이룰 수 있다⁴. 본 소자들은 미래의 광통신, 광학 컴퓨터, 광MEMS 소자의 핵심부품이 되며 자유로운 3차원 구조의 형상이 가능해지므로 새로운 유형의 마이크로/나노 광소자를 제작하기에 유리하다.

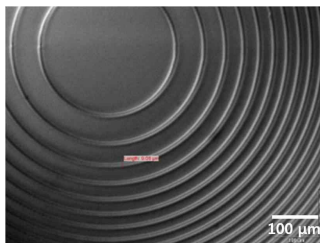


Fig. 1 Optical microscope image of a femtosecond laser direct written Fresnel zone plate embedded in borosilicate glass

4. 결론

본 논문에서는 극초단 펄스 레이저를 이용한 3차원 광소자 제작 기술의 개요와 이를 가능하게 하는 비선형 광학 흡수기전의 특성 및 유형에 대해 논의하였다. 3차원 광소자 제작기술은 앞으로 마이크로/나노 크기의 고집적 고기능 차세대 광통신, 광MEMS, 센서 개발을 위한 집적기술의 핵심이라고 할 수 있다. 다양한 광학 소재 개발과 레이저, 광학기술의 진보에 의해 현재 직면하고 있는 가공한계를 극복할 수 있으며 이를 위해서는 물리학, 광학, 재료과학, 전자공학의 긴밀한 협력이 필요하다.

후기

본 연구에 사용된 FCPA μ Jewel D-400-VR 레이저는 IMRA America Inc.와 Mr. A. Arai 의 도움으로 제공받았으며 본 연구는 미국 플로리다 주와 National Science Foundation 과제 번호 ECS 0427614에 의해 부분적으로 지원되었습니다.

참고문헌

1. Davis, K., Miura, K. Sugimoto, N., and Hirao, K., "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser", Opt. Lett., Vol. 21, No. 21, pp. 1729-1731, 1996.
2. Glezer, E N, Milosavljevic, M, Huang, L, Finlay, R J, Her, T H, Callan, J P, Mazur, E., "Three-dimensional optical storage inside transparent material", Opt. Lett. Vol. 21, No. 24, pp. 2023-2025, 1996
3. Gattass, R. and Mazur, E., "Femtosecond laser micro-machining in transparent materials", Nature. Photon., Vol. 2, No.4, pp. 219-225, 2008.
4. Choi, J., Rammme, M., Anderson, T., and Richardson, M. "Femtosecond laser written embedded diffractive optical elements and their applications", Proc. SPIE, San Jose, USA, 2010.