특집 ■ MEMS

# 펨토초 레이저의 템포럴 집광 (temporal focusing)을 이용한 3차원 마이크로 구조물의 제작

장윤호*

반도체 공정 기술을 이용한 MEMS 소자의 제작은 기존의 공정 기술과 MEMS에 특화된 공정 개발에 힘입어 다양한 응용 분야를 개척하고 있다. 하지만 이러한 공정 기술의 기본 바탕은 물질의 적층, 포토 마스크를 통한 패터닝, 그리고 이후에 진행되는 식각에 바탕을 두고 있기 때문에 3차원 마이크로 구조물의 제작은 공정이 복잡해지고 비용이 증가하는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 펨토초의 펄스폭을 가지는 펄스레이저를 이용하여 3차원 구조물을 곧바로 제작하는 방법이 제안되고 연구되어 왔다 [1]. 이 방법을 통하여 임의의 형상을 가지는 3차원 마이크로 구조물을 제작하는 것이 가능하지만 3차원 공간상의 화소(voxel)를 순차적으로 형성해야 하므로 포토 마스크를 이용하여 하나의 층을 한번에 형성하는 기존의 방법에 비교해 공정시간이 기하급수적으로 증가하므로 이를 상업적으로 이용하기 힘든 단점이 있었다. 본 글에서는 펨토초 레이저를 이용한 3차원 마이크로 구조물의 형성 공정에서의 속도 향상을 위한 방법을 기술하고자 한다.

펨토초 레이저는 펄스 폭이 수십에서 수백 펨토초인 펄스레이저를 일컫는다. 많이 구현되는 방법중에 하나는 타이타늄이 첨가된 사파이어 결정(Titanium-sapphire)을 증폭 매질(gain medium)로 이용하는 것이다. 이를 통하여 일반적으로 100펨토초의 펄스폭을 가지는 펄스를 80 MHz의 주파수로 얻을 수 있다. 평균 출력이 보통 1W 이므로 하나의 펄스는 12.5nJ의 에너지를 가지게 되고, 개별 펄스 출력은 125 kW에 달하게 된다. 이와 같은 높은 펄스 출력의 레이저를 집광하게 되면 초점이 맺히는 3차원 공간상의 화소에서만 여러 개의 광자가 동시에 반응에 참여하게 되어 투포톤(Two photon) 혹은 멀티포톤(Multi-photon) 효과를 발생시키게 된다 . 또한 초점이외의 공간에서는 레이저에 의한 영향이 최소화되므로 레이저에 의

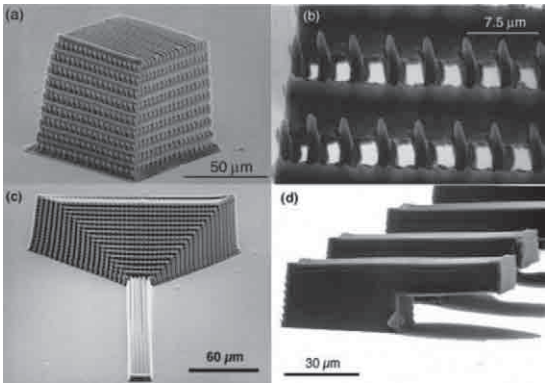


그림 1. 투포톤 제조공정을 이용한 마이크로 구조물의 제작 [3].

* FemtoFab, Inc.

한 주변 영향을 최소화할 수 있다. 투포톤의 실제 연구는 펄스 레이저의 개발에 의해 저변이 확대 되었고 현미경에의 응용으로 연구가 활발해졌지만, 동일한 원리를 이용하여 3차원 공간상의 미세 화소에만 광여기 중합반응(photo-polymerization)을 통한 구조물을 제작할 수 있다 [2, 3]. 그림 1은 투포톤 미세 공정을 이용하여 1㎛ 수준의 해상도를 가지고 임의의 모양을 가지는 3차원 마이크로 구조물의 제작의 예를 보여준다. 3차원 미세 제조 공정은 현미경에서 사용되는 광여기 반응에 추가하여 중합반응이 또 다른 비선형 반응이므로 최대 수십 나노미터 수준의 미세 구조물의 형성이 가능하다 [4]. 이러한 특징으로 임의의 3차원 마이크로 혹은 나노 구조물을 제작하는 것이 가능하여 광결정 구조 등의 제작도 가능하다.

하지만 3차원 미세 공정의 장점에도 불구하고 투포톤 공정이 다양한 응용 분야를 찾지 못하는 이유는 몇 가지 단점으로 설명될 수 있다. 우선 기존의 투포톤 미세 공정은 3차원상의 화소를 순차적으로 중합반응하므로 속도적인 측면에서 포토마스크를 이용하여 하나의 층(layer)을 한번에 형성하는 방법에 비해 현저하게 느리다는 문제점이 있다. 재료적인 측면에서는 사용가능한 물질이 제한적이고 낮은 투포톤 효율 등도 문제점으로 볼 수 있다. 본 글에서는 이러한 문제점 중에 기존의 투포톤 중합반응의 느린 속도를 개선할 수 있는 방법에 대한 연구를 소개하고자 한다.

템포럴 집광(Temporal focusing) 방식은 펨토레이저의 펄스를 주파수별로 분해하고 이를 대물렌즈를 통과시키면서 샘플 위치에서 다시 집광하는 방식을 일컫는다 [5, 6]. 이와 같은 방법을 이용하게 되면 대물렌즈의 초점 위치 한 점에서만 투포톤 현상이 일어나는 것이 아니라 초점 위치의 일정한 면적에서 투포톤 현상을 만들 수 있다. 즉 기존의 방식이 공간적으로만 집광을 하는 것이라면 템포럴 집광은 레이저를 파장별로 분해하고 이를 공간적으로 겹치게 하는 것이다. 따라서 대물렌즈의 초점거리에서만 모든 파장이 겹치게 되어 투포톤 효과를 낼 수 있는 광밀도를 얻을 수 있고 다른 위치에서는 파장들이 서로 다른 각도를 가지고 퍼지게 되므로 3차원공간상에서 특정 위치에만 투포톤 효과를 얻을 수 있는 것이다. 또한 공간적인 집광만을 이용하여 광밀도를 얻는 것이 아니므로 임의의 면적을 가지는 레이저를 조사할 수 있어3차원상의 임의의 깊이와 면적에서 투포톤 효과를 얻을 수 있다. 이를 공간시간집광 (spatio-temporal focusing)이라고도 부른다.

그럼 템포럴 집광을 통하여 투포톤 효과를 얻을 수 있는 면적을 간단한 수식을 통하여 계산해 보고 문제점 및 개선점을 알아 보도록 하겠다. 앞서 일반적인 펨토초 레이저는 평균 출력 1W, 펄스주파스 80MHz, 펄스폭 100 펨토초의 특징을 가진다고 언급하였다. 이를 통하여 하나의 펄스의 출력은 대략 125kW 수준이며 이러한 강한 출력이 100 펨토초의 아주 짧은 시간동안 발생한다. 이러한 레이저를 높은 조리개값(high numerical aperture)를 가지는 대물렌즈로 집광해서 투포톤 현상을 얻게 된다. 투포톤이 일어날 확률은 아래의 식으로 간단하게 표현할 수 있다 [2].

$$\Pr \propto \delta(\frac{\lambda}{hc})^2 \frac{p_o^2}{f^2 \tau} \frac{1}{L^4} \quad (1)$$

여기서 δ는 투포톤 상수, λ는 레이저의 파장(보통 800nm), $h$는 플랑크상수, $c$는 빛의 속도, $p_0$는 레이저의 평균출력, τ는 레이저의 펄스폭, $f$는 펄스의 주파수, 그리고 $L$은 레이저가 조사되는 면적의 한변의 길이이다. 즉 레이저의 파워의 제곱에 투포톤 효과가 발생할 확률은 비례해서 증가하고, 반면에 펄스 주파수의 제곱, 펄스폭 혹은 한변의 길이의 네제곱에 비례해서 투포톤의 확률은 감소하게 된다. 투포톤 상수를 $40GM(40\times40^{-58}m^4s)$으로 가정하면 수식 (1)을 통하여 대략 초당 5 마이크로 사각형 면적에 투포톤 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 크기가 작은 마이크로 구조물의 경우 포토마스크를 교체하고 여러 번의 노광을 반복하여 제작이 가능하였다 [7]. 단순한 공간 집광에 의한 투포톤 면적이 1 마이크로 이하라고 가정하면 템포럴 집광을 통하여 약 25배 이상의 속도 향상을 얻을 수 있는 것이다. 하지만 넓은 면적의 마이크로구조물을 형성하기에는 여전히 실용적이지 못하다. 이를 극복하기 위한 방법으로 수식(1)을 살펴보면 투포톤 상수 혹은 평균 출력을 증가시키거나 펄스주파수 혹은 펄스폭을 감소시켜 하나의 펄스가 만들어 내는 순간출력을 증가시키는 방법이 있다. 최근 들어 투포톤 상수값을 기존의 10배이상 향상시키는 연구도 발표되었으나 기존의 물질을 사용하기에는 한계가 있다. 본 글에서는 펄스의 순간 출력을 증가시켜 투포톤 면적을 증가시키는 방법을 이용하여 투포톤 미세공정의 속도를 향상시키는 연

# 펨토초 레이저의 템포럴 집광(temporal focusing)을 이용한 3차원 마이크로 구조물의 제작

구를 진행하였다.

기존의 펨토초레이저의 펄스를 재생증폭기(regenerative amplifier)에 통과시키게 되면 펄스폭은 같은 수준 혹은 감소시키면서 펄스 에너지를 크게 증폭시킬 수 있다. 재생증폭기는 증폭매질을 펌프레이저로 여기시킨 상태에서 앞서 생성된 펄스를 여러번 통과시켜 그 에너지를 증가시키는 방법이다. 이 과정을 통하여 최종 형성되는 펄스는 보통 1kHz의 펄스주파수, 50 fs 펄스폭, 그리고 4W의 평균 출력을 가지게 된다. 따라서 기존의 펄스당 에너지는 12.5nJ에서 4mJ로 크게 증가하게 되고 펄스의 순간 출력도 125kW에서 80GW로 64만배 증가하게 된다. 이 수치를 가지고 수식(1)을 통하여 계산해 보면 초당 3.8mm길이의 사각형 면적을 여기시킬 수 있다. 물론 이러한 계산은 실제 시스템을 구현할 때 작용하는 다른 변수들에 의해 감소하게 되지만 재생 증폭기를 사용하여 패터닝 속도를 크게 증가시킬 수 있고 템포럴 집광을 통한 3차원 마이크로 구조물의 제조 공정이 실용적인 속도에서 가능하다는 것을 짐작할 수 있다. 재생증폭기를 통해 증폭된 펄스 에너지는 하나의 펄스를 이용하여 중합반응을 일으켜 마이크로 구조물을 만드는 것 또한 가능하다 [8].

실제 시스템을 구현하기 위해서 그림 2와 같은 광학 시스템을 구현하였다. 시스템의 최적화를 위해 몇 가지 요소를 먼저 검토할 필요가 있다. 우선 임의의 마이크로 구조물을 만들기 위해서 마이크로 미러 어레이(Digital Micromirror Device, Texas Instrument)를 이용하여 실시간으로 원하는 패턴을 출력하였다. 또한 재생증폭기에서 나오는 출력은 펄스당 에너지가 mJ수준이므로 모든 광학 부품이 최고 출력에서 사용가능하지 않다. 구현된 시스템에서는 DMD와 대물렌즈가 출력을 제한하는 부품이라는 것을 확인하였고 4W의 출력중에 대략 1W의 출력만이 실제 사용되었다. 더불어 사용되는 광학부품의 입출력 효율로 인하여 최종 샘플에 전달되는 에너지는 이보다 감소하게 된다. 그림 2의 시스템의 개략적인 설명은 아래와 같다. 재생증폭기에서 나오는 레이저 펄스의 직경을 대략 5mm 크기로 축소시킨 다음 이를 공간상에서 균일한 세기를 가지도록 렌즈를 사용하여 변환시킨다. 변환렌즈의 초점거리는 500mm 정도이며 이 초점거리에 DMD를 위치시켜 레이저의 공간상의 세기를 임의의 패턴으로 형성하게 된다. 이후 레이저 펄스는 회절격자를 통하여 파장별로 분리되게 되고 대물렌즈를 통과시키게 되면 DMD에서 형성된 패턴이 샘플 위치에 표시되게 된다. 최종 샘플에서 패터닝되는 면적은 사용되는 렌즈의 조합으로 결정되며, 현재 시스템은 대략 0.33 x 0.30 $mm^2$의 면적을 가진다. DMD 하나의 픽셀은 샘플의 위치에서 대략 0.3㎛ 크기를 가지게 된다. 제작가능한 최소 선폭은 대략 2.4㎛ 이며 하나의 면적은 0.1초 시간의 노광으로 형성된다.

제작된 시스템으로 마이크로 구조물을 형성하기 위해서는 몇 가지 추가 최적화 과정이 필요하다. 첫번째로는 공간상 레이저의 균일도의 문제이다. 변환렌즈를 통하여 일차적으로 레이저 세기의 공간 균일도를 확보하였으나, 레이저에 애초에 존재하는 공간상의 잡음 성분은 제거가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 DMD를 이용하여 잡음 성분을 추가적으로 제거하였다. 하지만 DMD의 출력 속도와 재생 증폭기의 펄스 주파수가 정확하게 동기화되지 않으면 실제 제작되는 구조물의 공간상의 높낮이가 존재하게 된다. 두번째 문제로는 여러 개의 패턴을 형성하는 경우 나중에 패턴되는 영역이 이전에 패턴된 영역으로부터 영향을 받는 것이다. 이를 보완하기 위해서 패턴 사이의 관계를 이용하여 현재 패턴의 공간상 세기를 보정하는 방법을 사용하였다.

제작된 시스템을 통하여 실제 3차원 마이크로 구조물의 제작 가능성을 확인하기 위하여 3차원상에 배치된 미세 와이어 구조를 설계하고 제작하였다. 패터닝에 사용된 조건은

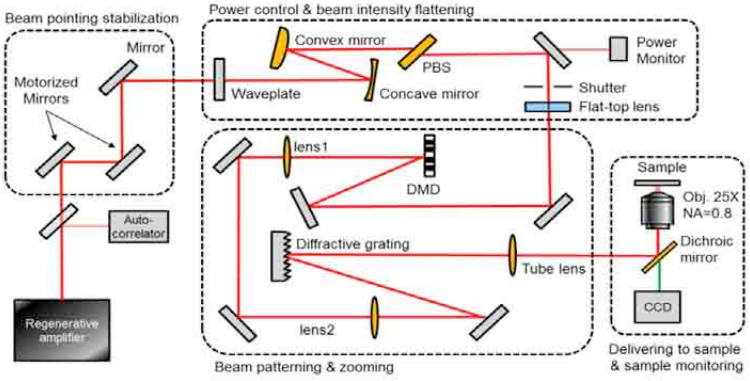


그림 2. 재생증폭기와 템포럴 집광을 이용한 3차원 마이크로 구조물 제작 시스템의 개략도

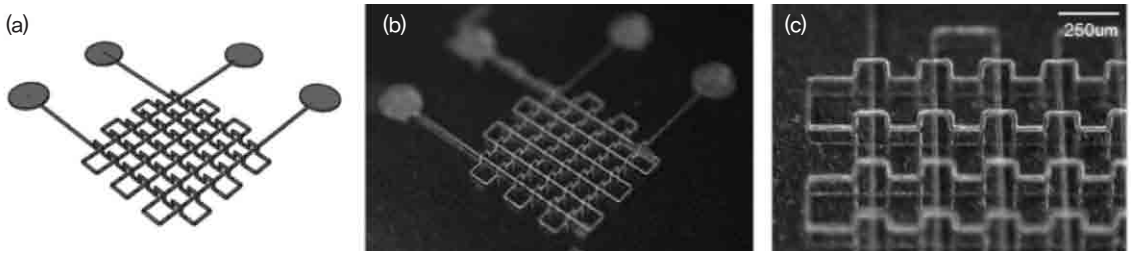


그림 3. 3차원 와이어 구조의 설계와 제작. (a) 캐드 디자인, (b) 제작된 구조물의 사진, (c) 3차원 공간 와이어 구조의 확대 사진

샘플 위치에서의 레이저 출력은 38mW이었고, 2㎛의 높이당 0.1초의 노광시간을 사용하였으며, 한번에 패터닝되는 면적은 0.1mm²이었다. 그림 3의 구조를 패터닝하는 시간은 대략 15분 정도 소요되었고 중합되지 않은 폴리머를 제거하고 최종 구조물을 얻기 위해 대략 10분의 시간이 추가 소요되었다.

제작된 구조에서 미세 와이어는 직경 50㎛ 이며 교차하는 와이어는 수직 방향으로 150㎛ 분리되어 형성되어 있어 두 개의 와이어는 물리적으로 분리되어 있다. 이 구조는 마이크로채널 소자의 제작에 사용되는 몰드구조로 설계 제작되었다. 실제 마이크로 채널 구조를 폴리머를 이용하여 곧바로 패터닝이 가능하나 패터닝 이후에 채널 내부의 폴리머를 제거하기 위해서는 상당한 시간이 소요되므로 몰드구조를 만들고 이를 다른 물질로 전사시키는 방법으로 연구를 진행하였다.

본 글에서는 3차원 마이크로 구조물의 제작을 위한 투포톤 미세공정에 대해서 언급하고 느린 공정 속도를 개선하기 위한 재생 증폭기를 사용한 템포럴 집광 방법과 구현 방법에 대해서 서술하였다. 또한 임의의 형상을 제작하기 위하여 DMD를 이용하여 실시간으로 패턴을 출력하였다. 구현된 시스템으로 최소 선폭 2.4㎛와 패터닝 속도 1mm²/sec을 얻을 수 있었으며 향후에 시스템 최적화를 통하여 제작 속도를 추가로 향상 시킬 수 있으리라 예상된다. 10mm 크기의 3차원 마이크로 채널 몰드 구조의 경우 수십분 내외로 패터닝이 가능하므로 현재의 시스템으로 마이크로 유체소자에서의 3차원 마이크로 구조물을 제작하는 것이 가능하고 향후에 제작 속도를 추가로 향상시킨다면 보다 다양한 응용 분야를 찾을 수 있으리라 기대한다.

## 참고문헌

[1] S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata, "Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization," Optics Letters, vol. 22, pp. 132-134, 1997.

[2] W. Denk, J. H. Strickler, and W. W. Webb, "Two-photon laser scanning fluorescence microscopy," Science, vol. 248, p. 73, 1990.

[3] B. H. Cumpston, S. P. Ananthavel, S. Barlow, D. L. Dyer, J. E. Ehrlich, L. L. Erskine, A. A. Heikal, S. M. Kuebler, I.-Y. S. Lee, and D. McCord-Maughon, "Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication," Nature, vol. 398, pp. 51-54, 1999.

[4] D. Tan, Y. Li, F. Qi, H. Yang, Q. Gong, X. Dong, and X. Duan, "Reduction in feature size of two-photon polymerization using SCR500," Applied Physics Letters, vol. 90, p. 071106, 2007.

[5] G. Zhu, J. Van Howe, M. Durst, W. Zipfel, and C. Xu, "Simultaneous spatial and temporal focusing of femtosecond pulses," Optics Express, vol. 13, pp. 2153-2159, 2005.

[6] D. Oron, E. Tal, and Y. Silberberg, "Scanningless depth-resolved microscopy," Opt. Express, vol. 13, pp. 1468–1476, 2005.

[7] D. Kim and P. T. C. So, "High-throughput three-dimensional lithographic microfabrication," Optics Letters, vol. 35, pp. 1602-1604, 2010.

[8] G. Witzgall, R. Vrijen, E. Yablonovitch, V. Doan, and B. J. Schwartz, "Single-shot two-photon exposure of commercial photoresist for the production of three-dimensional structures," Optics Letters, vol. 23, pp. 1745-1747, 1998.

약 력

**장윤호**

저자는 서울대학교 전기컴퓨터공학부에서 마이크로미러에 대한 연구로 박사 학위를 받고 현재 미국 보스톤 소재 FemtoFab, Inc.에서 3차원 미세 가공 기술에 대한 연구 및 사업화를 진행하고 있다.