

펨토초 레이저를 이용한 미세 PR 패터닝

Femtosecond Laser Lithography for Maskless PR Patterning

손익부¹, 고명진¹, 김영섭¹, 노영철^{1,✉}
Ik-Bu Sohn¹, Myeong-Jin Ko¹, Young Seop Kim¹ and Young-Chul Noh^{1,✉}

¹ 광주과학기술원 고등광기술연구소 (Advanced Photonics Research Institute, GIST)
✉ Corresponding author: ycnoh@gist.ac.kr, Tel: 062-970-3386

Manuscript received: 2008.7.21 / Revised: 2009.1.20 / Accepted: 2009.2.16

Development of maskless lithography techniques can provide a potential solution for the photomask cost issue. Furthermore, it could open a market for small scale manufacturing applications. Since femtosecond lasers have been found suitable for processing of a wide range of materials with sub-micrometer resolution, it is attractive to use this technique for maskless lithography. As a femtosecond laser has recently been developed, both of high power and high photon density are easily obtained. The high photon density results in photopolymerization of photoresist whose absorption spectrum is shorter than that of the femtosecond laser. The maskless lithography using the two-photon absorption (TPA) makes micro structures. In this paper, we present a femtosecond laser direct write lithography for submicron PR patterning, which show great potential for future application.

Key Words: Femtosecond Laser Ablation (펨토초 레이저 가공), Photoresist (포토레지스트), PR Patterning (패터닝), Maskless Lithography (리소그라피)

1. 서론

포토리소그라피(Photolithography)는 마이크로와 나노 가공과 패터닝 기술에 있어 전통적인 방법으로 사용되고 있다. 포토리소그라피는 PR(Photoresist) 층에 레이저 빔을 포토마스크(Photomask)를 통하여 빛을 조사한다. 원하는 마스크 패턴 모양대로 빔을 조사하여 PR 패터닝을 할 수 있으며 해상도를 높이기 위해 파장이 짧은 자외선(UV: Ultraviolet) 레이저가 사용된다. 회절한계(Diffraction limit)에 따라서 레이저의 파장은 짧아지고 있으며 극자외선(EUV: Extreme Ultraviolet)이나 X-선 리소그라피에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 포토마스크의 선폭(Resolution)을 향상 시키기 위해 위상천이 마스크(Phase-shift mask)와 같은 것들이 개발되었

으며 마스크 프로젝션(Mask projection)을 통하여 샘플 표면 전체에 패터닝이 가능하게 되었다. 그러므로 현재 포토리소그라피 기술은 패터닝 기술의 선두주자이다. 그러나 리소그라피 공정장비와 마스크 세트의 가격이 비싸기 때문에 최근에는 대체 패터닝 기술에 대한 요구가 증폭되고 있다. 리소그라피를 통해서 마스크 가격문제를 해결할 수 있다면 미세 가공 응용에서는 좀 더 효율적일 것이다. 펨토초 레이저는 이러한 마스크를 사용하지 않고 회절한계를 극복하여 PR을 패터닝하는 것이 가능하다.¹⁻³ 가공 샘플의 어블레이션 임계값(Threshold) 보다 조금 높은 레이저 펄스 에너지로 빔의 중심부분으로 가공을 하게 되면 펄스폭(Pulse width)이 극히 짧은 펨토초 레이저 펄스의 비선형 효과에 의하여 회절한계 이하 선폭을 얻는 것이

가능하다.^{4,6}

본 논문에서는 포토마스크를 사용하지 않고 펄스 레이저를 이용하여 PR 을 직접 어블레이션 하여 패터닝 하는 방법과 리소그래피 기술을 접목하여 서브마이크론 크기의 선폭으로 PR 패터닝 하는 방법을 실험적으로 보이고 비교하였다. 가공된 PR 패턴들은 광학현미경(Optical microscope)과 SEM(Scanning electron microscope)으로 측정하였으며 레이저 펄스 에너지와 펄스 수(Number of pulse)가 PR 선폭에 주는 영향을 분석하였다. 끝으로 직선(Line), 곡선(Circle), 점(Dot) 형태의 PR 패터닝을 하여 펄스 레이저 리소그래피 기술의 다양한 응용 가능성을 보여준다.

2. 펄스 레이저 가공 시스템

그림 1 은 고등광기술연구소 미세광학연구실에서 보유하고 있는 펄스 레이저 가공 시스템 개념도이다. 펄스 레이저는 파장이 785nm, 펄스폭이 184fs, 펄스 반복률이 1kHz, 그리고 최고 펄스 에너지는 1mJ 인 사이버레이저사의 IFRIT 모델을 운용하고 있다. 펄스 레이저 가공 시스템은 2 차원 가공 영상을 통하여 모니터링 하는 비전(Vision) 시스템, 3 차원 정밀 구동 스테이지와 동기화된(Synchronized) 펄스 레이저 펄스 제어 장치, 펄스 세기 조절 장치들로 구성되어 있다. 다양한 형태의 가공 프로그램과 CAD 프로그램을 이용한 3 차원 가공이 가능하다. 본 논문에서는 서브마이크론 크기의 PR 패터닝을 위해서 310nm-440nm 파장 영역에서 흡수율이 높은 AZ GXR 601 PR 이 사용되었다. 깨끗한 실리카(Silica) 기판 위에 스핀 코팅기를 이용하여 먼저 HMDS(Hexa Methyl Di Silazane)를 코팅하고 이어서 PR 은 5000~6000 rpm 속도로 코팅하였다. HMDS 와 PR 전체 두께는 1.7 μm 정도로 다소 두껍게 코팅 되었음을 단면 사진을 통해 확인 하였다. 그 이후에 섭씨 90 도에서 30 초간 PR 을 약하게 베이킹(Baking) 하여 샘플을 완성 하였다.

PR 패터닝 방법에는 그림 2(a)에서와 같이 기존의 적외선 레이저와 포토마스크를 이용한 포토리소그래피 기술이 있다. 회절한계에 의한 선폭을 줄이기 위해서 자외선 레이저의 파장은 점점 짧아지고 있으며 포토마스크를 사용하지 않는 직접 패터닝에 대한 관심도 높아지고 있다. 펄스 레이저를 이용한 PR 패터닝에는 두 가지 방법이 있다.

그림 2(b)와 같이 펄스 레이저 어블레이션(Ablation)을 이용한 직접 가공 방법과 그림 2(c)의 펄스 레이저 리소그래피 기술이다. 펄스 레이저를 이용하여 극히 높은 침투출력에 의한 비선형 현상인 이광자 흡수(Two-photon polymerization)에 의해서 회절한계 이하의 선폭과 포토마스크를 사용하지 않는다는 장점이 있다.⁷ 펄스를 이용하여 PR 에 조사하고 현상(Developing) 과정을 거치는 리소그래피 기술은 어블레이션에 의한 직접 PR 패터닝에 비해 복잡해 보인다. 펄스 레이저 어블레이션을 이용한 직접 PR 패터닝 방법은 적절한 파장의 레이저 어블레이션을 통해 원하는 패터닝을 하게 되면 현상 과정을 생략 할 수 있다. 이러한 프로세스는 고체 상태의 물질에 가능하다. 현재는 펄스를 이용한 PR 제거 선폭이 1μm 까지 가능하다.

3. 펄스 레이저 PR 패터닝

3.1 펄스 레이저 PR 어블레이션

펄스 레이저 어블레이션을 이용한 직접 PR 패터닝의 이러한 장점들에도 불구하고 왜 펄스 레이저 리소그래피 방법을 사용하는지 알아보자. 그림 3 은 펄스 레이저를 이용한 PR 직접 어블레이션 방법으로 가공한 실험의 SEM 측정 사진이다. 800 nJ 의 펄스 에너지를 가지는 펄스 레이저 빔을 50 배율(NA=0.42) objective lens 를 통하여 집광하여 50 μm/s 속도로 이송하며 가공 하였다. 그림 3 의 SEM 사진에서와 같이 PR 이 뜯겨지는 현상과 debris 발생 문제가 있으며, 이러한 문제들은 리소그래피 공정을 통하여 debris 가 없는 깨끗한 형태의 가공이 가능하며 PR 이 뜯겨지는 현상이 없이 선폭을 줄이는 효과가 있다.

또한, 코팅되는 PR 층의 두께를 조절하여 서브마이크론 사이즈의 다양한 선폭을 얻을 수 있는

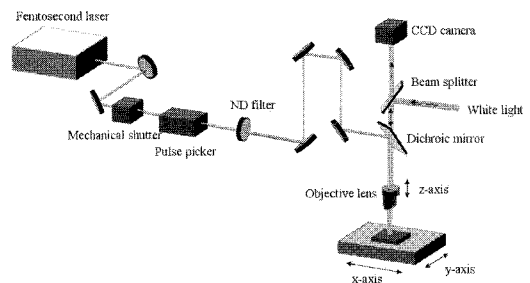


Fig. 1 Femtosecond laser processing system

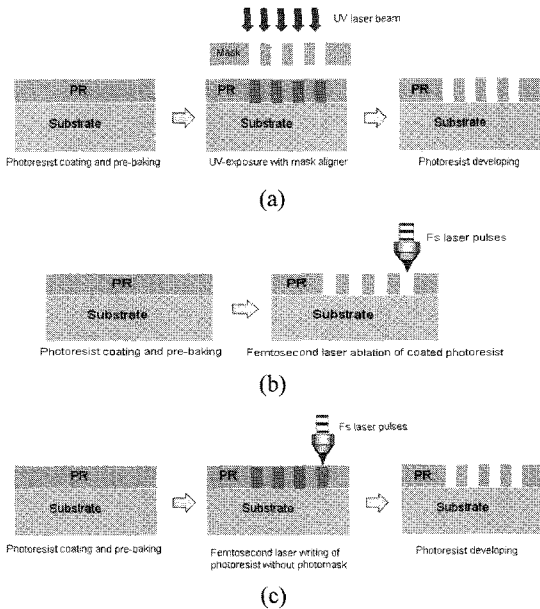


Fig. 2 Schematic diagram of PR patterning methods: (a) conventional optical lithography, (b) fs laser direct ablation and (c) fs laser lithography

장점이 있다

3.2 펨토초 레이저 리소그래피

펨토초 레이저 리소그래피 기술은 먼저 펨토초 레이저 펄스를 포토마스크를 사용하지 않고 PR 에 직접 조사하게 되면 이광자 흡수에 의하여 펨토초 레이저 펄스가 조사된 부분에 경화(Polymerization)가 이루어지게 된다. 그 이후에 현상(Development) 공정을 통하여 경화된 PR 은 제거가 되어 원하는 형태의 PR 패턴을 할 수 있다. 비선형 광학 현상의 하나인 이광자 흡수는 특정 주파수의 광자를 흡수하는 원자나 분자에 대해 동시에 각기 흡수 광자의 주파수의 반에 해당하는 주파수를 갖는 두 개의 광자가 흡수될 때 그 원자나 분자가 여기되는 현상을 말한다. 이러한 현상은 두 개의 광자가 동시에 흡수될 확률이 높은 매우 높은 광자 밀도를 갖는 빛에서 일어난다. 근래에 극초단 레이저의 개발로 인해 매우 높은 광자 밀도를 요구하는 이광자 흡수 현상을 쉽게 재현할 수 있다. 이러한 현상을 폴리머의 광중합 등에 응용함에 있어서 나노 기술로서 커다란 두 가지 장점을 갖는다. 첫 번째는 이광자 현상 자체가 매우 낮은 흡수 단면적을 갖고 있고, 또 이 현상이 일어날 문턱세기

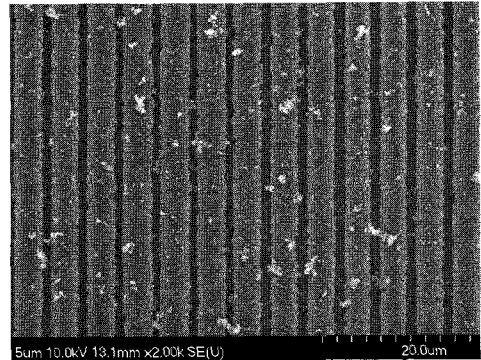
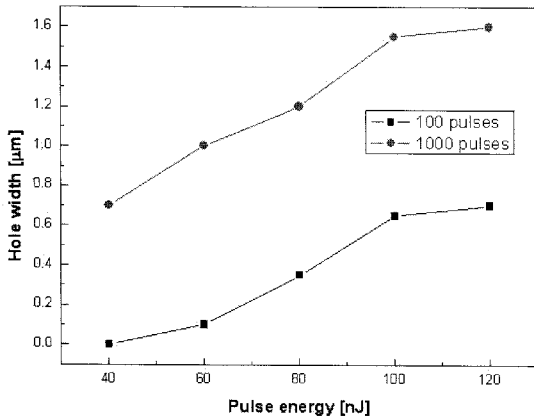


Fig. 3 SEM image of PR patterns directly ablated by femtosecond laser pulse with a pulse energy of 800nJ and scan speed of 50µm/s

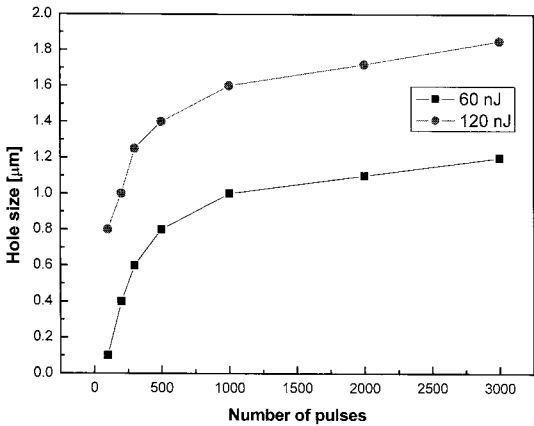
또한 상대적으로 높기 때문에 조사되는 빛의 방향과 크기를 잘 조절하면 회절한계에 전혀 제한되지 않는 작은 크기를 만들 수 있다. 또 다른 장점은, 이광자 흡수를 일어나게 하는 빛의 파장 그 자체는 동시에 광자가 흡수되지 않는 한 이 현상이 일어나지 않으므로, 초점으로 모아지는 빛의 진행방향에 대해서 원하는 부분을 초점에 일치시켰을 때 광자 밀도의 제공에 비례하여 물질이 반응하고 오직 광자 밀도가 높은 초점 근방에서만 이광자 흡수 광중합반응을 일으킬 수 있어 회절한계를 극복하여 매우 좁은 선폭의 가공이 가능하다는 장점이 있다.^{8,9}

본 연구에서는 펨토초 레이저 리소그래피 기술을 통하여 펄스 에너지와 펄스 수에 따른 특성을 실험적으로 분석하였다. 100 개와 1000 개의 펄스를 각각 연속적으로 같은 지점에 조사하여 PR 층이 완전히 경화되도록 하고 현상하였다. 현상 시간은 약 20 초 정도였으며 현상용액(Developer)은 AZ 300 MIF 를 사용하였다. 이렇게 펄스 수를 100 와 1000 개로 고정해 놓은 상태에서 조사되는 펄스의 에너지를 조절하였다. 그림 4(a)는 이렇게 얻은 펄스 에너지에 따른 제거된 PR 층의 홀(Hole)의 폭(Width)에 대한 그래프이다. 가공된 PR 패턴들은 광학현미경과 SEM 으로 측정 되었다. 펄스 에너지를 높이면 PR 층이 제거되는 홀의 폭이 증가하게 되며, 펄스 에너지가 100nJ 이하일 때는 선형적으로 PR 홀의 폭이 커지지만 120nJ 부터는 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

이와 같이 코팅된 PR 층의 두께가 1.7µm 인 경우에 0.9µm 이하의 선폭에서는 일정한 크기의 패



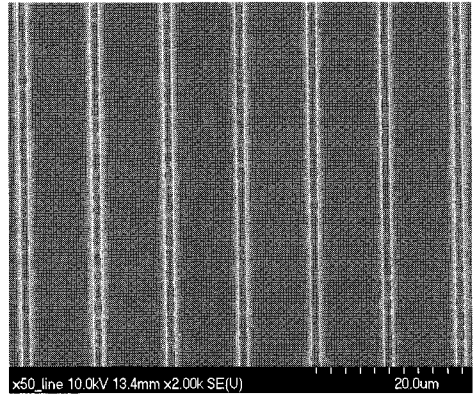
(a)



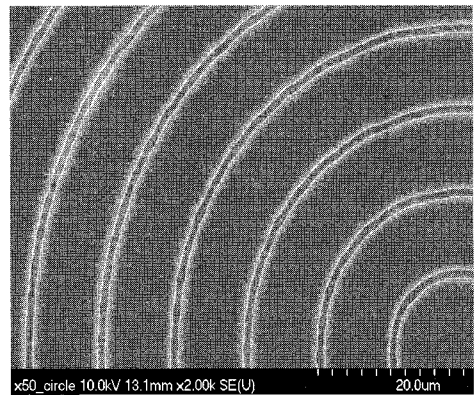
(b)

Fig. 4 Dependence of lithography hole width on (a) laser pulse energy at 100 and 1000 pulse shot and (b) number of pulses at a laser pulse energy of 60 and 120nJ, respectively

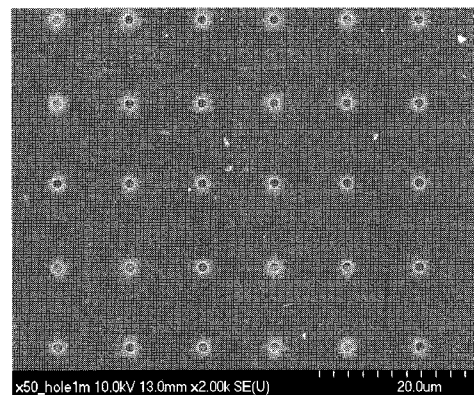
턴을 얻기가 어려웠으며 0.9 μm 에서 1 μm 정도가 균일한 패턴을 얻기에 무난한 최소 선포이였다. PR 패턴의 선포를 줄이기 위해서는 코팅되는 PR 층의 두께를 얇게 하거나 PR 의 농도를 낮게 함으로써 가능하다. PR 층의 두께가 얇아지면 PR 층을 완전히 경 화하여 패턴링 하는데 필요한 펄스 에너지가 작아져서 선포를 줄일 수가 있다. 마찬가지로 조사되는 펄스 레이저 펄스 수도 중요한 파라미터(Parameter)이다. 펄스 하나를 조사하여(single shot) 1.7 μm 두께의 PR 층을 완전히 경화하기는 어렵다. 이를 위해서 펄스 에너지를 높게 되면 ablation threshold 를 쉽게 넘게 되어 PR 이 직접 가공(ablation)이 되어 가공 선포이나 특성이 나빠지



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 SEM images of PR patterns fabricated by a fs laser lithography: (a) line patterns and (b) circular patterns at a laser pulse energy of 65nJ and a writing speed of 10 $\mu\text{m}/\text{s}$, and (c) dot patterns at a laser pulse energy of 60nJ and a pulse number of 1000

게 된다. 펄스 에너지를 높이면 ablation 이 되기 때문에 PR 층의 두께를 매우 줄이던지 아니면 여러 개의 펄스를 연속적으로 조사하여 PR 층을 완전히 경화되도록 하여야 한다. 낮은 여러 개의 펄스를 조사하여 PR 층을 경화와 현상을 통하여 패터닝 하게 되면 진원도와 aspect ratio 가 높아진다. 그러나 펄스 수에 따라서 완전히 포화되지는 않고 어느 정도 지속적으로 홀의 직경이 커지게 되므로 적당한 펄스 에너지와 펄스 수를 사용하는 것이 중요하다. 그림 4(b)에서는 레이저 펄스 에너지를 60nJ 과 120nJ 로 고정하고, 펄스 수를 조절하여 가공되는 PR 홀의 폭이 실험적으로 확인하였다. 이와 같이 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 이용하여 1.7 μm 의 두께로 코팅된 PR 층에 펨토초 레이저 펄스를 50 배율(NA=0.42)의 objective lens 로 집광하여 펄스 에너지와 펄스 수를 조절하여 서브마이크론 선폭을 가지는 PR 패터닝을 할 수가 있다. 펨토초 레이저 리소그래피 기술을 이용하여 다양한 형태의 PR 패터닝을 하였다. 그림 5 는 펨토초 레이저 리소그래피를 이용하여 직선, 곡선, 점 모양의 다양한 PR 패터닝 결과를 보여준다. 그림 5(a)와 (b)의 직선과 곡선 패턴은 65 nJ 의 펄스 에너지를 가지는 펨토초 레이저 빔을 50 배율(NA=0.42) objective lens 를 통하여 집광하여 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 속도로 이송하며 조사하였다. 1kHz 의 반복률을 가지는 펨토초 레이저 펄스를 이용하여 펄스 간의 간격은 약 10nm 로 펄스 중첩률은 99%이며 높은 반복률을 가지는 레이저를 사용한다면 가공 속도를 높일 수 있을 것이다. 이와 같이 785nm 파장을 가지는 펨토초 레이저를 이용하여 이광자 경화(Two-photon polymerization)를 하였다. 원하는 형태의 패턴 모양으로 펨토초 레이저를 조사하여 경화(Polymerization)하고 약 20 초 정도 현상(Developing)하여 가공된 PR 패턴들은 SEM 으로 측정하였으며 평균 선폭은 0.9 μm 정도이다. 선폭의 미세한 변화(variation)은 펨토초 레이저 펄스의 세기 변화(fluctuation)와 레이저 가공 시스템에서 스테이지(Stage)의 미세 진동에 의한 것으로 추측된다. 이와 같이 펨토초 레이저 리소그래피 기술을 이용한 직선이나 곡선 형태의 PR 패터닝은 서브마이크론 크기의 선폭을 가지는 회절 광학 소자 제작에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 5(c)의 점(dot) 형태의 PR 패터닝은 펄스 에너지가 60nJ 인 1kHz 의 펨토초 레이저 펄스를 1 초 동안 노출하여 1000 개의 펄스를 조사하였다. 같은 조건으로 약

20 초 정도 현상하여 가공된 PR 패턴들은 SEM 으로 측정하였으며 평균 선폭은 1.5 μm 정도이며 일정한 크기의 점 패턴을 얻을 수 있었다. 이와 같이 펨토초 레이저는 같은 에너지 레벨에서 다른 펄스 폭이 긴 레이저들에 비해서 열의 발생이 거의 없이 열 영향 영역(Heat-affected zone)이 최소화되며 극히 높은 첨두출력(Peak power)에 의한 비선형 현상으로 집광(Focusing)된 초점의 크기보다 작은 회절 한계 이하의 가공이 가능하다. 펨토초 레이저 리소그래피 기술은 포토마스크를 사용하지 않고 서브마이크론 크기의 선폭을 가지는 다양한 형태의 PR 패터닝이 가능하다. 선폭을 보다 작게 줄이기 위해서는 PR 층의 두께를 줄이거나 집광 렌즈의 배율을 높임으로서 가능할 것이다.

기존의 펨토초 레이저 PR 경화 기술은 액상 폴리머에 3 차원 구조물을 제작하고 이를 광자결정(Photonic crystal)과 같은 고집적 광학소자에 적용하였으나 실용성은 앞으로 해결해야 할 과제로 남는다.¹⁰ 본 논문에서는 이러한 펨토초 레이저 PR 경화 기술을 이용하여 기존의 반도체 공정 기술이 대량 생산에는 용이하지만 공정이 복잡하고 고가의 장비가 필요하다는 단점을 극복하고 1 μm 전후의 선폭을 가지는 미세 패터닝 결과를 얻었다. 이러한 마스크가 필요 없는 펨토초 레이저 리소그래피 기술은 포토마스크(Photomask)의 가격 문제에 관한 해결책을 제시할 수 있으며 공정이 비교적 쉽고 간단하며 서브미크론의 선폭을 가지면서 다양한 분야의 물질들을 가공할 수 있으며, 특히 회절광학소자 제작에 유용할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 포토마스크를 사용하지 않고 펨토초 레이저를 이용하여 직접 어블레이션 하는 방법과 리소그래피 공정을 접목한 방법을 사용하여 1.7 μm 두께의 PR 층을 패터닝 하였다. 어블레이션에 의한 직접 PR 패터닝 방법에 비해 펨토초 레이저 리소그래피 기술은 debris 문제가 없이 깨끗한 형상을 가지며 가공 선폭을 회절한계 이하로 줄일 수 있는 장점이 있다. SEM 을 이용하여 레이저 펄스 에너지와 펄스 수가 PR 패터닝에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다. 또한 서브마이크론 선폭을 가지는 직선, 곡선, 점 형태의 PR 패턴을 가공하여 회절광학 소자 응용 가능성을 보였다. 앞으로 PR 두께를 줄임으로써 가공 선폭을 수백 nm 정도로

줄이고 고반복률(High repetition rate) 펄스 레이저를 사용하여 가공속도를 향상시킨다면 기존의 반도체 공정이나 전자빔(E-beam) 리소그래피에 의존하던 다양한 분야에 응용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 나노원천기술개발 사업의 일환으로 교육과학기술부의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Pronko, P. P., Dutta, S. K., Squier, J., Rudd, J. V., Du, D. and Mourou, G., "Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800nm," *Opt. Comm.*, Vol. 114, Issues 1-2, pp. 106-110, 1995.
2. Korte, F., Serbin, J., Koch, J., Egbert, A., Fallnich, C., Ostendorf, A. and Chichkov, B. N., "Towards nanostructuring with femtosecond laser pulses," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 77, Issue 2, pp. 229-235, 2003.
3. Koch, J., Fadeeva, E., Engelbrecht, M., Ruffert, C., Gatzel, H. H., Ostendorf, A. and Chichkov, B. N., "Maskless nonlinear lithography with femtosecond laser pulses," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 82, Issue 1, pp. 23-26, 2006.
4. Lin, Y., Hong, M. H., Wang, W. J., Law, Y. Z. and Chong, T. C., "Sub-30 nm lithography with near-field scanning optical microscope combined with femtosecond laser," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 80, Issue 3, pp. 461-465, 2005.
5. Sohn, I.-B., Lee, M.-S., Woo, J.-S., Lee, S.-M. and Chung, J.-Y., "Fabrication of photonic devices directly written within glass using a femtosecond laser," *Optics Express*, Vol. 13, No. 11, pp. 4224-4229, 2005.
6. Chung, I. Y., Kang, K. H., Kim, J. D., Sohn, I. B., Noh, Y. C. and Lee, J. M., "Femtosecond Pulsed Laser Ablation of OLED Shadow Mask Invar Alloy," *J. of KSPE*, Vol. 24, No. 12, pp. 50-56, 2007.
7. Kawata, S., Sun, H. B., Tanaka, T. and Takada, K., "Finer feature for functional microdevices," *Nature*, Vol. 412, No. 6848, pp. 697-698, 2001.
8. Lee, S. W., Cho, M. J., Lee, S. K., Kong, H. J., Yang, D. Y., Park, S. H., Lim, T. W., Kim, R. H. and Lee, K. S., "Distortion of Structure in Two - Photon Absorbed Photopolymerizing Three Dimensional Fabrication," *Optical Society of Korea Annual Meeting*, pp. 46-47, 2005.
9. Maruo, S. and Kawata, S., "Two-photon-absorbed near-infrared photopolymerization for three-dimensional microfabrication," *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 7, No. 4, pp. 411-415, 1998.
10. Maruo, S., Nakamura, O. and Kawata, S., "Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization" *Optics Letters*, Vol. 22, No. 2, pp. 132-134, 1997.