

고 투과 C 형 개구를 이용한 나노 크기 패턴 구현

박신중*, 김용우*, 이응만*, 한재원#

Nano-size Patterning with a High Transmission C-shaped Aperture

Sinjeung Park*, Yong Woo Kim*, Eungman Lee* and Jae Won Hahn#

ABSTRACT

We have designed a high transmission C-shaped aperture using finite differential time domain (FDTD) technique. The C-shaped aperture was fabricated in the aluminum thin film on a glass substrate using a focused ion beam (FIB) milling. Nano-size patterning was demonstrated with a vacuum contact device to keep tight contact between the Al mask and the photoresist. Using 405 nm laser, we recorded a 50 nm-size dot pattern on the photoresist with the aperture and analyzed the spot size dependent on the dose illuminated on the aperture.

Key Words : Nano-aperture (나노 개구), FDTD (시간적 유한미분법), Metal permittivity (금속 유전율), Nano-lithography (나노 리소그래피), Nano-pattern (나노 패턴)

1. 서론

광 리소그래피 공정 기술은 고집적 반도체 산업의 핵심 생산기술로써 공정에서 얻어지는 패턴의 분해능을 높이는 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 이러한 광 리소그래피 공정에 의해 나타나는 패턴의 해상도 (D)는 레이저 파장 (λ)과 개구수 (numerical aperture: NA), 공정 계수 (k_1)에 의한 관계식 $D = k_1 \lambda / NA$ 으로 결정된다.¹ 지금까지 레이저 파장을 줄이거나 NA 를 높여서 분해능이 높은 광 리소그래피 기술들이 개발되어 왔다.

현재 광 리소그래피 기술은 ArF 엑시머 레이저를 광원으로 주로 사용하고 있으며, 광학 분해능은 half pitch 기준으로 약 80 ~ 90 nm 이다. 최근에는 ArF 광을 이용하는 리소그래피 장치의 분해능을

높이기 위하여 액침 (immersion) 기법을 이용한 장치가 개발되어 분해능이 약 60 nm 이하로 향상되었다.

아울러, 향후 반도체 산업의 로드맵에 대응하기 위한 50nm 이하 크기의 패턴을 구현하기 위한 차세대 나노 리소그래피 기술에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 차세대 리소그래피 기술의 후보로는 13.5nm 파장을 이용하는 EUV 리소그래피 (extreme ultraviolet lithography)² 를 비롯하여 전자 빔 리소그래피 (electric beam lithography)³, 나노 임프린트 (nano imprint)⁴ 기술이 거론되고 있다.

또한, 광 리소그래피 기술의 분해능을 높이는 방법으로 작은 크기의 개구로 광을 입사시키고 개구를 통하여 투과되는 광을 이용하는 방법이 있다. 이 경우 개구의 크기가 빛의 파장보다 작은 값을

✉ 접수일: 2007 년 7 월 5 일; 게재승인일: 2007 년 8 월 29 일

* 연세대학교 기계공학과

교신저자: 연세대학교 기계공학과

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

가지게 되면, 개구의 광 투과도가 급격히 낮아지게 되고 개구 근처에 근접장 (near field)이 발생하게 된다. 이러한 근접장을 이용한 NSOM 리소그래피 (near-field scanning optical microscopy lithography)⁵⁻⁶로 분해능이 30nm 패터닝을 실현한 바 있다. 이와 같이 개구를 통과하여 만들어지는 빛의 크기는 개구의 크기에 비례하므로, 개구의 크기가 감소할수록 더 작은 패턴을 만들 수 있다. 그러나 개구의 크기가 입사 파장에 비하여 $2\pi/\lambda$ 이하로 감소하면, 빛의 투과량이 개구 크기의 네 제곱에 비례하여 급격히 줄어들게 된다.⁷ 따라서, NSOM 리소그래피 기술은 공정의 생산성에 한계를 가지게 되어 생산 기술로 발전시키는 데는 근본적인 한계를 가지고 있다.

나노 크기 개구의 투과도를 높이기 위한 방법으로 도파관 특성을 가진 C 형, H 형, 8 형 개구가 제안되었다.⁸⁻¹⁰ 이러한 개구는 얇은 금속 박막에 도파관 특성을 가진 개구를 제작하고 개구 속에 돌출된 구조를 만들어 돌출부 근처에 표면플라즈몬 효과에 의해 근접장의 세기를 강하게 만들어 준다. X. Shi⁸에 의해 제안된 C 형 개구를 사용할 경우 집속된 광속의 크기를 약 50 nm 로 줄일 수 있으며, 같은 크기의 정사각형 개구를 사용할 때 비해 근접장 영역에 형성되는 광속의 세기가 약 1000 배 정도 증가한다. 최근 이러한 C 형 개구와 bow-tie 형 개구를 이용하여 355nm 파장에서의 리소그래피 공정으로 감광제 (PR)에 점 패턴을 구현한 결과가 발표되었다.¹¹⁻¹³

본 논문에서는 고투과 금속개구를 이용한 광리소그래피 기술을 연구하기 위하여 파장이 405nm 인 레이저 광을 이용하는 C 형 개구를 설계하였다. 그리고 설계된 나노 개구를 가공한 알루미늄 금속 박막에 제작하고, 이를 이용하여 리소그래피 연구를 수행하였다.

2. 금속 박막에서의 C 형 개구 설계

이전 논문에서는 532nm 파장의 레이저에 대하여 완전도체 박막에서 C 형 개구를 설계하였으며, C 형 개구가 같은 크기의 패턴을 형성하는 정사각형 개구에 비하여 높은 효율을 가진다는 점을 확인하였다.¹⁴ 그리고 이러한 결과는 고효율 C 형 개구를 이용한 나노 리소그래피의 가능성을 확인해주었다. 그러나 실제 실험에서 사용하는 마스크는

금속 박막으로, 완전도체 물질이 아니기 때문에 나노 리소그래피 실험에 사용할 금속 박막 물질을 결정해야 한다.

금속의 유전율은 기본적으로 빛의 파장에 대하여 종속적인 관계를 가지고, 유전율 값은 C 형 개구에서 형성되는 출력 빔의 특성에 깊이 관여한다. 그러므로 C 형 개구 설계에 있어 사용하는 빛에 대하여 적절한 유전율로 반응하는 금속을 이용하는 것이 필요하다. 우선, C 형 개구에서 금속의 유전율 실수 부분의 절대값이 클수록, 또한 유전율 허수 부분의 절대값이 작을수록 리지 부분에 모이는 빛의 세기가 증가한다는 특징을 가진다.¹⁵ 따라서 주요 금속 Al, Ag, Au 의 405nm 파장에서의 유전율을 수치적으로 확인하여 적절한 금속을 선택할 수 있다.

금속의 유전율을 결정하는 금속 모델에는 Drude, Lorentz 모델을 기본으로 하여 이를 변형한 Debye, modified Debye, Drude-Lorentz 등 여러 가지가 있다.¹⁶⁻¹⁷ Drude 모델과 Lorentz 모델은 각각 금속의 구속전자와 자유전자의 영향에 따른 유전율을 계산하는 금속모델이고¹⁶, 일반적으로 근적외선 영역에서는 Drude 모델이 여러 가지 금속에 대하여 상대적인 유전율을 잘 표현할 수 있다.¹⁸⁻¹⁹ 그러나 405nm 의 가시광선 영역에서는 금속의 구속전자와 자유전자의 영향이 함께 존재하기 때문에 두 영향을 모두 고려한 Drude-Lorentz 금속 모델¹⁷을 이용하여 Al, Ag, Au 의 유전율을 계산하였으며, 그 값은 각각 $-22.41 + i4.41$, $-3.48 + i0.58$, $8.64 + i54.68$ 이다.

세 가지 금속의 영향을 확인하기 위하여 유한미분법 (finite difference time domain: FDTD)²⁰ 기법을 이용한 OptiFDTD²¹ 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 확인하였으며 그 결과는 Fig. 1 과 같다. 결과에 따르면 세 금속 중에서 Al 필름은 다른 금속에 비하여 유전율의 실수부 절대값이 크기 때문에, 최대 세기 (peak intensity: PI)가 큰 빛이 리지에 잘 집광하게 된다. 반면, Au 필름을 사용할 경우에 리지에서 빛이 집광하기는 하나, 405nm 파장에 대한 유전율의 허수부가 크기 때문에 그만큼 금속 내부로 흡수되는 양이 증가하여 상대적으로 집광된 빛의 최대 세기가 감소하게 된다. 또한 굴절률과 비례하는 유전율 실수부는 Al 에 비하여 작기 때문에 빛의 포커스 성능이 떨어지므로 형성되는 출력 빔의 크기가 증가하게 된다.

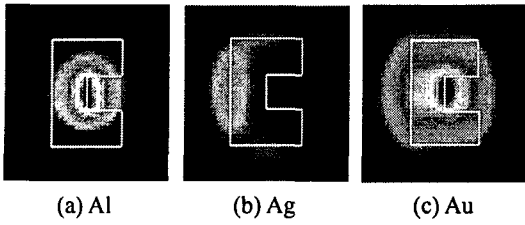


Fig. 1 Near-field intensity distributions of an output beams underneath of C-apertures designed for different metal films

또한, 각 금속마다 파장의 영향에 의해 나타나는 국소화된 표면 플라즈몬 (localized surface plasmon: LSP)이 달라, 이 효과가 리지에 빛이 모이는 현상에 도움이 되거나 해가 된다.^{9,22} 405nm 파장에 대해서는 Ag의 경우, LSP가 리지에서 발생하는 것이 아니라 개구의 외부 경계에서 발생하게 되어 C형 개구를 사용하고자 하는 목적에 부합하지 않으므로, 최종적인 출력 빔의 특성에 의해 Al을 적합한 마스크 물질로 선택하였다.

C형 개구는 Fig. 3에서와 같이 4개의 변수에 의해 디자인이 결정된다. 4개의 변수 중에 a, b 변수는 리지에 모이는 빛의 세기에 영향을 주고, 변수 c, d는 개구를 통과하여 나오는 출력 빔의 크기를 결정하는데 직접적으로 영향을 준다.¹⁴ 그러므로 설계에 있어서 우선적으로 정할 것은 구현하고

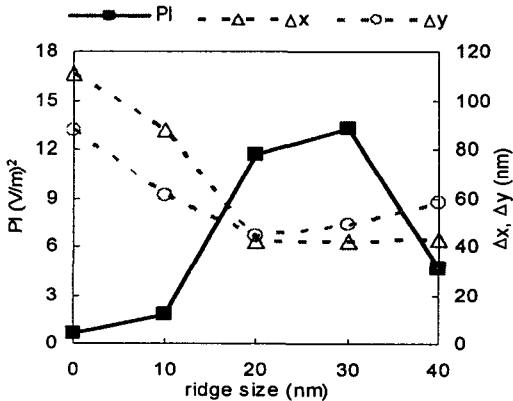


Fig. 2 Output beam properties in the variation of ridge size

자 하는 패턴 크기에 맞게 리지의 크기를 정하는

것이다.

C형 개구의 설계는 레이저 파장의 1/10 크기의 정사각형 5개를 이용한 C형 개구를 기준으로 시작한다.^{14,23} 본 실험에서는 405nm 파장을 이용하기 때문에 한 변이 40nm인 정사각형을 이용하여 변수 a, b, c, d가 각각 120, 80, 40, 40 nm인 기본형 C형 개구를 설계 기준으로 하였다. 먼저, 리지의 크기를 정하기 위해 기본형 개구에서 리지의 크기를 변화시켜 계산하였다. 그에 대한 Fig. 2 결과에서처럼 20nm 이하의 크기를 가지는 리지는 빛을 모으는 리지의 역할을 할 수 없음을 확인하였다. 그리고 FIB를 이용한 마스크 가공 시 가공 한계가 30nm임을 고려하여, 가능한 작은 출력 빔을 만들기 위하여 리지의 크기를 30nm로 결정하였다.

리지의 크기가 정해지면, 변수 a, b의 변화에 따른 출력 빔의 세기를 확인하여 가장 큰 출력 빔 세기를 가지는 디자인을 최종적으로 선택하면 된다. 이때 C형 개구 설계에 있어 출력을 높이는 작용에는 변수 b보다 변수 a가 더 큰 영향을 미치기 때문에 변수 a에 대한 빔 특성 변화를 확인하고 마지막으로 변수 b를 이용한 조절(trimming) 과정으로 설계를 마무리하게 된다. 이런 일련의 과정을 OptiFDTD²¹ 프로그램을 이용하여 계산한 결과, Fig. 3과 같이 405nm 파장에 대하여 설계된 C형 개구의 디자인 변수 a, b, c, d는 각각 440, 90, 30, 30 nm로 결정되었다.

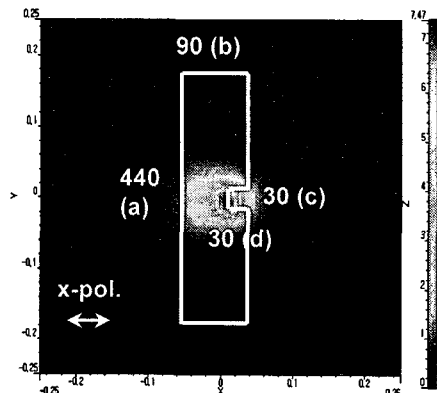


Fig. 3 Design of a C-aperture in Al film on a glass substrate

Table 1에서는 리지의 크기가 30, 40, 50nm 일

경우에 마스크로부터 20nm 떨어진 지점에서 나타나는 출력 빔의 특성을 나타내고 있다. 각각의 빔 특성은 최대 세기 (PI), 스팟 크기, 투과 효율 (transmission efficiency), 근접장 투과량 (near field transmission)으로 구분된다. 이 때 출력 빔 스팟 크기는 반폭 (full width half maximum: FWHM)에 의해 결정되고, 투과 효율은 물리적인 개구 면적 내로 입사되는 빛에 대한 출력 비율을 나타내는 지수로 개구로부터 20nm 떨어진 지점에서의 세기를 모두 합하여 개구 면적으로 입사한 빛의 세기를 나눈 것이다.^{8-9,11-13} 이 값은 빛이 금속을 통과하지 못하기 때문에 개구 뒷면으로 전송되는 빛은 모두 개구 면적을 통해서 전달되었다는 것을 가정으로 하고 있다. 따라서 1 보다 큰 값을 가지는 C 형 개구는 개구 면적 내로 입사된 빛보다 더 큰 출력을 만드는 특징을 가짐을 이 지수가 나타내주게 된다. 또 다른 지수인 근접장 투과율은 전체 입사 빛에 대한 출력의 효율을 나타내는 지수이다. 즉, 개구로부터 20nm 떨어진 지점에서의 세기를 모두 합하여, 계산시 사용된 총 면적으로 입사된 빛의 세기를 나누어서 계산한 값으로 실질적으로 공정에서 사용하는 입사 빔에 대한 효율을 나타낸다.

Table 1의 결과에서 리지가 30nm 인 경우, 다른 두 경우에 비하여 PI가 높아 세기 분포의 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR)가 좋다. 따라서 감광제에서의 패턴 대조비(contrast)가 좋을 것으로 예상되고, 형성되는 빔의 크기도 상대적으로 작기 때문에 리지 크기가 30nm 인 C 형 개구를 기준으로 하여 리소그래피 실험을 실시하였다.

Table 1 Output beam parameters of designed C-apertures as a function of ridge size

| Ridge size (nm) | | 30 | 40 | 50 |
|-----------------------------------|----|------|------|------|
| Peak intensity (V/m) ² | | 7.47 | 6.56 | 5.9 |
| Spot size (nm) (FWHM) | Δx | 45 | 46 | 48 |
| | Δy | 49 | 53 | 63 |
| Transmission efficiency | | 1.27 | 1.55 | 1.65 |
| Near field transmission (%) | | 20.4 | 24.5 | 25.4 |

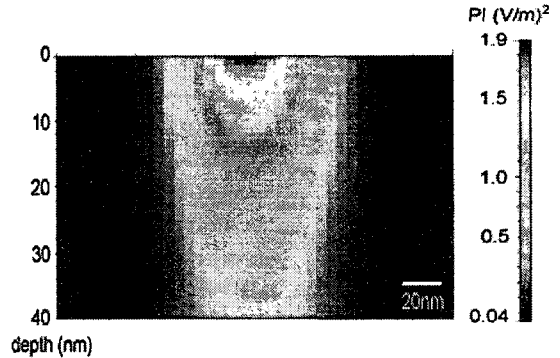


Fig. 4 Near field intensity distribution along z-direction in PR

다른 한편, FDTD 프로그램을 이용하여 감광제 내부에서의 세기 (intensity) 분포를 통하여 형성되는 패턴의 크기와 깊이 정보를 확인할 수 있다. 마스크로부터 수십 나노 거리에서는 근접장의 영향이 크기 때문에 전기장이 공간에 분포하고 있으며, 이 때 세기가 같은 지점을 연결한 선이 패턴의 크기와 깊이의 기준이 된다. Fig. 4에서는 리지가 30nm 이고 감광제가 마스크로부터 20nm 떨어져 있는 경우의 세기 분포를 보여주고 있으며, 이 그림에 따르면, y 축 방향으로 40nm 크기의 패턴이 형성될 때, 해당 패턴의 깊이는 약 10nm 일 것으로 예상할 수 있다.

3. 리소그래피 실험 장치 구성

C 형 개구를 이용한 리소그래피 실험은 접촉식 리소그래피 기술을 사용하기 때문에 마스크와 감광제 사이의 간격을 최소한으로 하는 것이 중요하다. 이를 위하여 웨이퍼 홀더에 진공용 홀을 만들고 진공 장치를 이용하여 마스크와 웨이퍼가 접촉하도록 하였다. 405nm 파장의 단모드 레이저를 공간 필터를 이용하여 레이저 빔 프로파일에서의 불필요한 잡음을 제거하고, 5mm 지름으로 빛을 집광시켰다. 또한, 마스크와 감광제의 오염을 적게하기 위하여 실험 장치는 1000 클래스의 클린 부스에 설치되었다. 장치 구조는 Fig.5 와 같다.

또한, 마스크를 만들기 위해 5mm 두께, 1 인치 크기의 원형 fused silica 위에 thermal evaporation 방식을 이용하여 200nm 두께의 Al 박막을 코팅하고, FIB (SII, SMI3050TB) 장치를 이용하여 C 형 개구를

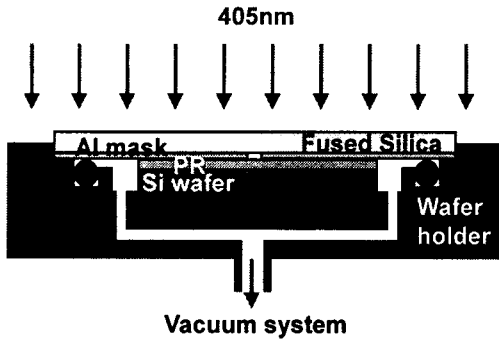


Fig. 5 Vacuum contact device for near field recording

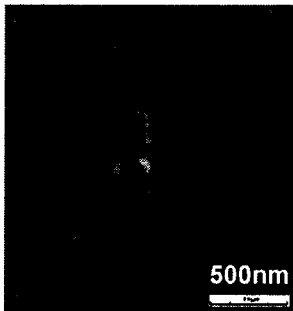


Fig. 6 SEM image of a fabricated C-shaped aperture

가공하였다. C 형 개구의 가공에 있어 경계면의 형태가 덜 손상되도록 0.3pA 의 빔 전류를 이용하여 외부 사각형의 크기가 440, 90 nm 이고 리지의 크기가 각각 30, 40, 50nm 인 C 형 개구를 제작하였다. Fig. 6 은 리지 크기가 30nm 인 개구의 SEM 사진이다.

4. 리소그래피 실험과 결과

리소그래피 실험을 위해 405nm 파장에 대한 감광제는 Shipley S1805 를 사용하였으며, 실리콘 웨이퍼에 스핀 코팅을 이용하여 600nm 두께의 감광제를 코팅하였다. 또한, 감광제에서 thinner 성분을 제거하고 감광제를 고체화 하기 위하여 105℃에서 3 분간 soft baking 과정을 거쳤다. 그리고 C 형 개구가 공정된 Al 마스크를 진공장치를 이용하여 감광제와 접촉시키고 노광 시간을 조절하여 전체 입사하는 도즈 (dose)를 조정하였다. 마지막으로 노광된 감광제를 Shipley MF-CD26 으로 10 초간 현상하여 최종적인 나노 크기의 패턴을 형성하였다.

일반적으로 리소그래피 실험에 의해 형성되는 패턴의 크기와 깊이는 입사되는 빛의 도즈의 로그 값에 비례하는 관계를 가지고 있다.²⁴ 이 특성은 나노 개구를 이용한 리소그래피에서도 유효하다.¹¹ 그리고 만약 C 형 개구가 리지가 제 역할을 할 수 없어서 마치 440nm X 90nm 크기의 직사각형 개구의 역할밖에 할 수 없다면, 실험 결과가 C 형 개구 시뮬레이션에 의한 예상 추세를 따라가지 않는 결과를 확인할 수도 있다. 그리고 크기가 같은 직사각형의 개구에 의해 형성되는 패턴 크기는 일반적으로 C 형 개구에 의해 형성되는 패턴에 비하여 클뿐더러, 문턱 도즈에서의 예상할 수 있는 가장 작은 패턴 크기도 약 150nm 이상이 된다. 그러므로 새롭게 설계, 가공된 C 형 개구에서 리지 특성이 제대로 나타나는지 확인하기 위하여 리소그래피 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고, 또한 문턱 도즈에 가까운 도즈에 대하여 패턴의 크기가 150nm 이하의 값을 가지는지를 확인해 볼 필요가 있었다.

문턱 도즈 조건을 찾기 위하여, 실험에서 사용된 도즈와 패턴 크기 결과를 시뮬레이션 결과에서 나타난 패턴 크기와 출력 빔 세기 사이의 관계와 비교하였고, 이에 감광제에서 패턴이 형성되기 시작하는 문턱 도즈 조건이 약 350mJ/cm² 임을 확인하였다. 즉, 감광제에서 350mJ/cm² 이상의 도즈가 노광된 부분만 현상액(developer)을 이용해 에칭되게 된다. 그러므로 시뮬레이션 결과를 통해 각 패

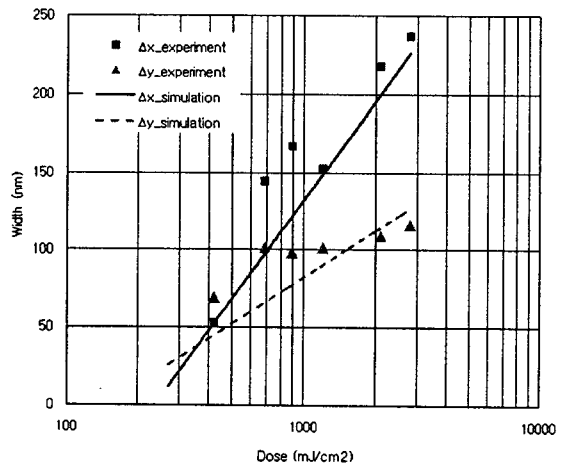


Fig. 7 Dot-pattern size dependent on dose illuminated on the aperture

턴의 크기를 결정하는 빔 세기를 확인하고 문턱 도즈와 비례관계를 따져 각 크기의 패턴이 형성되기 위해 필요한 입사 도즈를 결정할 수 있다. 이렇게 하여 얻어진 입사 도즈와 패턴 크기와의 관계는 Fig. 7 에서 두 개의 추세선으로 표시되었다. 실선은 x 축 방향의 패턴 크기이며, 점선은 y 축 방향의 패턴 크기를 나타낸다. 그리고 모든 패턴 크기는 FWHM 으로 결정된 값이다.

Fig. 7 의 추세선 결과에서는 입사 도즈가 350 mJ/cm² 이상인 경우에 대하여 x 축 방향의 패턴 크기가 y 축 방향의 패턴 크기보다 항상 크게 나타나고 있다. 또한, 시뮬레이션 결과에 의해 x 축 방향의 패턴 크기가 y 축 방향의 패턴 크기에 비하여 더욱 빠르게 증가함을 확인할 수 있다. 이것은 입사하는 빛의 편광 방향이 x 축 방향이기 때문에 나타나는 현상이다. 그러나 350mJ/cm² 이하의 도즈에 대하여 오히려 y 축 방향으로 긴 타원형의 패턴형상이 나타나게 된다. 왜냐하면 y 축 방향의 패턴형성에 있어, x 편광 입사 빔에 의한 영향보다 리지 크기에 의한 영향이 더 크기 때문이다. 그러므로 y 축 방향 패턴 크기는 리지 크기에 의해 최소 크기의 제약을 가지게 되며, 리지가 30nm 인 개구에 의해 형성된 패턴의 경우, y 축 방향의 패턴 크기가 30nm 이하로 형성되는 것은 어렵게 된다.

같은 그래프에서 각 점들은 2800mJ/cm² 에서 400mJ/cm² 까지 도즈 변화에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 700~900mJ/cm² 실험 결과에서는 서로 다른 도즈에 대해서 패턴 크기 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 현상이 발견되는데, 이것은 각각의 실험 상황에서 마스크와 감광제 사이 접촉 간격의 차이나 레이저 세기 변화 등의 실험 오차가 발생하기 때문으로 파악된다. 이런 점을 감안하여 전체적인 실험 결과의 경향성을 파악하였을 때, x 축 방향의 패턴 크기는 입사 도즈가 증가할수록 시뮬레이션 추세선을 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보임을 확인하였다. 또한, 문턱 도즈와 가까운 도즈에 대해서 패턴의 크기는 약 80nm 로 150nm 보다 작은 크기를 나타냈다. 이것은 C 형 개구에서 리지가 제 역할을 하고 있음을 나타내 주는 결과이다. 그리고 입사 광원의 x 축 편광 현상으로 인해 예상된 시뮬레이션 결과에서처럼, 실험 결과를 통해서 도즈 변화에 따른 패턴 크기 변화율이 y 축 방향의 패턴에 비하여 x 축 방향의 패턴에서 더 크게 나타남을 확인하였다. 또한, 각 조건의 도즈에

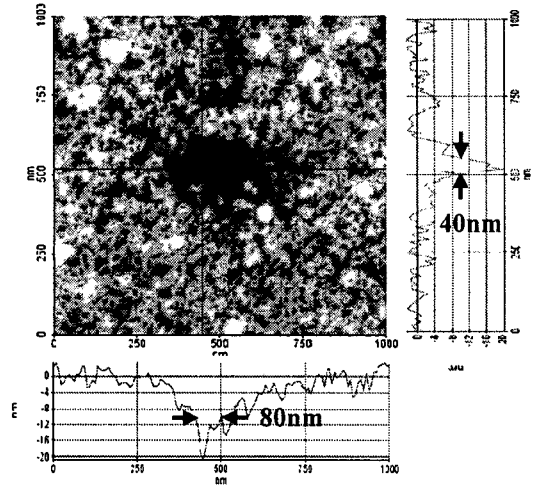


Fig. 8 AFM image of a nano-size pattern recorded on the photoresist

서 형성된 패턴들이 x 축 방향으로 긴 타원형의 패턴으로 만들어지는 결과도 확인하였다. 마지막으로 실험 결과 값에서 도즈 증가에 의한 x 축 방향의 패턴 크기의 변화가 y 축 방향의 패턴 크기 변화에 비하여 추세선을 잘 따라가는 현상을 보이는데, 이것은 x 편광 입사 빔의 영향이 상대적으로 리지 형태나 크기의 오차에 비하여 크게 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8 은 30nm 크기의 리지를 가지는 C 형 개구에 의해 형성된 패턴으로 반폭 크기 80nm x 40nm 와 20nm 의 깊이를 가지고 있다. 앞에서 언급되었던 것처럼 x 편광 입사 빔의 영향으로 인하여 패턴의 형태가 x 축 방향으로 긴 타원형으로 나타났다.

5. 결론

기존 반도체에서 사용했던 h-line (405nm) 레이저와 감광제 (Shipley S1805)을 이용하면서도 레이저 파장의 회절한계를 극복하는 100nm 이하 크기의 나노 패턴을 구현하기 위하여 나노 크기의 C 형 개구를 405nm 파장에 적합하게 설계하였으며, 200nm 두께의 Al 박막에 FIB 를 이용하여 리지가 30, 40, 50 nm 인 나노 크기의 C 형 개구를 제작하였다. 그리고 진공 장치를 이용한 접촉식 리소그래피 공정을 통하여 100nm 이하 크기의 나노 패

턴을 형성하였다. 또한 입사 도즈의 변화에 따른 패턴 크기의 변화를 FDTD 시뮬레이션을 이용하여 예측하고, 실험 결과를 비교하여 C 형 개구에 의해 형성되는 패턴의 크기 변화 경향을 확인하였다. 이로서 나노 크기의 C 형 개구 마스크를 이용하여 기존의 가시광 영역 광원과 일반적인 포토리소그래피 기술을 이용하면서도 회절 한계를 극복하는 패턴의 형성이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업과제 (M10400000027-04J0000-02710)와 나노연구개발사업과제 (M10609000019-06M0900-01910)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Sheats, J. R. and Smith, B. W., "Microlithography science and technology," Marcel Dekker, INC., pp. 8, 1998.
2. Bjorkholm, J. E., "EUV lithography - The successor to optical lithography?," Intel Technology Journal, Vol. 2, No. 3, pp. 1-8, 1998.
3. Tseng, A. A., Chen, K., Chen, C. D. and Ma, K. J., "Electron beam lithography in nanoscale fabricator recent development," IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 26, No. 2, pp. 141-149, 2003.
4. Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., "Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers," Appl. Phys. Lett., Vol. 67, No. 21, pp. 3114-3116, 1995.
5. Dryakhlushin, V. F., Klimov, A. Y., Rogov, V. V. and Vostokov, N. V., "Method of the near-field optical nanolithography using tapered optical fiber," Proc. 5th Int'l Conf. on Transparent Optical Networks, ICTON 2003, Vol. 1, pp. 303-306, 2003.
6. Lin, Y., Hong, M. H., Wang, W. J., Law, Y. Z. and Chong, T. C., "Lithography in UV photoresist using NSOM," Proc. of SPIE, Vol. 5662, pp. 77-82, 2004.
7. Bethe, H. A., "Theory of diffraction by small holes," Phys. Rev., Vol. 66, No. 7-8, pp. 163-182, 1944.
8. Shi, X., Thornton, R. L. and Hesselink, L., "A Nano-aperture with 1000X Power Throughput Enhancement for VSAL," Proc. SPIE, Vol. 4342, pp. 320-327, 2002.
9. Jin, E. X. and Xu, X., "Enhancement of optical transmission through planar nano-apertures in a metal film," Proc. IMECE2003, No. IMECE2003-55235, pp. 1-6, 2003.
10. Eom, G. S., Yang, D., Lee, E., Park, S., Lee, Y. and Hahn, J. W., "Wave propagation characteristics of a figure-eight shaped nanoaperture," J. Appl. Phys., Vol. 101, Issue 10, 103101, 2007.
11. Wang, L., Jin, E. X., Uppuluri, S. M. and Xu, X., "Contact optical nanolithography using nanoscale C-shaped apertures," Opt. Express, Vol. 14, No. 21, pp. 9902-9908, 2006.
12. Xu, X., Jin, E. X., Wang, L. and Uppuluri, S., "Design, fabrication, and characterization of nanometer-scale ridged aperture optical antennae," Proc. of SPIE, Vol. 6106, 61061J, 2006.
13. Wang, L., Uppuluri, S. M., Jin, E. X. and Xu, X., "Nanolithography using high transmission nanoscale bowtie apertures," Nano Lett., Vol. 6, No. 3, pp. 361-364, 2006.
14. Park, S. and Hahn, J. W., "Design of a high-transmission C-shaped nano-aperture in a perfectly electric conductor film," J. KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 160-165, 2006.
15. Tanaka, K. and Tanaka, M., "Optimized computer-aided design of I-shaped subwavelength aperture for high intensity and small spot size," Opt. Commun., Vol. 233, Issues 4-6, pp. 231-244, 2004.
16. Fox, M., "Optical Properties of Solids," Oxford University Press, 2001.
17. Rakić, A. D., Djurišić, A. B., Elazar, J. M. and Majewski, M. L., "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," Appl. Opt., Vol. 37, No. 22, pp. 5271-5283, 1998.
18. Vial, A., Grimault, A. S., Macías, D., Barchiesi, D. and Chapelle, M. L., "Improved analytical fit of gold dispersion: Application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method," Phys. Rev. B, Vol. 71, No. 8, 085416, 2005.
19. Johnson, P. B. and Christy, R. W., "Optical constants for noble metals," Phys. Rev. B, Vol. 6,

No. 12, pp. 4370-4379, 1972.

20. Taflove, A. and Hagnes, S. C., "Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method," Artech House Publishers, pp. 35-142, 2000.
21. Commercial FDTD program – www.optiwave.com
22. Jin, E. X. and Xu, X., "Finite-difference time-domain studies on optical transmission through planar nano-apertures in a metal film," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 1, pp. 407-417, 2004.
23. Xu, T., Wang, J., Sun, L., Xu, J. and Tian, Q., "Investigation of the near-field distribution at novel nanometric aperture laser," IUMRS-ICEM 2002, pp. 501-506, 2002.
24. Sheats, J. R. and Smith, B. W., "Microlithography science and technology," Marcel Dekker, INC., pp. 535-537, 1998.