

## 액침 훌로그래픽 리소그래피 기술을 이용한 2 차원 나노패터닝

김상원\*, 박신증\*, 강신일\*\*, 한재원#

### Two-dimensional Nano-patterning with Immersion Holographic Lithography

Sang Won Kim\*, Sinjeung Park\*, Shin Il Kang\*\* and Jae Won Hahn#

#### ABSTRACT

Two-dimensional nano-patterns are fabricated using immersion holographic lithography. The photoresist layer is exposed to an interference pattern generated by two incident laser beams ( $\lambda = 441.6$  nm, He-Cd laser) of which the pitch size is less than 200 nm. Good surface profiles of the 2 dimensional patterns are achieved by trimming the lithography process parameters, such as, exposure time, developing time and refractive index of medium liquid.

**Key Words :** aspect ratio(종횡비), develop time(현상시간), exposure time(노광시간), holographic lithography(훌로그래픽 리소그래피), immersion lithography(액침 리소그래피), photoresist(감광제), polarization(편광)

#### 기호설명

$E$	: Electric field
$B$	: Magnetic field
$I$	: Irradiance (or Intensity)
$k_0$	: Propagation number
$P$	: Periodicity
$\lambda$	: Wavelength
$N$	: Reflective index
$\eta$	: Viscosity

#### 1. 서론

광전자 부품의 소형화가 진행될수록 보다 미세

한 패턴을 형성하기 위하여 리소그래피 기술에 대한 요구가 증대되고 있으며, 광원의 파장이 점차 짧아지고 있다. 지금까지의 노광기술은 패턴의 크기를 줄이기 위하여 보다 더 짧은 파장의 광원을 도입하고자 하였다. 그러나 파장이 짧아짐에 따른 공정상의 문제들로 인해, 현재는 파장을 변화시키지 않고도 패턴의 크기를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 목적을 위한 다양한 방법들 중에서 액침 리소그래피(immersion lithography)는 CD(critical dimension)값을 줄이면서도 종횡비(aspect ratio)를 크게 하여 공정 효율을 향상시킬 수 있는 기술이다. 액침 리소그래피는 NA(numerical aperture)의 상승효과로 인해 패턴의

\* 접수일: 2005년 9월 20일; 게재승인일: 2006년 11월 9일

\* 연세대학교 기계공학과 나노광자공학 연구실

\*\* 연세대학교 기계공학과 나노성형 및 광부품기술 연구실

# 교신저자: 연세대학교 기계공학과 나노광자공학 연구실

E-mail [jaewhahn@yonsei.ac.kr](mailto:jaewhahn@yonsei.ac.kr) Tel. (02) 2123-5811

분해능을 향상시킬 수 있고, 공기의 굴절률보다 높은 액체매질(liquid medium)를 사용함으로써, 기존의 광원을 이용하면서도 보다 짧은 파장을 이용하는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 특성을 갖는 액침 리소그래피 기술의 노광법을 홀로그래피 방법에 적용하였다. 홀로그래피는 광의 간섭성(coherent)을 이용한 것으로 리소그래피를 하기 위해서 마스크가 필요하지 않고 노광시간이 짧으며, 등방성으로 대면적에 동시에 미세패턴을 형성할 수 있다는 점에서 매우 유리하다.<sup>1,3</sup>

## 2. 액침 홀로그래픽 리소그래피 원리

### 2.1 연구배경 및 이론

액침 홀로그래픽 리소그래피의 기본 이론은 빛의 굴절 및 반사에 따른 스넬의 법칙을 따른다. 패턴의 주기는 아래 식과 같이 웨이퍼로 입사하는 빛의 파장( $\lambda$ )과 각도( $\theta$ ), 빛이 진행하는 물질의 굴절률( $n$ )에 의하여 정해진다.

$$p = \frac{\pi}{k_0 \sin \theta} = \frac{\lambda}{2n \sin \theta}$$

일반적인 홀로그래픽 리소그래피의 경우, 입사하는 빛이 공기 중을 진행하기 때문에 공기의 굴절률 1을 고려하지 않는다. 하지만, 액침 홀로그래픽 리소그래피의 경우, 광원의 교체 없이 빛이 진행하는 물질의 굴절률에 따른 단파장효과를 이용하는 기술이므로 굴절률을 고려하여야 한다.<sup>2</sup>

홀로그래픽 리소그래피의 경우 최대 분해능은 220nm 이다. 그러나 액침 홀로그래픽 리소그래피를 위하여 G-line(S1805)의 감광제가 도포된 웨이퍼에 굴절률이 1.526인 프리즘과 442nm의 파장을 갖는 He-Cd 레이저를 이용하여 나노패턴을 제작할 경우, 패턴의 최대 분해능은 150nm이다.<sup>7,8</sup>

액침 리소그래피는 홀로그래픽 리소그래피와 같이 대기중에서 노광을 하는 것이 아닌, 프리즘을 경유해서 노광을하게 된다. 따라서 프리즘과 웨이퍼의 광결합이 중요한 요인으로 작용하며, 패턴의 종횡비에도 영향을 미치게 된다.

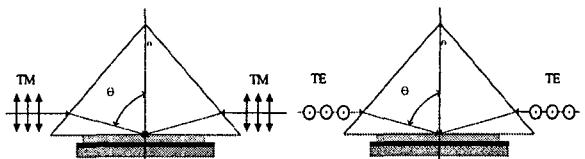


Fig. 1 Polarization effect of holographic lithography

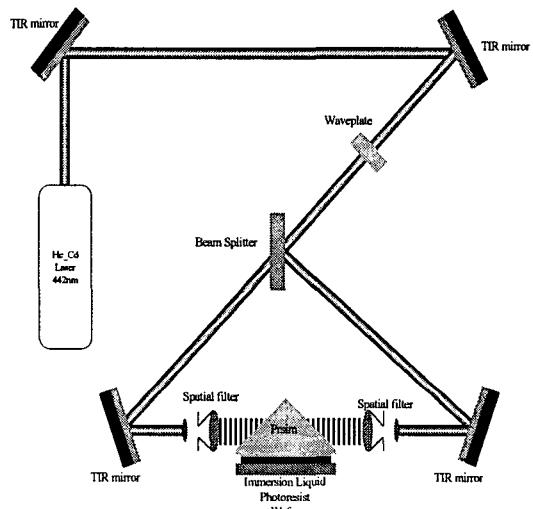


Fig. 2 Schematic diagram of immersion holographic lithography system

### 2.2 액침 홀로그래픽 리소그래피 시스템

액침 홀로그래픽 리소그래피 시스템을 구성하는데 있어서, 프리즘에 도달하는 빛을 평면파로 구현하기 위해 프리즘 양단에 광공간 필터(spatial filter)를 설치하였다. 또한, 프리즘과 웨이퍼 사이를 채워줄 액체의 누수를 막기 위해서 Fig. 1에서 보는 바와 같이 웨이퍼를 세우지 않고, 눕혀놓는 방식을 이용하였다. 그러나 이 방식을 기존의 수직한 편광방향을 가진 광원을 기반으로 하는 시스템에 이용하면, 패턴 형성에 효율이 좋지 않게 된다. 왜냐하면, 간섭을 이용한 노광기법에서 P 편광성분에 비하여 S 편광성분을 이용할 경우에 패턴의 종횡비가 좋지 않기 때문이다. 그러므로 입사하는 빛의 편광 방향을 90° 변환하기 위하여 반파장판(half-waveplate)을 설치하였다.<sup>5,6</sup> 전체적인 시스템구성은 Fig. 2이며, 실제 장치는 Fig. 3과 같다.

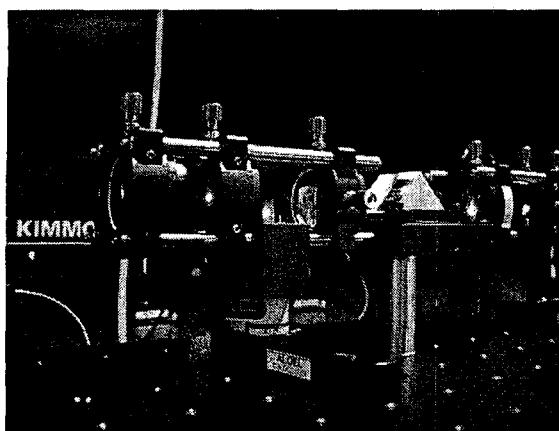


Fig. 3 Experimental setup of immersion holographic lithography system

### 2.3 소형 고효율 광공간 필터 설계

본 연구에서 선행되었던 부분은 리소그래피 시스템을 소형화하는 것이다. 이를 위하여 시스템을 구성하는 요소들 중에 광공간 필터의 길이를 줄였다. 광공간 필터는 레이저의 세기분포에서 랜덤하게 요동하는 인자인 노이즈 성분을 제거하기 위해 사용한다. 광공간 필터의 대물렌즈는 일반적으로 여러 개의 렌즈군을 사용하지만, 본 연구에서는 하나의 비구면 렌즈를 이용하였다. 이를 통해 공간 필터의 크기를 기존의 장치에 비해 30% 정도 줄일 수 있었으며, 빛의 출력 효율도 향상시켰다. 공간필터는 초점거리 11mm, 36.7mm 두 개의 렌즈로 구성되어, 5 배 배율을 가진다. 이러한 공간 필터를 이용하여 고주파 공간성분을 제거함으로써 넓은 면적의 균일한 분포를 가진 광을 얻을 수 있었다. 본 실험에서 공간 필터를 거쳐서 얻어진 광의 크기는 10 mm 였다.

## 3. 나노 패터닝

### 3.1 홀로그래픽 리소그래피 기술을 이용한 나노 패터닝

액침 리소그래피에서 얻은 패턴의 특성과 비교해 보기 위해서 홀로그래픽 리소그래피 실험을 하여 기준 패턴을 형성하였다.

원하는 패턴의 피치(분해능)를 얻기 위하여 웨이퍼 스테이지로 입사하는 두 빔의 입사각도를 조정하여 빛의 간섭 각도를 결정하고, 입사각에 맞게

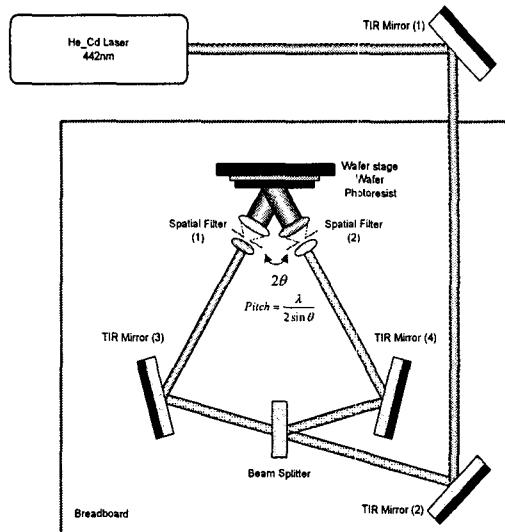


Fig. 4 Schematic diagram of holographic lithography system

광을 정렬한 후 실험을 하였다. 실험에 관한 도식은 Fig. 4 의 그림과 같다. 앞서 설명한 바와 같이 간섭효과를 얻기 위해 광분할기에서 분리된 빛은 양방향의 거울을 통해 웨이퍼 스테이지로 집광하게 된다. 이 때, 웨이퍼 스테이지에서의 빔의 세기(intensity)는 24 mW 였다.

#### 3.1.1 1 차원 나노패터닝

실험의 기본 공정조건은 86.5nm 의 두께로 도포된 감광제에 형성되는 패턴의 주기와 세부공정 조건인 노광 및 현상시간의 변화에 따른 각각의 패턴을 확인하여 결정한다. 먼저, 500nm 피치의 1 차원 패턴을 형성하기 위하여 2, 5, 10, 15 초의 노광시간과 20 부터 40 까지 5 초 간격의 현상시간 변화에 따른 패턴을 비교하였으며, 300nm 피치의 1 차원 패턴을 형성하기 위하여 노광시간을 4 초로 고정한 후 현상시간을 30, 35, 40 초로 변화시켜 형성된 패턴을 비교하였다. Fig. 5 의 (a)는 노광시간 10 초, 현상시간 25 초의 조건에서 만든 500nm 패턴의 이미지이며, (b)는 노광시간 4 초, 현상시간 40 초의 조건에서 형성된 300nm 패턴의 이미지이다.

#### 3.1.2 2 차원 나노패터닝

감광제가 도포된 웨이퍼에 1 차 노광 후, 웨이퍼 스테이지를 90°회전시켜 2 차 노광을 하여

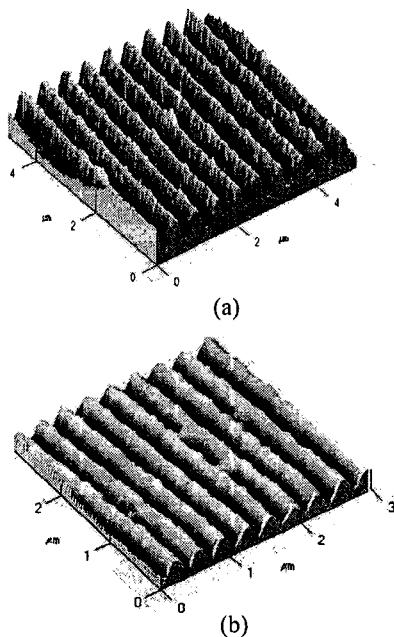


Fig. 5 AFM images of one-dimensional patterns  
(a: pitch=500 nm, b: pitch=300 nm)

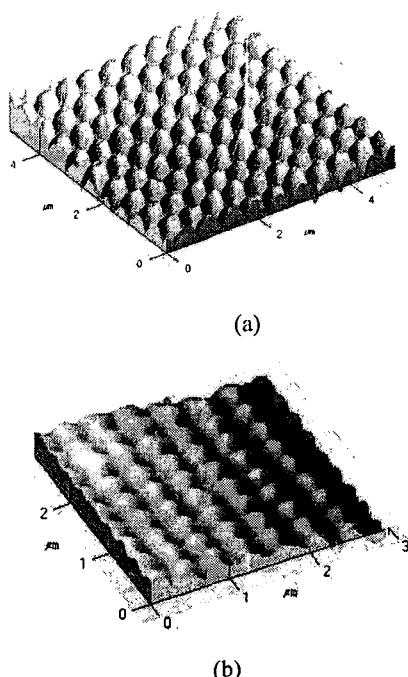


Fig. 6 AFM images of two-dimensional patterns  
(a: pitch=500 nm, b: pitch=300 nm)

2 차원 구조를 갖는 패턴을 구현하였다. 하나의 웨이퍼에 대하여 두 번의 노광과정을 진행하기 때문에 노광시간은 1 차원 패턴의 노광시간에 비하여 70% 정도 줄였으며, 현상시간도 노광시간이 줄어듦에 따라 함께 줄였다. 패턴의 크기는 1 차 패턴과 동일한 500nm 및 300nm 를 제작하였다. Fig. 6 의 (a)는 노광시간이 각각 4 초, 현상시간이 35 초인 조건에서의 500nm 패턴 이미지이며, (b)는 노광시간이 각각 3 초, 현상시간이 30 초인 조건에서의 300nm 패턴 이미지이다.

### 3.1.3 패턴분석 및 경향

실험결과는 AFM(atomic force microscope) 및 SEM(scanning electron microscope) 장비를 이용하여 측정을 하였다. 얻어진 패턴을 SEM 을 이용하여 촬영한 결과는 Fig. 7 에 나타나 있다. 주로 SEM 을 이용하여 패턴의 형상을 측정하였으며, AFM 을 통해서 얻은 데이터와 패턴의 형상을 비교하여 보

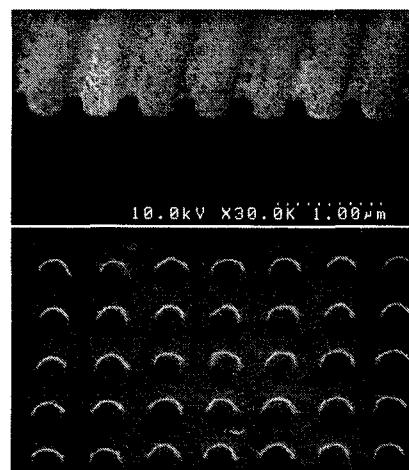


Fig. 7 SEM images of patterns (pitch = 500 nm)

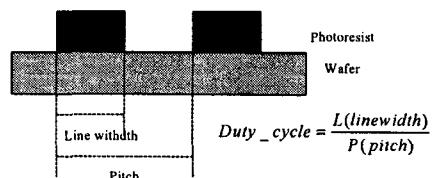


Fig. 8 Definition of pitch and linewidth

았다. 측정데이터를 이용하여 노광시간과 현상시간에 따른 종횡비를 분석하였고, 패턴의 피치 변화 및 각 공정조건에서 나타나는 패턴의 특성은 최소 선폭(CD:critical dimension)값으로 분석하였다. Fig. 8에서 패턴에서의 선폭과 피치를 도식적으로 표현하였다. 실험에서 얻어진 가장 큰 특징은 다음과 같다. 먼저, 노광시간이 동일한 경우에 대해서는 현상시간이 길어짐에 따라 패턴의 각이 커졌다. 반면, 노광시간을 줄이고 현상시간을 증가시킬 경우에 대해서는 선폭값이 줄고 패턴의 각이 작아지는 경향을 나타내었다. 따라서 동일한 노광조건에 현상시간을 변화시킬 경우, 현상시간이 길수록 종횡비가 큰 패턴이 형성되며 선폭은 줄어드는 특성을 나타내었다.

### 3.2 액침 리소그래피를 이용한 나노 패터닝

홀로그래픽 리소그래피에서 산출된 데이터를 기반으로 액침 홀로그래픽 리소그래피 실험을 하였다. 실험공정은 Fig. 9 와 같고, 프리즘을 투과하여 웨이퍼에 입사하는 빛의 각도  $\theta$  를  $72.5^{\circ}$  로 고정하였을 때 얻을 수 있는 패턴의 피치는  $150\text{nm}$  였다.

감광제가 도포된 웨이퍼를 스테이지에 놓고  $1\text{mm}$  간격으로 프리즘을 놓았으며, 간극에 프리즘과 굴절률이 비슷한 액체를 채운 다음 노광을 실시하였다. 이 때 액체는 주사기를 이용하여 주입하게 되는데, 이는 액체를 주입할 때 공기방울이 발생하는 것을 줄이기 위해서이다. 만약 공기방울이 생기게 된다면, 공기방울에 의한 빛 산란에 의해 패턴의 형상에 영향을 주게 되므로 항상 고려해야 할 사항이다.<sup>4</sup>

#### 3.2.1 액 m,침 리소그래피 1 차원 나노패터닝

감광제의 두께는 홀로그래픽 리소그래피의 실험과 동일하게  $86.5\text{ nm}$  로 하였으며, 노광시간 및 현상시간에 변화를 주어 실험하였다. 홀로그래픽 리소그래피를 이용한 패턴과 액침 리소그래피를 이용한 패턴의 특성은 1 차원 패턴의 데이터를 이용하여 비교하였다.

홀로그래픽 리소그래피와 액침 홀로그래픽 리소그래피의 패턴 분해능을 비교하면, Fig. 10 의 그레프에서 나타나는 것처럼 같은 공정 조건에서 패턴의 피치 크기가 감소하였다. 이것은 프리즘의 굴절률에 의해 웨이퍼로 입사하는 빛의 파장이 감소

하였기 때문이다.

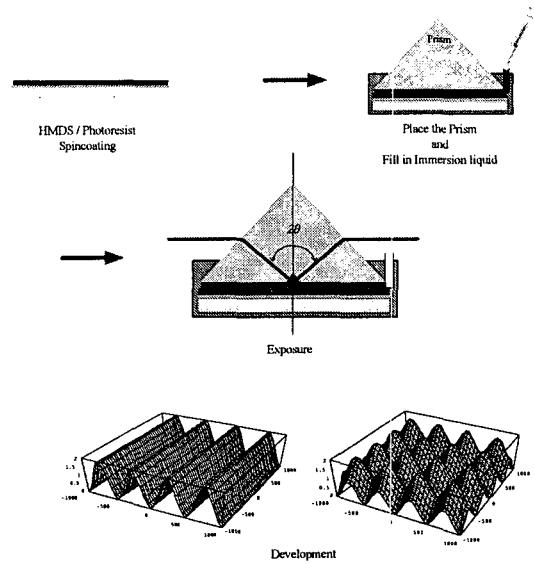


Fig. 9 Fabrication procedure of nano-structures using immersion holographic lithography

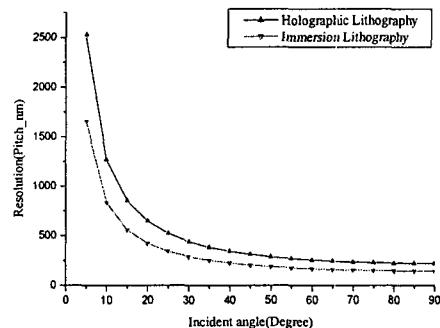


Fig. 10 Holographic lithography vs. iImmersion lithography

Table 1 Material properties

Material	Index of Reflection
BK7(Prism)	1.52611
Photoresist (S1805)	1.71

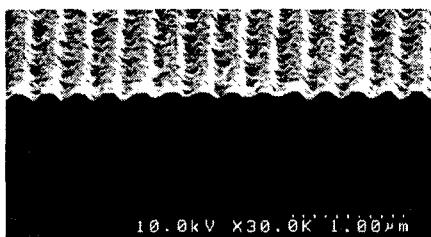


Fig. 11 SEM image of one dimensional pattern fabricated using immersion holographic lithography (pitch=150 nm)

### 3.2.2 액침 리소그래피 2 차원 나노패턴팅

2 차원 패턴은 홀로그래피의 실험과 동일하게 1 차 노광 후 웨이퍼를 90°회전시켜 2 차 노광을 시행하여 형성하였다. 노광시간은 1 차원 패턴의 노광시간에 비해서 약 70%정도 줄였으며, 현상조건은 30 초에서 5 초 간격으로 실험하였다. 이 때, 35 초의 현상조건에서 패턴의 주기는 양방향 150nm, 종횡비 0.6, 깊이 27nm, dot 직경 75 nm로 가장 좋은 패턴을 구현하였다. 패턴의 결과는 Fig. 12 와 같다.

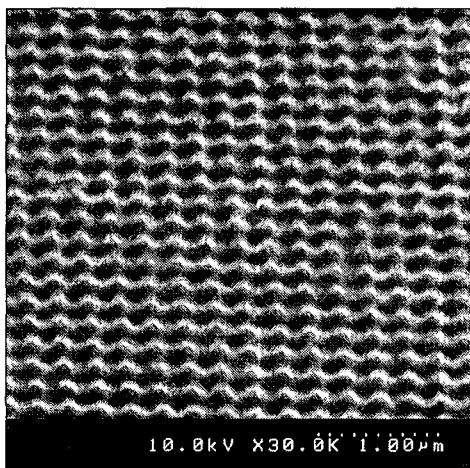


Fig. 12 SEM images of two dimensional pattern fabricated using immersion holographic lithography (pitch=150 nm)

## 4. 결론

본 연구에서는 주기적인 나노 구조의 미세 패턴을 구현하기 위하여 홀로그래픽 리소그래피 장치를 제작하였다. 파장이 442 nm 인 He-Cd 레이저를 이용하여 노광 및 현상 공정을 변화시키면서 감광제 박막에 300, 500nm 주기의 1 차원과 2 차원 패턴을 구현하였다. 그리고 이 패턴은 유사한 공정에서 형성되는 액침 홀로그래픽 리소그래피 패턴을 비교하는 기준 패턴으로 사용되었다.

또한, 형성되는 패턴의 분해능을 높이기 위하여 프리즘과 index matching 용액을 사용하여 액침 홀로그래픽 장치를 제작하였다. 이 장치를 이용하여 1 차원 및 2 차원 나노 구조의 패턴을 제작하였고, 제작된 패턴의 구조를 AFM 과 SEM 을 이용하여 관측하였다. 결과적으로 액침 홀로그래피 장치에서의 프리즘의 굴절률에 기인한 유효 파장의 감소로 인하여 유사한 조건의 홀로그래픽 리소그래피 패턴 보다 약 30% 분해능이 향상된 150 nm 피치의 2 차원 나노 패턴을 제작할 수 있었다.

현재의 액침 홀로그래픽 리소그래피 시스템에 서의 최소 패턴의 주기는 150nm 지만, 향후 프리즘의 굴절률을 향상시켜 감광제에 반응하는 유효 파장의 길이를 짧게 하면 150nm 이하의 크기를 가지는 주기적인 패턴을 만들 수 있을 것이다. 이처럼 액침 홀로그래픽 리소그래피 기술은 기존에 있는 시스템을 보완함으로써 많은 추가 비용 없이 나노 패턴의 분해능을 향상시킬 수 있는 경제적인 기술이므로 짧은 주기성을 가지는 나노 패턴 기판을 필요로 하는 많은 응용 연구에 도움이 될 것이다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 과제 (M10400000313-05J0000-31310) 및 나노메카트로닉스 기술개발 과제 (M102KN010005-04K1401-00510) 연구지원에 의하여 수행되었다.

## 참고문헌

- Mulkens, J., Flagello, D., Streefkerk, B. and Graeupner, P., "Benefits and limitations of immersion lithography," *J. Microlith., Microfab., Microsyst.*, Vol.

- 3, No. 1, pp. 104-114, 2004.
2. Lin, B. J., "Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing," *J. Microlith., Microfab., Microsyst.*, Vol. 3, No. 3, pp. 377-395, 2004.
  3. Gunawan, O., Hoe, L. W., Ooi, B. S., Chan, Y. C., Lam, Y. L. and Zhou, Y., "Development of a Laser Holographic Interference Lithography system," *Proc. of SPIE*, Vol. 3896, pp. 515-522, 1999.
  4. Heng, M., Ho, B. C. P., Yamaguchi, R., Yoshioka, K. and Yaegashi, H., "Optical Coupling of Lens, Liquid and Resist in Immersion Lithography: Rigorous Model and Assessment," *Proc. of SPIE*, Vol. 5377, pp. 405-414, 2004.
  5. Su, H. M., Zhong, Y. C., Wang, X., Zheng, X. G., Xu, J. F. and Wang, H. Z., "Effects of polarization on laser holography for microstructure fabrication," *Phys. Rev. E*, Vol. 67, pp. (056619)1-6, 2003.
  6. Adam, K. and Maurer, W., "Polarization Effects in Immersion Lithography," *Proc. of SPIE*, Vol. 5377, pp. 329-343, 2004.
  7. Farhoud, M., Ferrera, J., Lochtefeld, A. J., Murphy, T. E., Schattenburg, M. L., Carter, J., Ross, C. A. and Smith, H. I., "Fabrication of 200 nm period nano magnet arrays using interference lithography and a negative resist," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 17, No. 6, pp. 3182-3185, 1999.
  8. Hoffnagle, J. A., Hinsberg, W. D., Sanchez, M. and Houle, F. A., "Liquid immersion deep-ultraviolet interferometric lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 17, No. 6, pp. 3306-3309, 1999.